



**Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación**

**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA**

**TESIS DOCTORAL**

**METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO Y DISEÑO TECNOLÓGICO DEL PROCESO  
SECUENCIAL DE ESTIRADO MULTI-ETAPA DE ALAMBRE Y BARRAS DE SECCIÓN  
CIRCULAR**

**Oscar Rodríguez Alabanda**


Memoria presentada para optar al grado de Doctor

Córdoba, Abril de 2017



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

AUTOR: Oscar Rodríguez Alabanda

 <http://orcid.org/0000-0002-9728-258X>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)





D. **Lorenzo Sevilla Hurtado**, Profesor Titular de Universidad y Director del Departamento de Ingeniería Civil, Materiales y Fabricación de la Universidad de Málaga

INFORMA

Que D. **Óscar Rodríguez Alabanda**, Máster en Ingeniería de Fabricación, ha realizado bajo mi dirección la Tesis Doctoral titulada: METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO TECNOLÓGICO DEL PROCESO SECUENCIAL DE ESTIRADO MULTI-ETAPA DE ALAMBRE Y BARRAS DE SECCIÓN CIRCULAR, que se recoge en la siguiente memoria, cumpliendo todos los requisitos legales para optar al grado de DOCTOR, por lo que autorizamos su lectura y defensa pública.

Y para que así conste y tenga los efectos oportunos, firmo el presente informe

En Málaga, a 10 de enero de 2017

Fdo. D.: Lorenzo Sevilla Hurtado



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**TESIS DOCTORAL**

**METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO Y DISEÑO TECNOLÓGICO DEL PROCESO  
SECUENCIAL DE ESTIRADO MULTI-ETAPA DE ALAMBRE Y BARRAS DE SECCIÓN  
CIRCULAR**



**Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación**

**Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación**

**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA**

**Oscar Rodríguez Alabanda**

**Ingeniero Técnico Industrial y Máster en Ingeniería de Fabricación**

**Programa de Doctorado: Ingeniería de Fabricación**

**Director: Dr. Lorenzo Sevilla Hurtado**

Memoria presentada para optar al grado de Doctor

Córdoba, Abril de 2017



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

A mi padre José y a mi hija Carlota.

*(A mi ángel y a mi vida).*



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## AGRADECIMIENTOS

En estas líneas quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas, compañeros, familiares y amigos que, siendo conocedores del camino que he estado recorriendo estos años, me han alentado y han estado a mi lado en la consecución de esta meta.

En primera persona y lugar a Lorenzo Sevilla, director de este trabajo. Quiero expresarte mi agradecimiento por el trato que me has dado desde que nos conocimos, por tu esfuerzo, paciencia y dedicación en el desarrollo de este trabajo y muy especialmente por haberme ofrecido la posibilidad de trabajar contigo.

A Carolina Bermudez, quiero agradecerle su ayuda y su disponibilidad desinteresada para ayudarme con el software de simulación *Deform*.

A la Empresa *Cunext Copper Industries S.L.*, representada por Pablo Camacho, agradecerle el haberme permitido el acceso a sus instalaciones. A él mismo gracias por su interés, disposición y amabilidad.

Especialmente doy las gracias a Rafaél Perucho y su equipo de trabajo en *Cunext Copper Industries S.L.*, por facilitarme toda la información necesaria para realizar el estudio de sus procesos y haberme enseñado cosas tan interesantes. Gracias por haberme dedicado tu propio tiempo.

Mención especial a mi maestro, compañero y amigo Guillermo Guerrero, por inculcarme esa inquietud y motivación; por todo lo que me has apoyado y ayudado siempre.

Quiero dar las gracias también a mi mujer Carolina y a mi hija Carlota, por haber compartido conmigo todo el sacrificio que ha supuesto la realización de este trabajo.

Córdoba, Diciembre de 2016



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## INDICE GENERAL

---



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>7</b>
<b>INDICE GENERAL .....</b>	<b>9</b>
<b>INDICE DE FIGURAS Y TABLAS.....</b>	<b>17</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>33</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>39</b>
<b>Introducción y generalidades .....</b>	<b>39</b>
1.1    Introducción.....	41
1.2    Objetivo de la tesis .....	43
1.3    Estructura de la memoria .....	43
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>47</b>
<b>El proceso de estirado multi-etapa: marco teórico y estado del arte .....</b>	<b>47</b>
2.1    Procesos de conformado por deformación plástica (PCDP) .....	49
2.1.1    Clasificación de los PCDP según la temperatura del proceso .....	49
2.1.2    Clasificación de los PCDP según la naturaleza de los esfuerzos aplicados.....	49
2.2    Proceso de estirado .....	50
2.3    Fundamentos del proceso de estirado .....	50
2.3.1    Proceso de estirado de barras de sección circular.....	52
2.3.2    Proceso de estirado de alambre de sección circular: trefilado de hilo metálico .....	53
2.3.3    Proceso de estirado de barras de sección cuadrada o rectangular .....	54
2.4    La herramienta de estirado: matriz de estirado o hilera .....	55
2.4.1    Geometría de la matriz de estirado o hilera .....	55
2.4.2    Longitud de calibración de la matriz de estirado o hilera .....	60
2.4.3    Materiales para la fabricación de la matriz de estirado o hilera.....	62
2.5    Maquinaria empleada en el proceso de estirado .....	64
2.5.1    El banco de estirado.....	64
2.5.2    La trefiladora.....	65
2.6    Consideraciones sobre el proceso de estirado .....	67
2.6.1    Propiedades mecánicas del material .....	67
2.6.2    Tratamientos térmicos de reestructuración .....	72
2.6.3    Condiciones tribológicas .....	74
2.6.4    Temperatura .....	79
2.6.5    Velocidad .....	81

2.7	Métodos para el análisis de procesos de conformado por deformación plástica .....	84
2.7.1	Fundamentos para el análisis de un proceso de conformado por deformación plástica ..	84
2.7.2	Método de la deformación homogénea .....	87
2.7.3	Método de análisis de las tensiones locales ( <i>Slab method</i> ) .....	88
2.7.4	Método del campo de líneas de deslizamiento ( <i>Slip line field method</i> ).....	89
2.7.5	Método del límite inferior ( <i>Lower bound method</i> ) .....	90
2.7.6	Método del límite superior ( <i>Upper bound method</i> ).....	91
2.7.7	Método de los elementos finitos ( <i>MEF</i> ).....	91
2.7.8	Métodos experimentales: empíricos y semi-empíricos .....	93
2.8	El método de análisis local de tensiones aplicado al estirado .....	94
2.8.1	El método de análisis local de tensiones aplicado al estirado .....	95
2.8.2	Factores de influencia para la determinación de la tensión de estirado en el estirado de productos de sección circular .....	98
2.9	Antecedentes en el estudio del proceso secuencial de estirado multi-etapa. ....	102
2.10	Recapitulación.....	111

### **CAPÍTULO 3 .....** 113

#### **Metodología para el análisis de procesos secuenciales de estirado multi-etapa .....** 113

3.1	Fundamentos de la metodología aplicada al proceso secuencial de estirado multi-etapa ..	115
3.1.1	Fenómeno de endurecimiento por deformación en los metales.....	116
3.1.2	Recocido del metal conformado plásticamente en frío .....	118
3.1.3	Diseño de la secuencia de etapas del proceso de estirado multi-etapa considerando únicamente deformación homogénea .....	119
3.1.4	Parámetros fundamentales del proceso .....	123
3.1.5	Variables de entrada .....	126
3.1.6	Variables de salida.....	128
3.2	Implementación del método de análisis local de tensiones en la metodología propuesta..	129
3.3	Metodología de análisis del proceso secuencial de estirado multi-etapa .....	130
3.3.1	Justificación de la aplicación de la metodología propuesta .....	131
3.3.2	Introducción a la metodología propuesta .....	132
3.3.3	Descripción de la metodología propuesta .....	134
3.4	La aplicación informática <i>PullWorks</i> : implementación de la propuesta .....	143
3.4.1	Introducción .....	143
3.4.2	La interfaz del programa .....	144
3.4.3	Los menús desplegables y la barra de botones.....	145
3.4.4	Flujo de trabajo del programa.....	146
3.4.5	Selección del tipo de proceso.....	147
3.4.6	Definición de las condiciones tribológicas del proceso: rozamiento y lubricación .....	148
3.4.7	Definición de la geometría de la herramienta .....	149
3.4.8	Introducción de datos de geometrías inicial y final .....	150
3.4.9	Condiciones para la estimación de la secuencia de recocidos.....	151
3.4.10	Cálculo y diseño de la secuencia de etapas del proceso .....	152
3.4.11	Determinación de las velocidades del proceso .....	153
3.4.12	Determinación de los parámetros tecnológicos del proceso .....	154
3.4.13	Exportar datos a una hoja de cálculo tipo Excel .....	155

3.4.14	Impresión de las pestañas de la ventana principal .....	157
3.4.15	Menú de ayuda e instrucciones de uso del programa .....	157
3.4.16	Información sobre la versión, año y autor .....	158
3.5	El método de los elementos finitos (MEF).....	159
3.5.1	Elección del programa o herramienta de aplicación del MEF.....	160
3.5.2	Flujo de trabajo en <i>Deform2D</i> .....	162
3.5.3	Definición del modelo y pre-procesado .....	162
3.5.4	Simulación del proceso .....	163
3.5.5	Análisis del proceso y post-procesado .....	164
3.6	Recapitulación .....	165

**CAPÍTULO 4 .....167**

**Aplicación de la metodología al estudio del estirado secuencial multi-etapa.....167**

4.1	Estudio y análisis del proceso de trefilado de hilo de acero para soldadura.....	169
4.1.1	Caracterización de las condiciones de las variables de entrada del proceso.....	169
4.1.2	Justificación del estudio y análisis del trefilado de acero para soldadura .....	170
4.1.3	Resultados del análisis mediante la metodología propuesta .....	172
4.1.4	Resultados del análisis mediante la herramienta MEF, <i>Deform2D</i> .....	175
4.1.5	Discusión de los resultados obtenidos.....	180
4.2	Estudio y análisis del trefilado de cobre para conductores eléctricos.....	186
4.2.1	Caracterización de las condiciones de inicio del proceso .....	186
4.2.2	Justificación del estudio y análisis del trefilado del cobre .....	187
4.2.3	Resultados del análisis mediante la metodología propuesta .....	187
4.2.4	Resultados de los análisis mediante la herramienta MEF, <i>Deform2D</i> .....	192
4.2.5	Discusión de los resultados obtenidos.....	200
4.3	Estudio y análisis del proceso de estirado de una barra de aluminio.....	205
4.3.1	Caracterización de las condiciones inicio del proceso .....	205
4.3.2	Justificación del estudio y análisis del trefilado del aluminio .....	205
4.3.3	Resultados del análisis mediante la metodología propuesta .....	207
4.3.4	Resultados del análisis mediante la herramienta MEF, <i>Deform2D</i> .....	211
4.3.5	Discusión de los resultados obtenidos.....	217
4.4	Estudio y análisis del proceso de trefilado de una barra de latón.....	221
4.4.1	Caracterización de las condiciones de inicio del proceso .....	221
4.4.2	Justificación del estudio y análisis del trefilado de latón .....	221
4.4.3	Resultados del análisis mediante la metodología propuesta .....	223
4.4.4	Resultados del análisis mediante la herramienta MEF, <i>Deform2D</i> .....	231
4.4.5	Discusión de los resultados obtenidos.....	238
4.5	Estudio y análisis del proceso de trefilado de cobre <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ....	243
4.5.1	Descripción del proceso productivo para el trefilado de cobre.....	243
4.5.2	Descripción del proceso de trefilado en desbaste.....	246
4.5.3	Descripción del proceso de trefilado en acabado.....	250
4.5.4	Caracterización del material empleado en el proceso de trefilado .....	254
4.5.5	Condiciones tribológicas del proceso de trefilado del cobre en Cunext.....	258
4.5.6	Estudio de optimización del proceso secuencial de trefilado multi-etapa de desbaste.....	260
4.5.6	Estudio de optimización del proceso secuencial de trefilado multi-etapa de acabado... 273	273

4.5.7	Discusión de los resultados obtenidos.....	286
4.6	Recapitulación.....	291
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>293</b>
<b>Conclusiones finales.....</b>		<b>293</b>
5.1	Introducción.....	295
5.2	Conclusiones generales.....	295
5.3	Conclusiones particulares.....	297
5.4	Estado actual y posibles líneas de desarrollo futuro.....	302
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>305</b>
<b>ANEXO I.....</b>		<b>331</b>
<b>Fundamentos sobre plasticidad aplicados al proceso de estirado.....</b>		<b>331</b>
AI.1	Introducción al comportamiento plástico de los metales.....	333
AI.2	Fundamentos sobre el conformado por deformación plástica.....	333
AI.3	Plasticidad y criterios de fluencia.....	334
AI.3.1	Criterio de fluencia.....	335
AI.3.2	Criterio de Tresca.....	335
AI.3.3	Criterio de von Mises.....	336
AI.3.4	Fluencia bidimensional: condiciones de deformación plana.....	337
AI.3.5	Rozamiento de Coulomb.....	337
AI.4	La teoría de la plasticidad: evolución histórica.....	338
<b>ANEXO II.....</b>		<b>343</b>
<b>Materiales conformados en el proceso de estirado y en los casos estudiados.....</b>		<b>343</b>
AII.1	Los metales como materia prima del proceso de estirado.....	345
AII.1.1	Aceros.....	346
AII.1.2	Aluminios.....	349
AII.1.3	Cobre y sus aleaciones.....	353
<b>ANEXO III.....</b>		<b>359</b>
<b>Resultados obtenidos en los análisis con <i>PullWorks</i>.....</b>		<b>359</b>
AIII.1	Introducción y justificación.....	361
AIII.2	Estudio y análisis del proceso de trefilado de acero ER 70S-6.....	361
AIII.2.1	Resultados del análisis con <i>PullWorks</i> .....	361

## ***Índice General***

---

AIII.3 Estudio y análisis del proceso de trefilado de cobre C11000-O.....	363
AIII.3.1 Resultados del análisis con <i>PullWorks</i> .....	363
AIII.4 Estudio y análisis del proceso de trefilado de aluminio AL7075-O.....	366
AIII.4.1 Resultados del análisis con <i>PullWorks</i> .....	366
AIII.5 Estudio y análisis del proceso de trefilado de latón 70-30, C26000 .....	369
AIII.5.1 Resultados del análisis con <i>PullWorks</i> .....	369



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

---



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>39</b>
<b>Introducción y generalidades .....</b>	<b>39</b>
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>47</b>
<b>El proceso de estirado multi-etapa: marco teórico y estado del arte .....</b>	<b>47</b>
Figura 2.1 Variantes del proceso de estirado (elaboración propia).....	50
Figura 2.2 Estirado de barras, alambre o hilo metálico (elaboración propia).....	50
Figura 2.3 Proceso de producción de barras estiradas en Suresh Steel Tubes Pvt. Ltd.....	52
Figura 2.4 Proceso de producción de alambre en Suresh Steel Tubes Pvt. Ltd. ....	53
Figura 2.5 Estirado de una barra retorcida de sección cuadrada [Haghighat et al., 2011].....	54
Figura 2.6 Partes de una matriz o hilera de estirado [Groover, 2010].....	55
Figura 2.7 Tensión de estirado relativa vs. semi-ángulo $\alpha$ de la hilera [Wistreich, 1955]. ....	57
Figura 2.8 Parámetros geométricos para la determinación de $\Delta$ [Kristensen et al., 2004]. ....	57
Figura 2.9 Hileras con núcleo de carburo de tungsteno fabricadas por Esteves Group. ....	62
Figura 2.10 Partes principales de un banco de estirado [Groover, 2010].....	64
Figura 2.11 Instalación automática para estirado y corte de barras Bültmann.....	65
Figura 2.12 Estructura de una máquina trefiladora en línea [Kalpakjian, 2008].....	65
Figura 2.13 Máquina trefiladora en línea hasta 10 estaciones de estirado. ....	66
Figura 2.14 Trefiladora compacta de poleas cónicas, modelo CL-15D. ....	66
Figura 2.15 Evolución de las propiedades mecánicas como consecuencia del conformado por deformación plástica en frío aplicado a diferentes metales [Callister, 2007].....	70
Figura 2.16 Influencia del endurecimiento por deformación en frío en la curva de tensiones-deformaciones de un acero con bajo contenido en carbono [Callister, 2007]. ....	70
Figura 2.17 Evolución de las propiedades mecánicas en el estirado [Schey, 2002].....	71
Figura 2.18 Alteración de la curva $\sigma$ - $\epsilon$ del aluminio estirado [Betancourt et al., 2014] ....	71
Figura 2.19 Bobina de cobre ultra fino de un mecanismo de reloj.....	74
Figura 2.20 Lubricación hidrodinámica en el estirado [Hosford et al., 2007]. ....	78
Figura 2.21 Factores de influencia en el proceso de estirado (elaboración propia).....	83
Figura 2.22 Componentes principales del trabajo en un PCDP (elaboración propia).....	85
Figura 2.23 Contribución de las diferentes energías del proceso a la carga final de estirado en función del semi-ángulo $\alpha$ . [Avitzur, 1983] [Peña, 2008].....	86
Figura 2.24 Curva tensión-deformación. Tensión de fluencia media y trabajo de deformación en un proceso ideal de tracción uniaxial simple [Rowe, 1972].....	88
Figura 2.25 Modelo para el análisis local de tensiones en forja de [Siebel, 1923]. ....	89
Figura 2.26 Campo de líneas de deslizamiento rectas y/o con curvaturas (elaboración propia). ....	90

Figura 2.27 Distribución de tensiones en la malla de elementos finitos correspondiente a una barra durante el proceso de estirado (elaboración propia). .....	92
Figura 2.28 Theodore von Karman, 1881-1963.....	95
Figura 2.29 Esquema del análisis local de tensiones en el estirado de una barra o hilo metálico de sección circular [Rowe, 1972]. .....	99
Figura 2.30 Acción de la bobina o tensor de fricción en una etapa <i>i</i> del proceso secuencial de estirado multi-etapa [Thimont et al., 2011]. .....	100
Figura 2.31 Antiguo procedimiento de estirado secuencial multi-etapa. ....	103
Figura 2.32 Varios perfiles de la zona de deformación de la hilera [Wright, 1979]. .....	104
Figura 2.33 Resultados obtenidos mediante el método de análisis local de tensiones clásico comparados con la tensión de estirado obtenida en ensayos reales [Ikumapayi et al., 2015].....	104
Figura 2.34 Variación de deformación efectiva en la sección circular estirada, para diferentes valores del semiángulo $\alpha$ [Majzoubi et al., 2008]. .....	106
Figura 2.35 Vista de la distribución de deformaciones obtenida de análisis por el método de los elementos finitos aplicado al estirado [Muskalski et al., 2011]. .....	110

### **CAPÍTULO 3 ..... 113**

#### **Metodología para el análisis de procesos secuenciales de estirado multi-etapa ..... 113**

Figura 3.1 Influencia del conformado en frío en las propiedades de los metales [Dieter, 1961]. .....	116
Figura 3.2 Curva tensión-deformación de un metal conformado plásticamente en frío [Sebastián, 2010]. .....	120
Figura 3.3 Representación gráfica de la condición límite del proceso [Sebastián, 2010]. .....	121
Figura 3.4 Representación gráfica de un proceso de estirado multi-etapa [Sebastián, 2010].....	122
Figura 3.5 Diferentes zonas de la hilera y grados de desgaste [Lee K-H. et al., 2012]. .....	124
Figura 3.6 Influencia del semi-ángulo $\alpha$ y del rozamiento [Wistreich, 1955]. .....	125
Figura 3.7 Tensión de retroceso o “back-pull” en el trefilado [Kut et al., 2013]. .....	125
Figura 3.8 Defectos de vacío central en el cobre estirado [Norasethasopon, 2011]. .....	128
Figura 3.9 Diseño de la secuencia de etapas bajo deformación homogénea [Sebastián, 2010]. .....	137
Figura 3.10 Diseño de la secuencia aplicando $\Delta$ óptimo [Rowe, 1972], [Gur’yanov, 2008].....	139
Figura 3.11 Diagrama descriptivo de la metodología propuesta. ....	142
Figura 3.12 Logotipo de la herramienta informática <i>PullWorks</i> . .....	143
Figura 3.13 Interfaz principal de la herramienta informática <i>PullWorks</i> . .....	144
Figura 3.14 Pestaña de diseño del proceso en la aplicación <i>PullWorks</i> . .....	144
Figura 3.15 Pestaña de parámetros tecnológicos de estirado en la aplicación <i>PullWorks</i> . .....	145
Figura 3.16 Menús desplegables y barra de botones en la aplicación <i>PullWorks</i> . .....	145
Figura 3.17 Ventana de selección del tipo de proceso de estirado.....	147
Figura 3.18 Ventana de parámetros asociados al “backpull” en el trefilado. ....	147

Figura 3.19 Ventana de selección del material procesado y sus propiedades mecánicas.....	148
Figura 3.20 Ventana para indicar el tipo de lubricación aplicada. ....	148
Figura 3.21 Ventana para indicar el coeficiente de rozamiento en la interfase. ....	149
Figura 3.22 Parámetros para la definición de la geometría de la herramienta. ....	150
Figura 3.23 Introducción de diámetro de inicio y diámetro a obtener.....	150
Figura 3.24 Menú en el que se indica la existencia de recocido inicial.....	151
Figura 3.25 Apariencia de la ventana de diseño de la secuencia de etapas. ....	152
Figura 3.26 Apariencia inicial de la ventana de diseño de la secuencia de etapas. ....	152
Figura 3.27 Mensajes de aviso al alcanzar el límite de 30 etapas en <i>PullWorks</i> .....	153
Figura 3.28 Cálculo de velocidades en las etapas de la secuencia de estirado.....	154
Figura 3.29 Cálculo de los parámetros tecnológicos.....	155
Figura 3.30 Comando para exportar datos y resultados a hoja de cálculo.....	156
Figura 3.31 Ejemplo de gráfica comparativa de resultados obtenidos por diferentes métodos.....	156
Figura 3.32 Evolución la fuerza de trefilado en un proceso de estirado secuencial.....	156
Figura 3.33 Ventanas para la configuración de impresión en <i>PullWorks</i> .....	157
Figura 3.34 Presentación inicial y ventana de información acerca de <i>PullWorks</i> . ....	158
Figura 3.35 Interfaz del Pre-procesador en <i>Deform2D</i> . ....	162
Figura 3.36 Opciones de control de la simulación en <i>Deform2D</i> . ....	163
Figura 3.37 Ventana del motor de simulación de <i>Deform2D</i> .....	164
Figura 3.38 Interfaz del Post-procesador en <i>Deform2D</i> .....	165

**CAPÍTULO 4 .....167**

**Aplicación de la metodología al estudio del estirado secuencial multi-etapa.....167**

Figura 4.1 Evolución del límite de fluencia vs. % de reducción, [Rojas et al., 2006].....	171
Figura 4.2 Evolución la fuerza de trefilado en función del % deformado, [Rojas et al., 2006]. ....	171
Figura 4.3 Tensiones del estirado secuencial del acero ER 70S-6, para $\Delta=1,20$ en <i>PullWorks</i> .....	173
Figura 4.4 Tensiones del estirado secuencial del acero ER 70S-6, para $\Delta=1,80$ en <i>PullWorks</i> .....	175
Figura 4.5 Tensiones y deformaciones en la etapa 1ª del proceso secuencial de estirado del acero ER 70S-6, $\Delta=1,20$ en <i>Deform2D</i> .....	176
Figura 4.6 Tensiones para el estirado del acero ER 70S-6, $\Delta=1,20$ en <i>Deform2D</i> . ....	177
Figura 4.7 Carga de estirado vs desplazamiento, 1ª etapa de estirado (ER 70S-6, $\Delta=1,20$ ).....	177
Figura 4.8 Tensiones para el estirado del acero ER 70S-6, $\Delta=1,80$ en <i>Deform2D</i> . ....	178
Figura 4.9 Tensiones y deformaciones en la etapa 5ª del proceso secuencial de estirado del acero ER 70S-6, $\Delta=1,80$ en <i>Deform2D</i> .....	179
Figura 4.10 Carga de estirado vs tiempo, 5ª etapa de estirado (ER 70S-6, $\Delta=1,80$ ). ....	179

Figura 4.11 Comparativa de resultados obtenidos para el trefilado del acero ER 70S-6. ....	181
Figura 4.12 Comparación de resultados obtenidos para el trefilado del acero ER 70S-6. ....	182
Figura 4.13 Diseño del estirado del acero ER 70S-6 en 10 etapas ( $\Delta = 2,60$ ). ....	183
Figura 4.14 Parámetros tecnológicos, estirado de acero ER 70S-6 ( $\alpha = 6^\circ$ , $\Delta = 2,75$ ). ....	184
Figura 4.15 Comparativa de tensiones de estirado multi-etapa del acero ER 70S-6 en 10 etapas. ....	185
Figura 4.16 Tensiones de estirado del Cu-ETP, para $\mu = 0,36$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ en <i>PullWorks</i> . ....	189
Figura 4.17 Tensiones de estirado del Cu- ETP para $\mu = 0,21$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ en <i>PullWorks</i> . ....	191
Tabla 4.25 Diseño tecnológico del trefilado Cu-ETP ( $\mu = 0,14$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ , <i>PullWorks</i> ). ....	191
Figura 4.18 Tensiones de estirado del Cu-ETP, $v_f = 0,078$ m/s, $\Delta = 2,40$ y $\mu = 0,14$ . ....	192
Figura 4.19 Tensiones y deformaciones obtenidas en <i>Deform2D</i> para la etapa 3ª del proceso secuencial de trefilado del cobre C11000-O para $\mu = 0,36$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ . ....	193
Figura 4.20 Tensiones obtenidas en <i>Deform2D</i> , estirado del cobre C11000-O para $\mu = 0,36$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ . ....	194
Figura 4.21 Carga de estirado vs desplazamiento, 3ª etapa estirado C11000-O para $\mu = 0,36$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ con <i>Deform2D</i> . ....	194
Figura 4.22 Tensiones y deformaciones obtenidas en <i>Deform2D</i> para la etapa 4ª del proceso secuencial de trefilado del Cu-ETP ( $\mu = 0,21$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ ). ....	195
Figura 4.23 Tensiones obtenidas en <i>Deform2D</i> , estirado del cobre C11000-O para $\mu = 0,21$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ con <i>Deform2D</i> . ....	196
Figura 4.24 Carga de estirado vs desplazamiento, 4ª etapa estirado C11000-O para $\mu = 0,21$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ . ....	196
Figura 4.25 Tensiones y deformaciones obtenidas con <i>Deform2D</i> para la etapa 5ª (con recocido) en el proceso secuencial de trefilado del cobre C11000-O, $\Delta = 2,40$ y $\mu = 0,14$ . ....	198
Figura 4.26 Tensiones obtenidas en <i>Deform2D</i> , estirado del cobre C11000-O, $\Delta = 2,40$ , $\mu = 0,14$ . ....	198
Figura 4.27 Carga de estirado vs desplazamiento, 4ª etapa estirado C11000-O, $\Delta = 2,40$ , $\mu = 0,14$ . ....	199
Figura 4.28 Carga de estirado vs desplazamiento, 5ª etapa del proceso de estirado secuencial del cobre C11000-O, $\Delta = 2,40$ , $\mu = 0,14$ . ....	199
Figura 4.29 Evolución de la tensión de estirado del cobre C11000-O para $\mu = 0,36$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ con <i>Deform2D</i> y <i>PullWorks</i> . ....	202
Figura 4.30 Evolución de la tensión de estirado del cobre C11000-O para $\mu = 0,21$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ con <i>Deform2D</i> y <i>PullWorks</i> . ....	202
Figura 4.31 Evolución de la tensión de estirado del cobre C11000-O para $\mu = 0,14$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ con <i>Deform2D</i> y <i>PullWorks</i> . ....	202
Figura 4.32 Comparativa de evolución de $\sigma_e$ <i>PullWorks</i> vs experimental (cobre C11000-O, $\mu = 0,36$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ ). ....	203
Figura 4.33 Comparativa de evolución de $\sigma_e$ <i>PullWorks</i> vs experimental (cobre C11000-O, $\mu = 0,21$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ ), lubricación distinta. ....	203
Figura 4.34 Comparativa de evolución de $\sigma_e$ <i>PullWorks</i> vs experimental (cobre C11000-O, $\mu = 0,14$ , $v_f = 0,078$ m/s y $\Delta = 2,40$ ). ....	204

Figura 4.35 Evolución del valor de $\sigma_e$ (cobre C11000-O, <i>Deform2D</i> vs experimental).....	204
Figura 4.36 Tensiones de estirado para el AW 7075-O con <i>PullWorks</i> ( $\mu=0,10, \Delta=2,75$ ). .....	209
Figura 4.37 Tensiones de estirado para el AW 7075-O con <i>PullWorks</i> ( $\mu=0,10, \Delta=2,30$ ). .....	210
Figura 4.38 Tensiones y deformaciones obtenidas en <i>Deform2D</i> para la etapa 2ª del proceso secuencial de estirado del aluminio AW 7075-O para $\Delta=2,75, \mu=0,10$ . .....	213
Figura 4.39 Carga vs desplazamiento, 2ª etapa estirado AW 7075-O ( $\Delta=2,75, \mu=0,10$ ). .....	214
Figura 4.40 Tensiones y deformaciones obtenidas en <i>Deform2D</i> para la etapa 4ª del proceso secuencial de estirado del aluminio AW 7075-O, ( $\Delta=2,30, \mu=0,10$ ). .....	215
Figura 4.41 Tensiones-deformaciones obtenidas en <i>Deform2D</i> para la etapa 6ª, tras recocido, en el proceso secuencial de estirado del aluminio AW 7075-O ( $\Delta=2,30, \mu=0,10$ ). .....	216
Figura 4.42 Carga vs desplazamiento, 4ª etapa estirado AW 7075-O ( $\Delta=2,30, \mu=0,10$ ). .....	217
Figura 4.43 Evolución de la tensión de estirado del AW 7075-O para $\mu=0,10, \Delta=2,75, r=0,18$ ( <i>Deform2D</i> vs <i>PullWorks</i> ). .....	220
Figura 4.44 Evolución de la tensión de estirado del AW 7075-O para $\mu=0,10, \Delta=2,75, r=0,22$ ( <i>Deform2D</i> vs <i>PullWorks</i> ). .....	220
Figura 4.45 Tensiones de estirado en el trefilado del latón ( $\mu=0,12, \Delta=2,50, \alpha=5^\circ$ ). .....	226
Figura 4.46 Tensión de estirado en el trefilado secuencial de latón ( $\mu=0,12, \Delta=2,50, \alpha=5^\circ$ ). .....	228
Figura 4.47 Tensión de estirado en el trefilado secuencial de latón ( $\mu=0,12, \Delta=2,50, \alpha=11^\circ$ ). .....	230
Figura 4.48 Gráfica de tensiones para el trefilado del latón ( <i>Deform2D</i> , $\Delta=2,50, \mu=0,12, \alpha=8^\circ$ ). .....	233
Figura 4.49 Tensiones-deformaciones trefilado de latón (etapa 13, con recocido, $\alpha=8^\circ$ ). .....	233
Figura 4.50 Tensiones-deformaciones trefilado de latón (etapa 16, sin recocido, $\alpha=8^\circ$ ). .....	234
Figura 4.51 Carga vs desplazamiento, 13ª etapa trefilado latón ( $\Delta=2,50, \mu=0,12, \alpha=8^\circ$ ). .....	234
Figura 4.52 Gráfica de tensiones para el trefilado del latón ( <i>Deform2D</i> , $\Delta=2,50, \mu=0,12, \alpha=11^\circ$ ). ....	236
Figura 4.53 Tensiones-deformaciones trefilado de latón (etapa 5, sin recocido, $\alpha=11^\circ$ ). .....	236
Figura 4.54 Carga vs desplazamiento, 5ª etapa trefilado latón ( $\Delta=2,50, \mu=0,12, \alpha=11^\circ$ ). .....	237
Figura 4.55 Distribución de deformaciones obtenida en el producto final estirado (latón C26000 o latón 70/30) para $\alpha = 8^\circ$ (izquierda) y $\alpha = 11^\circ$ (derecha). .....	239
Figura 4.56 Evolución del valor de la tensión $\sigma_e$ de estirado del latón C26000 para diferentes valores del semi-ángulo $\alpha$ de la hilera ( <i>PullWorks</i> ). .....	240
Figura 4.57 Valor de la tensión $\sigma_e$ de estirado del latón C26000 para $\alpha = 8^\circ$ ( <i>PullWorks</i> vs <i>Deform2D</i> ) ..	241
Figura 4.58 Valor de la tensión $\sigma_e$ de estirado del latón, $\alpha = 11^\circ$ ( <i>PullWorks</i> vs <i>Deform2D</i> ). .....	241
Figura 4.59 Potencia para el trefilado secuencial multi-etapa del latón C26000 ( <i>PullWorks</i> ). .....	242
Figura 4.60 Factoría de <i>Cunext Copper Industries S.L.L.</i> en Córdoba. .....	243
Figura 4.61 Colada continua para la obtención de alambón. .....	244
Figura 4.62 Colada continua y laminación en caliente “Contirod” ( <i>Cunext Copper Ind. S.L.</i> ). .....	244
Figura 4.63 Unidad de trefilado de desbaste de alambre. .....	245

Figura 4.64 Unidad de trefilado de acabado de hilo de cobre. ....	245
Figura 4.65 Trefiladora <i>Niehoff M85 (Maschinenfabrik Niehoff GmbH &amp; Co.)</i> . ....	247
Figura 4.66 Interfaz del software de análisis y diseño de hileras <i>Drawing Die Wizard</i> . ....	248
Figura 4.67 Bobinador de alambre de cobre ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ). ....	249
Figura 4.68 Trefiladora <i>Sictra TM-25</i> y horno de recocido ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ). ....	252
Figura 4.69 Vista del interior de la hilera de estirado en <i>Drawing Die Wizard</i> . ....	253
Figura 4.70 Curva tensión-deformación del Cu-ETP recocido, $\varnothing 8$ mm [Fujiwara et al., 1993]. ....	254
Figura 4.71 Resultados obtenidos en los ensayos de tracción ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ). ....	255
Figura 4.72 Grafica de regresión polinómica para valores obtenidos de $\sigma_{UTS}$ vs. $\Delta\%R_s$ ....	256
Figura 4.73 Grafica de regresión polinómica para valores obtenidos de $\sigma_y$ vs. $\Delta\%R_s$ ....	256
Figura 4.74 Grafica de regresión polinómica para las tensiones $\sigma_y$ , $\sigma_{UTS}$ frente a $\Delta\%R_s$ .....	257
Figura 4.75 Influencia del material de la hilera en el valor del coeficiente de rozamiento para el estirado del cobre Cu-ETP [Wright, 2011]. ....	259
Figura 4.76 Diseño de la secuencia de desbaste con <i>PullWorks (Cunext Copper Ind. S.L.)</i> . ....	261
Figura 4.77 Datos tecnológicos del trefilado de desbaste diseñado con <i>PullWorks</i> para <i>Cunext</i> . ....	262
Figura 4.78 Gráfica de evolución de las tensiones principales en el proceso secuencial de trefilado multi-etapa en desbaste del Cu-ETP1 diseñado con <i>PullWorks</i> . ....	263
Figura 4.79 Diseño alternativo realizado con <i>PullWorks</i> (trefilado desbaste, $\alpha$ variable, <i>Cunext Copper Ind. S.L.</i> ). ....	265
Figura 4.80 Datos tecnológicos del trefilado alternativo de desbaste diseñado con <i>PullWorks</i> para <i>Cunext</i> ( $\alpha$ variable). ....	266
Figura 4.81 Gráfica de evolución de las tensiones principales en el proceso secuencial de trefilado multi-etapa en desbaste del Cu-ETP1 diseñado con <i>PullWorks</i> . ....	267
Figura 4.82 Diseño optimizado con <i>PullWorks</i> (trefilado desbaste, <i>Cunext Copper Ind. S.L.</i> ). ....	268
Figura 4.85 Tensión estirado $\sigma_e$ obtenida con <i>PullWorks</i> y <i>Deform2D</i> para el trefilado en desbaste ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ). ....	271
Figura 4.86 Tensión estirado $\sigma_e$ obtenida para el trefilado optimizado en desbaste ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ). ....	272
Figura 4.87 Diseño realizado con <i>PullWorks</i> (trefilado acabado, <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ). ....	275
Figura 4.88 Cálculo de velocidades del trefilado multi-etapa con <i>PullWorks</i> . ....	275
Figura 4.89 Datos tecnológicos del trefilado de acabado diseñado con <i>PullWorks</i> para <i>Cunext</i> . ....	276
Figura 4.90 Gráfica de evolución de las tensiones principales en el proceso secuencial de trefilado multi-etapa de acabado del Cu-ETP1 diseñado con <i>PullWorks</i> . ....	277
Figura 4.91 Diseño optimizado con <i>PullWorks</i> (trefilado acabado, <i>Cunext Copper Ind. S.L.</i> ). ....	279
Figura 4.92 Parámetros tecnológicos del trefilado optimizado de acabado ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ). ....	280
Figura 4.93 Representación gráfica de los parámetros tecnológicos en el trefilado secuencial multi-etapa de acabado optimizado. ....	281

Figura 4.94 Tensión de estirado $\sigma_e$ obtenida con <i>PullWorks</i> y <i>Deform2D</i> para el trefilado en acabado ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ).....	284
Figura 4.95 Simulación 3D de la distribución de tensiones (etapa 10ª) de acabado. ....	283
Figura 4.96 Tensión estirado $\sigma_e$ obtenida para el trefilado optimizado en desbaste ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ).....	286
Figura 4.97 Evolución de $\sigma_e$ para el proceso de trefilado en desbaste del cobre Cu-ETP1 de <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> , obtenido con <i>PullWorks</i> y <i>Deform2D</i> . ....	287
Figura 4.98 Evolución de $\sigma_e$ para el proceso de trefilado en acabado del cobre Cu-ETP1 de <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> , obtenido con <i>PullWorks</i> y <i>Deform2D</i> . ....	287
Figura 4.99 Evolución de la fuerza de estirado en la secuencia de desbaste del cobre diseñada para <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> , obtenido con <i>PullWorks</i> y <i>Deform2D</i> . ....	287
Figura 4.100 Evolución de la fuerza de estirado en la secuencia de acabado del cobre diseñada para <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> , obtenido con <i>PullWorks</i> y <i>Deform2D</i> . ....	288
Figura 4.101 Comparativa gráfica de los tres procesos diseñados para el trefilado de desbaste ( <i>Cunext Copper Industries, S.L.</i> ).....	288
Figura 4.102 Comparativa gráfica de los dos procesos diseñados para el trefilado de acabado (sin recocidos intermedios). ....	289
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>293</b>
<b>Conclusiones finales.....</b>	<b>293</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>305</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>331</b>
<b>Fundamentos sobre plasticidad aplicados al proceso de estirado.....</b>	<b>331</b>
Figura AI. 1 Tensor de esfuerzos en un elemento diferencial [Rowe, 1972]. ....	333
Figura AI. 2 Charles-Augustine de Coulomb (1136-1806). ....	339
Figura AI. 3 Henri Édouard Tresca (1814-1885). ....	339
Figura AI. 4 Adhémar Jean Claude B. de Saint-Venant (1797-1886) y Maurice Lévy (1838-1810). ....	340
Figura AI. 5 Richard von Mises (1883-1953). ....	340
Figura AI. 6 Esfuerzos en el elemento diferencial de alambre en el estirado [Dieter, 1961].....	341
<b>ANEXO II.....</b>	<b>343</b>
<b>Materiales conformados en el proceso de estirado.....</b>	<b>343</b>
Figura AII. 1 Metales comúnmente empleados en el proceso de estirado (elaboración propia).....	345
Figura AII. 2 Varillas y bobinas de acero ER70-6 para soldadura. ....	346

Figura AII. 3 Barras y tubos del aluminio obtenidos por extrusión y/o estirado.....	349
Figura AII. 4 Conductores y tubos de cobre obtenidos mediante trefilado y estirado secuencial.....	353
Figura AII. 5 Diferentes aplicaciones del alambre de latón.....	354
Figura AII. 6 Tubos de latón extruidos, laminados y conformados mediante estirado.....	354
Figura AII. 7 Barras de latón estruidas y/o laminadas. Piezas torneadas de latón.....	354

### **ANEXO III ..... 359**

#### **Resultados obtenidos en los análisis con *PullWorks*..... 359**

Figura AIII. 1 Diseño del estirado discontinuo del acero ER 70S-6 en <i>PullWorks</i> ( $\Delta=1,20$ ). ....	361
Figura AIII. 2 Parámetros tecnológicos del estirado del acero ER 70S-6 en <i>PullWorks</i> ( $\Delta=1,20$ ). ....	361
Figura AIII. 3 Diseño de la secuencia de estirado del acero ER 70S-6 en <i>PullWorks</i> ( $\Delta=1,20$ ).....	362
Figura AIII. 4 Diseño del estirado discontinuo del acero ER 70S-6 en <i>PullWorks</i> ( $\Delta=1,80$ ). ....	362
Figura AIII. 5 Parámetros tecnológicos del estirado del acero ER 70S-6 en <i>PullWorks</i> ( $\Delta=1,80$ ). ....	362
Figura AIII. 6 Diseño de la secuencia de estirado del acero ER 70S-6 en <i>PullWorks</i> ( $\Delta=1,20$ ).....	362
Figura AIII. 7 Diseño de la secuencia de estirado del cobre ETP para $\mu=0,36$ , $v=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> . ....	363
Figura AIII. 8 Parámetros tecnológicos del estirado secuencial del cobre ETP para $\mu=0,36$ , $v=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> .....	363
Figura AIII. 9 Diseño de la secuencia de estirado del cobre ETP para $\mu=0,36$ , $v=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> . ....	363
Figura AIII. 10 Diseño de la secuencia del estirado del cobre ETP para $\mu=0,21$ , $v=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> . ....	364
Figura AIII. 11 Parámetros tecnológicos del estirado del cobre ETP para $\mu=0,21$ , $v=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> . ....	364
Figura AIII. 12 Diseño de la secuencia del estirado del cobre ETP para $\mu=0,21$ , $v=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> . ....	364
Figura AIII. 13 Diseño de la secuencia de estirado del cobre ETP para $\mu=0,14$ , $v=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> . ....	365
Figura AIII. 14 Parámetros tecnológicos del estirado secuencial del cobre ETP para $\mu=0,14$ , $v=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> . ....	365
Figura AIII. 15 Diseño de la secuencia del estirado del cobre ETP para $\mu=0,14$ , $v=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> . ....	365
Figura AIII. 16 Diseño del estirado del AL 7075-O ( $\mu=0,10$ , $\Delta=2,75$ , sin recocidos intermedios). ....	366
Figura AIII. 17 Parámetros tecnológicos del estirado del AL 7075-O ( $\mu=0,10$ , $\Delta=2,75$ , sin recocidos intermedios). ....	366
Figura AIII. 18 Diseño del estirado del AL 7075-O ( $\mu=0,10$ , $\Delta=2,75$ , sin recocidos intermedios). ....	367
Figura AIII. 19 Diseño del estirado del AL 7075-O ( $\mu=0,10$ , $\Delta=2,30$ , con recocidos intermedios). ....	367

Figura AIII. 20 Parámetros tecnológicos del estirado del AL 7075-O ( $\mu=0,10$ , $\Delta=2,30$ , con recocidos intermedios).....	368
Figura AIII. 21 Diseño del estirado del AL 7075-O ( $\mu=0,10$ , $\Delta=2,30$ , con recocidos intermedios).....	368
Figura AIII. 22 Diseño de la secuencia de trefilado del latón 70-30 ( $\mu=0,12$ , $\Delta=2,50$ , $\alpha=5^\circ$ ). .....	369
Figura AIII. 23 Parámetros tecnológicos del trefilado de latón, $\alpha=5^\circ$ . .....	370
Figura AIII. 24 Diseño de la secuencia de estirado de latón, $\alpha=5^\circ$ . .....	370
Figura AIII. 25 Secuencia de trefilado del latón ( $\mu=0,12$ , $\Delta=2,50$ , $\alpha=8^\circ$ ). .....	371
Figura AIII. 26 Velocidades en el trefilado de latón para $\alpha=8^\circ$ . .....	371
Figura AIII. 27 Parámetros tecnológicos del trefilado de latón para $\alpha=8^\circ$ . .....	372
Figura AIII. 28 Diseño de la secuencia de trefilado de latón, $\alpha=8^\circ$ . .....	372
Figura AIII. 29 Secuencia de trefilado del latón ( $\mu=0,12$ , $\Delta=2,50$ , $\alpha=11^\circ$ ). .....	373
Figura AIII. 30 Diseño de la secuencia de trefilado del latón ( $\mu=0,12$ , $\Delta=2,50$ , $\alpha=11^\circ$ ). .....	373
Figura AIII. 31 Velocidades en el trefilado del latón ( $\mu=0,12$ , $\Delta=2,50$ , $\alpha=11^\circ$ ). .....	374
Figura AIII. 32 Parámetros tecnológicos del trefilado de latón ( $\mu=0,12$ , $\Delta=2,50$ , $\alpha=11^\circ$ ). .....	374

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>39</b>
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>47</b>
Tabla 2.1 Clasificación de los PCDP según los esfuerzos aplicados [DIN 8580:2003].....	49
Tabla 2.2 Semi-ángulos de reducción óptimos para el estirado de aceros [Tschaetsch, 2005]. .....	56
Tabla 2.3 Porcentajes de reducción típicos admisibles en el estirado [Tschaetsch, 2005]. .....	58
Tabla 2.4 Valores del factor $\Delta$ para diversos semi-ángulos y reducciones [Campos et al., 2005]. .....	59
Tabla 2.5 Algunos valores típicos para $\alpha$ y $L_c$ en las hileras de Fort Wayne Die Inc. ....	60
Tabla 2.6 Recubrimientos para herramientas. ....	63
Tabla 2.7 Diversos valores del coeficiente de rozamiento $\mu$ [Schey, 2002]. .....	79
Tabla 2.8 Velocidades de estirado habituales [Tschaetsch, 2005]. .....	82
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>113</b>
Tabla 3.1 Significado de los iconos de la barra de herramientas de <i>PullWorks</i> . ....	146
Tabla 3.2 Código de colores empleado en los botones de <i>PullWorks</i> . ....	146
Tabla 3.3 Diversos software CAD y CAE existentes en el mercado. ....	161
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>167</b>
Tabla 4.1 Propiedades mecánicas del acero para soldadura ER 70S-6, [Celentano et al., 2009]. .....	169
Tabla 4.2 Composición química del acero para soldadura ER 70S-6, [Celentano et al., 2009]. .....	169
Tabla 4.3 Trefilado multi-etapa del acero ER 70S-6 [Rojas et al., 2008] [Celentano et al., 2009]. .....	170
Tabla 4.4 Resultados en el trefilado del acero ER 70S-6, [Rojas et al., 2006]. .....	172
Tabla 4.5 Secuencia de estirado del acero para soldadura ER 70S-6 en 5 etapas ( $\Delta=1,20$ ). .....	172
Tabla 4.6 Valores tecnológicos del estirado del acero ER 70S-6, para $\Delta=1,20$ ( <i>PullWorks</i> ). .....	173
Tabla 4.7 Componentes de $\sigma_e$ en el estirado del acero ER 70S-6, para $\Delta=1,20$ en <i>PullWorks</i> . .....	173
Tabla 4.8 Secuencia de estirado del acero para soldadura ER 70S-6 en 7 etapas ( $\Delta=1,80$ ). .....	174
Tabla 4.9 Parámetros tecnológicos del estirado del acero ER 70S-6, para $\Delta=1,80$ en <i>PullWorks</i> . .....	174
Tabla 4.10 Componentes de $\sigma_e$ en el estirado del acero ER 70S-6, para $\Delta=1,80$ en <i>PullWorks</i> . .....	174
Tabla 4.11 Resultados para el estirado del acero ER 70S-6, $\Delta=1,20$ en <i>Deform2D</i> . .....	176
Tabla 4.12 Resultados para el estirado del acero ER 70S-6, $\Delta=1,80$ en <i>Deform2D</i> . .....	178
Tabla 4.13 Diseño del estirado del acero ER 70S-6 con <i>PullWorks</i> ( $\Delta =2,60$ ). .....	184
Tabla 4.14 Parámetros tecnológicos del estirado del acero ER 70S-6, <i>PullWorks</i> ( $\alpha=6^\circ$ , $\Delta=2,75$ ). .....	184
Tabla 4.15 Propiedades mecánicas Cu-ETP, [ASM International Handbook Committee, 1990]. .....	186
Tabla 4.16 Composición química Cu-ETP, [ASM International Handbook Committee, 1990]. .....	186

Tabla 4.17 Resultados del estudio de A. de P. Lima-Filho, [Lima-Filho, 2003].	187
Tabla 4.18 Diseño del estirado secuencial del cobre, $\mu=0,36$ , $v_f=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ ( <i>PullWorks</i> ). ...	188
Tabla 4.19 Parámetros tecnológicos del estirado del cobre ETP para $\mu=0,36$ , $v_f=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> .	188
Tabla 4.20 Componentes de $\sigma_e$ en el estirado del cobre ETP para $\mu=0,36$ , $v_f=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> .	189
Tabla 4.21 Datos del diseño de la secuencia de estirado del cobre ETP para $\mu=0,21$ , $v_f=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> .	189
Tabla 4.22 Parámetros del trefilado del cobre ETP para $\mu=0,21$ , $v_f=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> ...	190
Tabla 4.23 Componentes de $\sigma_e$ en el estirado del cobre ETP para $\mu=0,21$ , $v_f=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> .	190
Tabla 4.24 Secuencia de estirado del Cu-ETP para $\mu=0,14$ , $v_f=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ en <i>PullWorks</i> .	191
Tabla 4.26 Componentes de $\sigma_e$ , estirado de Cu-ETP ( $\mu=0,14$ , $v_f=0,078$ m/s, $\Delta=2,40$ , <i>PullWorks</i> ).	192
Tabla 4.27 Resultados para el estirado del cobre C11000-O para $\mu=0,36$ , $v_f=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ con <i>Deform2D</i> .	193
Tabla 4.28 Resultados para el estirado del cobre C11000-O para $\mu=0,21$ , $v_f=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ con <i>Deform2D</i> .	195
Tabla 4.29 Resultados para el estirado del cobre C11000-O para $\mu=0,14$ , $v_f=0,078$ m/s y $\Delta=2,40$ con <i>Deform2D</i> .	197
Tabla 4.30 Propiedades mecánicas AW 7075-O, [ASM Intern. Handbook Committee, 1990].	205
Tabla 4.31 Composición química AL 7075-O, [ASM Intern. Handbook Committee, 1990].	205
Tabla 4.32 Diseño de la secuencia con recocidos intermedios [Sebastián M. A., 2010].	206
Tabla 4.33 Diseño de la secuencia sin recocidos intermedios [Sebastián M. A., 2010].	206
Tabla 4.34 Diseño de la secuencia de estirado del AW 7075-O con <i>PullWorks</i> ( $\mu=0,10$ , $\Delta=2,75$ ).	207
Tabla 4.35 Parámetros tecnológicos del estirado del AW 7075-O, <i>PullWorks</i> ( $\mu=0,10$ , $\Delta=2,75$ ).	208
Tabla 4.36 Componentes de $\sigma_e$ en el estirado del AW 7075-O, <i>PullWorks</i> ( $\mu=0,10$ , $\Delta=2,75$ ).	208
Tabla 4.37 Diseño de la secuencia de estirado del AW 7075-O con <i>PullWorks</i> ( $\mu=0,10$ , $\Delta=2,30$ ).	209
Tabla 4.38 Parámetros tecnológicos del estirado del AW 7075-O, <i>PullWorks</i> ( $\mu=0,10$ , $\Delta=2,30$ ).	210
Tabla 4.39 Componentes de $\sigma_e$ en el estirado del AW 7075-O, <i>PullWorks</i> ( $\mu=0,10$ , $\Delta=2,30$ ).	211
Tabla 4.40 Resultados para el estirado del AW 7075-O con <i>Deform2D</i> para $\Delta=2,75$ , $\mu=0,10$ .	212
Tabla 4.41 Resultados para el estirado del AW 7075-O con <i>Deform2D</i> , ( $\Delta=2,30$ , $\mu=0,10$ ).	214
Tabla 4.42 Propiedades mecánicas C26000, [ASM International Handbook Committee, 1990].	221
Tabla 4.43 Composición química C26000, [ASM International Handbook Committee, 1990].	221
Tabla 4.44 Diseño de la secuencia sin recocidos intermedios, [Sebastián, 2010].	222
Tabla 4.45 Secuencia completa del trefilado del latón ( $\mu=0,12$ , $\Delta=2,50$ , $\alpha=5^\circ$ ).	224
Tabla 4.46 Parámetros tecnológicos del trefilado del latón ( $\mu=0,12$ , $\Delta=2,50$ , $\alpha=5^\circ$ ).	225

Tabla 4.47 Componentes de $\sigma_e$ en el trefilado del latón ( $\mu=0,12, \Delta=2,50, \alpha=5^\circ$ ).....	226
Tabla 4.48 Secuencia completa del trefilado del latón ( $\mu=0,12, \Delta=2,50, \alpha=8^\circ$ ). .....	227
Tabla 4.49 Parámetros tecnológicos del trefilado del latón ( $\mu=0,12, \Delta=2,50, \alpha=8^\circ$ ). .....	227
Tabla 4.50 Componentes de $\sigma_e$ en el trefilado del latón ( $\mu=0,12, \Delta=2,50, \alpha=8^\circ$ ).....	228
Tabla 4.51 Secuencia completa del trefilado del latón ( $\mu=0,12, \Delta=2,50, \alpha=11^\circ$ ). .....	229
Tabla 4.52 Parámetros tecnológicos, trefilado del latón ( $\mu=0,12, \Delta=2,50, \alpha=11^\circ$ ). .....	229
Tabla 4.53 Componentes de $\sigma_e$ en el trefilado del latón ( $\mu=0,12, \Delta=2,50, \alpha=11^\circ$ ).....	230
Tabla 4.54 Resultados obtenidos para el trefilado del latón ( <i>Deform2D</i> , $\Delta=2,50, \mu=0,12, \alpha=8^\circ$ ). .....	232
Tabla 4.55 Resultados obtenidos para el trefilado del latón ( <i>Deform2D</i> , $\Delta=2,50, \mu=0,12, \alpha=11^\circ$ ). ....	235
Tabla 4.56 Secuencias en el desbaste mono-filar <i>Niehoff M85 (Cunext Copper Industries S.L.)</i> .....	246
Tabla 4.57 Secuencia de trefilado de desbaste del cobre ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ). .....	247
Tabla 4.58 Gama de producto mono-filar trefilado de cobre ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ).....	249
Tabla 4.59-1 Secuencias en el acabado multi-filar en la trefiladora <i>Sictra (Cunext Copper Industries S.L.)</i> . .....	250
Tabla 4.59-2 Secuencias en el acabado multi-filar en la trefiladora <i>Sictra</i> , continuación ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ). .....	251
Tabla 4.60 Secuencia de trefilado de acabado del cobre ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ).....	251
Tabla 4.61 Valores obtenidos para $\sigma_{UTS}$ en el ensayo de tracción del Cu-ETP1 trefilado. ....	255
Tabla 4.62 Valores obtenidos para $\sigma_y$ en el ensayo de tracción del Cu-ETP1 trefilado.....	255
Tabla 4.63 Propiedades mecánicas Cu-ETP1 obtenido en la colada continua Contirod de la empresa <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> [Walcovicz, 2012]. .....	258
Tabla 4.64 Composición química del cobre Cu-ETP1 C11000, [Fujiwara et al., 1993]. .....	258
Tabla 4.65 Condiciones tribológicas para trefilado de cobre [Wright, 2011].....	258
Tabla 4.66 Caracterización geométrica del trefilado de desbaste del Cu-ETP1 de <i>Cunext</i> . .....	260
Tabla 4.67 Resumen de las variables de entrada en <i>PullWorks</i> para el proceso de trefilado en desbaste del Cu-ETP1 ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ). .....	261
Tabla 4.68 Caracterización geométrica del trefilado de desbaste del Cu-ETP1, <i>PullWorks</i> . .....	262
Tabla 4.69 Datos tecnológicos del trefilado de desbaste diseñado con <i>PullWorks</i> para <i>Cunext</i> . .....	262
Tabla 4.70 Componentes de $\sigma_e$ trefilado de desbaste diseñado con <i>PullWorks</i> para <i>Cunext</i> . .....	264
Tabla 4.71 Resumen de las variables de entrada en <i>PullWorks</i> para el proceso de trefilado gemelo del desbaste del Cu-ETP1 ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ). .....	264
Tabla 4.72 Caracterización geométrica del trefilado alternativo del proceso secuencial de desbaste del Cu-ETP1 obtenida con <i>PullWorks</i> ( $\alpha$ variable). .....	265
Tabla 4.73 Datos tecnológicos del trefilado alternativo de desbaste diseñado con <i>PullWorks</i> para <i>Cunext</i> ( $\alpha$ variable). .....	266
Tabla 4.74 Componentes de $\sigma_e$ trefilado alternativo de desbaste diseñado con <i>PullWorks</i> para <i>Cunext</i> ( $\alpha$ variable). .....	266

Tabla 4.75 Resumen de las variables de entrada en <i>PullWorks</i> para el proceso de trefilado optimizado para desbaste del Cu-ETP1 ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ).....	268
Tabla 4.76 Caracterización geométrica del trefilado optimizado del proceso secuencial de desbaste del Cu-ETP1 obtenida con <i>PullWorks</i> .....	268
Tabla 4.77 Parámetros tecnológicos del trefilado optimizado del Cu-ETP ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ).....	269
Tabla 4.78 Resultados del MEF aplicado al proceso de desbaste ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> )....	270
Tabla 4.79 Resultados de la simulación del proceso optimizado de desbaste ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ).....	272
Tabla 4.80 Inputs para el trefilado/acabado del Cu-ETP1 ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ).....	273
Tabla 4.81 Secuencia de trefilado de acabado del cobre obtenida con <i>PullWorks</i> ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ).....	274
Tabla 4.82 Datos tecnológicos del trefilado de acabado diseñado con <i>PullWorks</i> para <i>Cunext</i> .....	276
Tabla 4.83 Componentes de $\sigma_e$ trefilado de acabado diseñado con <i>PullWorks</i> para <i>Cunext</i> .....	278
Tabla 4.84 Inputs para el trefilado/acabado del Cu-ETP1 ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ).....	279
Tabla 4.85 Propuesta optimizada con <i>PullWorks</i> (trefilado acabado, <i>Cunext Copper Ind. S.L.</i> ).....	280
Tabla 4.86 Parámetros tecnológicos del trefilado optimizado de acabado ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> ).....	281
Tabla 4.87 Resultados de la simulación del proceso de acabado ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> )....	283
Tabla 4.88 Resultados de la simulación del proceso de acabado ( <i>Cunext Copper Industries S.L.</i> )....	285

**CAPÍTULO 5 .....293**

**REFERENCIAS.....305**

**ANEXO I.....331**

**ANEXO II.....343**

Tabla AII. 1 Acero para soldadura. Ficha técnica.....	347
Tabla AII. 2 Aluminio AW 7075-O. Ficha técnica.....	351
Tabla AII. 3 Cobre electrolítico ETP. Ficha técnica.....	355
Tabla AII. 4 Latón 70/30. Ficha técnica.....	357

**ANEXO III.....359**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## NOMENCLATURA

---



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## ***Nomenclatura***

---

$\alpha$	semi-ángulo de la hilera o herramienta de estirado
$L_c$	Longitud de calibración en la hilera o herramienta de estirado
$Rh$	Radio de transición del cono a la zona de calibración de la hilera
$\Delta$	factor delta o factor de forma de la herramienta de estirado
$\Delta_{opt}$	factor delta óptimo o factor de forma óptimo de la herramienta de estirado
$\beta$	semi-ángulo de entrada o embocadura en la hilera de estirado
$\gamma$	semi-ángulo de salida en la hilera de estirado
$\sigma$	Tensión
$\sigma_1$	Tensión principal en la dirección X
$\sigma_2$	Tensión principal en la dirección Y
$\sigma_x$	Tensión de estirado
$B$	constante = $\mu/\tan\alpha$
$\sigma_e$	Tensión de estirado
$\sigma_{zb}$	Tensión en la dirección del estirado
$\sigma_{di}$	Tensión debida a la distorsión interna del material conformado
$\sigma_{bp}$	Tensión de retroceso en el estirado
$\sigma_{dh}$	Tensión debida a la deformación homogénea del material conformado
$\sigma_{roz}$	Tensión debida al efecto del rozamiento en la interfase
$\sigma_{cal}$	Tensión producida por el rozamiento en la zona de calibración
$\sigma_Y$	Tensión de fluencia
$\sigma_{UTS}$	Tensión de rotura
$Rm$	Tensión de rotura
$UTS$	Tensión de rotura o Ultimate Tensile Strength
$\mu_b$	rozamiento en la bobina de tensión de retroceso
$n_b$	número de vueltas en la bobina de tensión de retroceso
$Y$	Tensión de fluencia
$Y_0$	Tensión de fluencia inicial de un material en estado recocido
$\bar{Y}$	Tensión de fluencia media en la zona de deformación o interfase
$Y_\epsilon$	Tensión de fluencia para un estado de deformación $\epsilon$
$\bar{Y}_\epsilon$	Tensión de fluencia media en la interfase para un estado de deformación $\epsilon$

## ***Nomenclatura***

---

<b><math>Y_f</math></b>	Tensión de fluencia a la salida de la herramienta
<b><math>C</math></b>	Coefficiente de resistencia a la deformación plástica en frío
<b><math>n</math></b>	Coefficiente de endurecimiento por deformación plástica en frío
<b><math>\epsilon</math></b>	Deformación efectiva
<b><math>\epsilon_0</math></b>	Deformación efectiva inicial
<b><math>\epsilon_1</math></b>	Deformación efectiva al final de la primera etapa de estirado
<b><math>\epsilon_f</math></b>	Deformación efectiva final
<b><math>\Delta\epsilon</math></b>	Incremento de deformación efectiva
<b><math>\mu</math></b>	Coefficiente de rozamiento
<b><math>\mu_{\text{máx}}</math></b>	Coefficiente de rozamiento en condiciones de adherencia total o máxima
<b><math>m</math></b>	factor de fricción o factor de lubricidad del sistema tribológico
<b><math>\tau</math></b>	Tensión tangencial
<b><math>k</math></b>	Límite de fluencia por cizalladura
<b><math>p</math></b>	presión
<b><math>L</math></b>	Longitud de contacto en la hilera de estirado
<b><math>d_0</math></b>	diámetro inicial del material a estirar
<b><math>d_f</math></b>	diámetro final del material estirado
<b><math>d_e</math></b>	diámetro de entrada o embocadura de la hilera de estirado
<b><math>d_s</math></b>	diámetro de salida de la hilera de estirado
<b><math>d_m</math></b>	diámetro medio
<b><math>r</math></b>	ratio de estirado
<b><math>\varphi</math></b>	trabajo redundante
<b><math>l</math></b>	longitud
<b>%EL</b>	porcentaje de elongación del producto estirado
<b><math>l_0</math></b>	Longitud inicial
<b><math>l_1</math></b>	Longitud final tras la etapa primera
<b><math>l_f</math></b>	longitud final
<b><math>\Delta l</math></b>	Incremento de longitud del producto estirado
<b><math>A</math></b>	Área de la sección transversal del producto estirado
<b>CW%</b>	Porcentaje de deformación en frío aplicada
<b><math>V</math></b>	Volumen

## ***Nomenclatura***

---

<b><i>W</i></b>	Trabajo efectivo
<b><math>\Delta W</math></b>	Incremento del trabajo
<b><math>W_H</math></b>	Trabajo originado por la deformación homogénea
<b><math>W_F</math></b>	Trabajo originado por el efecto del rozamiento
<b><math>W_R</math></b>	Trabajo adicional originado por la distorsión interna del material deformado
<b><math>W_T</math></b>	Trabajo total del proceso
<b>HB</b>	Dureza Brinell
<b>HV</b>	Dureza Vickers
<b><i>v</i></b>	velocidad de estirado
<b><math>v_0</math></b>	velocidad inicial a la entrada de la hilera de estirado
<b><math>v_f</math></b>	velocidad final a la salida de la hilera de estirado o velocidad de estirado
<b><i>F</i></b>	Fuerza de estirado
<b><i>P</i></b>	Potencia necesaria para el estirado
<b><i>Rs</i></b>	Reducción de sección
<b><math>\%Rs</math></b>	Porcentaje de reducción de sección por etapa de estirado
<b><math>\Delta\%Rs</math></b>	Incremento del porcentaje de reducción de sección por etapa de estirado
<b>Rec.</b>	Recocido



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## CAPÍTULO 1

### Introducción y generalidades

---



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

### **1.1 Introducción**

Aunque aún hoy no se conoce con exactitud el verdadero origen cronológico de la metalurgia, es evidente que esta ciencia y su evolución han condicionado de manera notable el progreso del hombre y de la sociedad en la cual vivimos, hasta tal punto en que su nacimiento supuso un importantísimo punto de inflexión a partir del cual la humanidad se desarrolló de manera exponencial.

En la llamada edad del cobre, allá por el Neolítico unos 4000 años a.C., el hombre comenzó a fabricar herramientas y armas que, con la mejora de la técnica, alcanzaban una calidad nunca conocida. Este imparable avance lo hizo mejor cazador y mucho más eficiente en su agricultura, convirtiéndolo en habitante sedentario capaz de modelar y adaptar el lugar donde vivía a sus necesidades. Las técnicas de fundición y conformado por deformación plástica se habían comenzado a utilizar y hacían posible dar forma a armas, utensilios domésticos y herramientas a golpes, mediante técnicas de martilleado. Poco tiempo después el hombre fue capaz de fundir estos metales y experimentar con las aleaciones, dando lugar al descubrimiento del bronce.

La evolución constante en estos conocimientos metalúrgicos, gracias a la experiencia, dio lugar a nuevos métodos que permitieron obtener de la naturaleza metales como el hierro, metal cuyas características implicaron la necesidad de mejoras y avances en las técnicas de transformación utilizadas y que fue el símbolo del inicio de una nueva era.

El desarrollo de la metalurgia y de la tecnología, desde entonces hasta nuestros tiempos, ha ayudado a la humanidad a alcanzar importantes metas: la expansión territorial es un hecho sin límites, los viajes son posibles a lo largo y ancho del mundo, incluso fuera de la estratosfera, y la mejora en la calidad de vida del ser humano no ha dejado de incrementarse sin límite hasta nuestros días gracias, en gran parte, a la tecnología y la ciencia de los metales.

Algunos de los principales sectores de la industria actual tales como la construcción civil, la construcción de infraestructuras, la industria automovilística, aeronáutica, aeronaval, ferrocarril, la industria eléctrica, armamentística, la construcción de maquinaria industrial y un largo etcétera de subsectores dependientes de estos, fundamentan su desarrollo directa o indirectamente en las técnicas metalúrgicas y, en gran medida, en las basadas en el conformado plástico de los metales.

Hoy en día la metalurgia y las técnicas de conformado de los metales están presentes, directa o indirectamente, en todos los ámbitos de nuestra vida cotidiana. Una gran diversidad de aparatos y utensilios que utilizamos, así como multitud de elementos que constituyen nuestro entorno y nos hacen la vida más fácil, han sido creados gracias a esta ciencia que continúa evolucionando asentada en la investigación y la tecnología, propiciando el imparable desarrollo y crecimiento de la humanidad.

Aunque nuestra sociedad tecnológica se esmera en encontrar alternativas a los metales con los nuevos materiales, los supermateriales o los materiales compuestos, seguimos viviendo una gran dependencia de aquellos y, por tanto, los avances en las técnicas y tecnologías para su transformación son de gran importancia.

El desarrollo tecnológico de las últimas décadas ha transformado los procesos y técnicas de conformado por deformación plástica de los metales hasta el punto de convertirlos en los procesos de mayor eficiencia y rendimiento en el ámbito de la ingeniería de fabricación. La tecnología ha permitido depurar la ejecución de los procesos de conformado de manera que hoy en día es posible fabricar gran diversidad de formas y productos con una gran eficiencia y productividad.

La gran importancia que este tipo de técnicas sigue teniendo para el desarrollo de nuestra sociedad se ve reflejada en ejemplos tales como la producción de los cables eléctricos, que permiten el transporte de la electricidad además de desarrollar máquinas y aparatos cada vez más sofisticados y eficientes, o en la capacidad que este tipo de procesos tiene para conferir al acero y a otros metales las propiedades mecánicas más adecuadas a cada aplicación, lo cual ha permitido construir desde edificios cada vez más altos y colosales puentes o estructuras, hasta pequeños supercomputadores e incluso robots con inteligencia artificial.

Existen diversos procesos enmarcados actualmente en el ámbito del conformado por deformación plástica. Laminado, estampado, forja, acuñado, embutición y extrusión han sido y siguen siendo técnicas de conformado fundamentales en la industria moderna, si bien el estirado es el proceso de conformado que se trata en esta tesis.

Estirado es aquel proceso de conformado por deformación plástica que consiste en estirar una barra, varilla o alambre metálico con el objetivo de aumentar su longitud, reduciendo su sección de manera uniforme, obteniendo un determinado acabado superficial y consiguiendo unas determinadas propiedades mecánicas en el material conformado que serán adecuadas para su posterior aplicación o uso.

La técnica de estirado se utiliza para obtener barras, tubos o alambre metálico y permite fabricar las vigas de acero sustentan nuestros edificios, las “autopistas” de cobre que hacen posible iluminar las ciudades o las kilométricas conducciones que permiten el transporte de los hidrocarburos.

Actualmente existen tecnologías, máquinas y herramientas de estirado muy bien desarrolladas, además de sistemas avanzados que permiten conocer perfectamente las condiciones óptimas para el proceso. Sin embargo, la dificultad está en que se trata de un proceso que debe ser realizado, generalmente, en varias etapas sucesivas dando lugar a un proceso secuencial de estirado multi-etapa. Esta característica hace que la presente propuesta de una nueva metodología que permita diseñar de forma óptima

un proceso secuencial de estas características, tenga especial interés por tratarse de una herramienta que facilita la viabilidad tecnológica y eficiencia técnica del proceso.

### **1.2 Objetivo de la tesis**

El principal objetivo de esta tesis doctoral ha sido el desarrollo de una nueva metodología, implementada en una aplicación o sistema informático que ha servido como herramienta para poder realizar, de una manera precisa y sencilla, el estudio analítico del proceso de estirado secuencial.

La nueva metodología a desarrollar debe permitir el diseño óptimo de la secuencia de etapas en la que se constituye el proceso de estirado multi-etapa y el correspondiente análisis de los valores establecidos y/u obtenidos para cada una de las variables y parámetros tecnológicos implicados en el proceso. El sistema debe facilitar al usuario toda la información necesaria para poder evaluar la viabilidad técnica y la eficiencia del proceso diseñado, permitiendo la optimización del mismo.

Un objetivo paralelo e inherente al desarrollo de la mencionada metodología ha consistido en la determinación del alcance y las limitaciones de la nueva propuesta aplicada al diseño y análisis del proceso de estirado secuencial multi-etapa. La verificación del buen funcionamiento del sistema y la valoración de su viabilidad se plantea en base al estudio y análisis de una serie de casos representativos del proceso secuencial de estirado multi-etapa. La evaluación se complementará con un estudio comparativo de los resultados con aquellos obtenidos mediante otros métodos alternativos, así como con los obtenidos en estudios realizados por otros autores. Para finalizar se ha realizado un estudio de aplicación de la metodología propuesta al proceso de trefilado industrial que se realiza en la empresa Cordobesa *Cunext Copper Industries S.L.*, estudio mediante el que se ha conseguido mejorar el diseño de algunos de los procesos que se llevan a cabo en esta empresa.

### **1.3 Estructura de la memoria**

Tal y como se ha referido anteriormente como principal objetivo, la presente tesis pretende el desarrollo de una metodología mediante de la cual es posible realizar el estudio completo del proceso secuencial de estirado multi-etapa en base a criterios analíticos.

Los pilares fundamentales de la metodología desarrollada se apoyan en las bases de la teoría de la plasticidad y en los principales fundamentos que describen el fenómeno de rozamiento como complemento del método analítico elegido para el desarrollo de la propuesta que nos ocupa, método del cual se hablará más adelante.

La presente memoria se ha estructurado en capítulos, en los que se presenta todo el trabajo de esta tesis de manera ordenada. El texto comienza con la introducción al

ámbito del trabajo realizado, continuando con la exposición de los principales objetivos que se pretenden. En el estado del arte se incluye un amplio documento con los principales hitos y antecedentes que constituyen el punto de partida de todo lo desarrollado posteriormente en esta nueva propuesta.

La parte central de esta memoria muestra el desarrollo analítico de la metodología sugerida y se describe el sistema informático en el cual ésta ha sido implementada, resolviendo una batería de ejemplos de aplicación en base a procesos de estirado multi-etapa correspondientes a diversos estudios realizados por varios autores y mediante los cuales se ha verificado el buen funcionamiento del sistema informático, así como la fiabilidad de la metodología en base al análisis de los resultados obtenidos.

Se ha completado el trabajo de aplicación mediante un amplio estudio del proceso productivo de trefilado de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*, ubicada en la ciudad de Córdoba, cuya actividad principal es la transformación del cobre.

La reflexión final se presenta en un capítulo especial, capítulo en el cual se desglosan todas las conclusiones realizadas al final del presente trabajo, a nivel particular y general. En referencia a concreciones observadas en cada uno de los diferentes casos de aplicación desarrollados y a detalles observados a partir de los resultados obtenidos, en este capítulo se presentan una serie de conclusiones particulares. Las conclusiones generales aluden aspectos fundamentales observados de los resultados de todos los estudios realizados, para la evaluación de funcionalidad y sensibilidad en la metodología aplicada.

La memoria se estructura en cinco capítulos y tres anexos en los que se han abordado los siguientes aspectos concretos:

- El presente capítulo o capítulo inicial elucida la correspondiente introducción para, acto seguido, exponer los objetivos y describir la estructura de esta memoria.
- En un segundo capítulo se pretende una exposición amplia del estado actual en cuanto a los conocimientos y avances existentes sobre el proceso de estirado. Se exponen los aspectos teóricos y tecnológicos del estirado, de aplicación en la metodología propuesta, en su contexto más actualizado: la técnica, los elementos que intervienen, los fundamentos y los factores de influencia del proceso. Este capítulo finaliza con un texto cronológico que conduce hasta los más recientes antecedentes sobre el estudio y análisis aplicado a un proceso de estirado secuencial multi-etapa.
- El tercer capítulo incluye una visión general de la metodología que se pretende aplicar, justificando la propuesta desde los puntos de vista técnico e investigador y describiendo detalladamente del desarrollo de la misma.

- En el cuarto se presenta la aplicación de la metodología a una serie de casos reales del proceso secuencial de estirado multi-etapa. Se pretende el análisis comparativo que conducirá a la evaluación del funcionamiento del sistema y la aplicabilidad y sensibilidad de la metodología propuesta en esta tesis. Además, se presenta un completo estudio de aplicación a algunos de los procesos de trefilado industrial de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*, así como las correspondientes propuestas de mejora de éstos y sus diseños obtenidos con la aplicación propuesta en este trabajo.
- El capítulo final identifica las conclusiones particulares y generales que se originan del análisis de dichos resultados. Finalmente se proponen las posibilidades que resultan de este trabajo para futuras investigaciones.

A la conclusión de los cinco capítulos principales que constituyen el núcleo de esta memoria se ha considerado necesario incluir una serie de tres anexos. En éstos se exponen fundamentos considerados en la metodología, cierta información técnica sobre los materiales estudiados y tablas gráficas mediante las que se justifican los resultados obtenidos con el software desarrollado.

Esta información, adicional pero necesaria, complementa el trabajo central, pero se presenta a parte para evitar cualquier confusión y no desviar la atención del lector, que debe estar concentrada en la propuesta y objetivos principales de esta tesis.

- En el primer anexo se describen las bases fundamentales sobre la teoría de la plasticidad aplicada en procesos de conformado por deformación plástica. Se trata de una serie de leyes y criterios fundamentales indispensables que se engloban dentro de las condiciones bajo las cuales se ha realizado el estudio analítico del proceso de estirado, así como otros muchos procesos de conformado por deformación plástica.
- El anexo segundo reúne toda la información a cerca de aquellos metales y aleaciones que son comúnmente utilizados como materia prima en el proceso de estirado: aceros, aleaciones de aluminio y aleaciones de cobre. En este apartado se pretende caracterizar, de una forma completa, cada uno de los materiales seleccionados para los distintos casos del proceso que han sido sometidos a estudio, indicando el pre-procesado, las características, las propiedades mecánicas, la designación normalizada y las aplicaciones de cada uno de los metales y aleaciones estudiadas.
- En el anexo tercero se presentan, a modo de justificación, las imágenes correspondientes a los resultados obtenidos de cada uno de los diferentes casos y supuestos, diseñados y analizados con la aplicación desarrollada para tal fin, denominada *PullWorks*, y en la cual se implementa la metodología.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## CAPÍTULO 2

### El proceso de estirado multi-etapa: marco teórico y estado del arte

---



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## **2.1 Procesos de conformado por deformación plástica (PCDP)**

Los procesos de conformado por deformación plástica o PCDP son aquellos procesos industriales en los que el material a transformar es sometido a la acción de esfuerzos por encima de su límite elástico o límite de fluencia, de manera que es posible conseguir una deformación controlada y permanente en el material transformado.

Estos procesos se pueden clasificar de diferentes formas atendiendo a diversos criterios o características.

### **2.1.1 Clasificación de los PCDP según la temperatura del proceso**

El conformado plástico en caliente se aplica a materiales que son difíciles de conformar en frío, con el fin de conseguir aumentar su ratio de deformación plástica mediante la aplicación de temperatura. También se aplica en los materiales que admiten un alto grado de deformación, ya que al aplicar grandes ratios de deformación en frío pueden aparecer defectos en el material transformado y la aplicación de temperatura evita la aparición de estos defectos. Es habitual aplicar el conformado plástico a altas temperaturas cuando la geometría de la barra o pieza es compleja, ya que la temperatura facilita en sobremanera el flujo del material.

El conformado plástico en frío se aplica generalmente en materiales con una ratio de deformación normal, aunque también se puede aplicar cuando la ratio de deformación es baja, con el fin de conseguir determinadas características de acabado o propiedades mecánicas concretas en el material transformado.

### **2.1.2 Clasificación de los PCDP según la naturaleza de los esfuerzos aplicados**

Se denominan procesos de conformado por deformación plástica (PCDP) a aquellos procedimientos que, aprovechando la plasticidad o ductilidad de los metales, permiten modificar la forma o las dimensiones de una pieza mediante la aplicación de las fuerzas externas de manera adecuada. [Martín F., 2012].

El Instituto Alemán de Normalización (*Deutsches Institut für Normung*), que clasifica los diferentes procesos de fabricación [DIN 8580:2003], agrupa los PCDP en función del tipo de esfuerzo o esfuerzos necesarios para conseguir el conformado plástico del material, tal y como se muestra a continuación en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Clasificación de los PCDP según los esfuerzos aplicados [DIN 8580:2003].

<b>DIN 8583</b>	<b>DIN 8584</b>	<b>DIN 8585</b>	<b>DIN 8586</b>	<b>DIN 8587</b>
Compresión	Tracción + Compresión	Tracción	Doblado	Cizallado
Extrusión	Embutición	Estirado de chapa	De barras	Troquelado Torsión
Laminación	Estirado		De tubos	
Estampación	Trefilado		De chapa	

## **2.2 Proceso de estirado**

El proceso de estirado consiste en provocar una reducción de la sección inicial de una pieza alargada, que puede ser una barra, un tubo o un alambre o hilo metálico tal y como se muestra en la Figura 2.1, con el objetivo de obtener una pieza conservando la misma forma en su sección pero con una reducción en el área de la misma, lo que implicará una mayor longitud de la pieza obtenida [Davis et al., 1988].

En el proceso de estirado se hace pasar la pieza por una matriz cuyo orificio es convergente, partiendo en una sección inicial y terminando en la sección final que se desea conseguir, mediante la acción directa de una fuerza de tracción aplicada a la pieza en su extremo, que inicialmente está a la salida de la matriz.

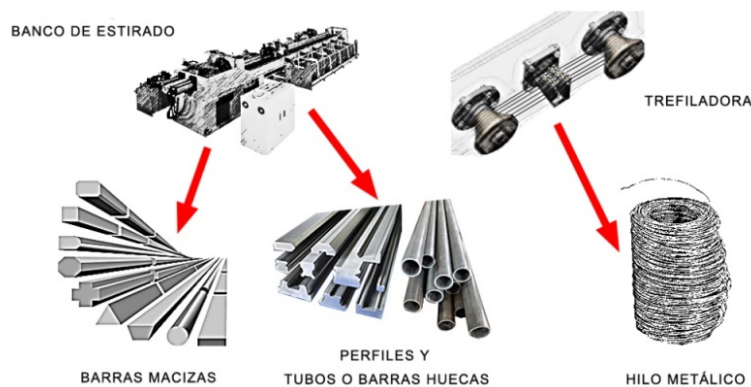


Figura 2.1 Variantes del proceso de estirado (elaboración propia).

## **2.3 Fundamentos del proceso de estirado**

Como se mencionó anteriormente, el estirado es una técnica mediante la cual la sección transversal de una barra, varilla o alambre se ve reducida al hacer pasar el material a través de la abertura de la hilera o matriz mediante la aplicación de una fuerza de tracción en el extremo de dicha barra, varilla o alambre (véase Figura 2.2).

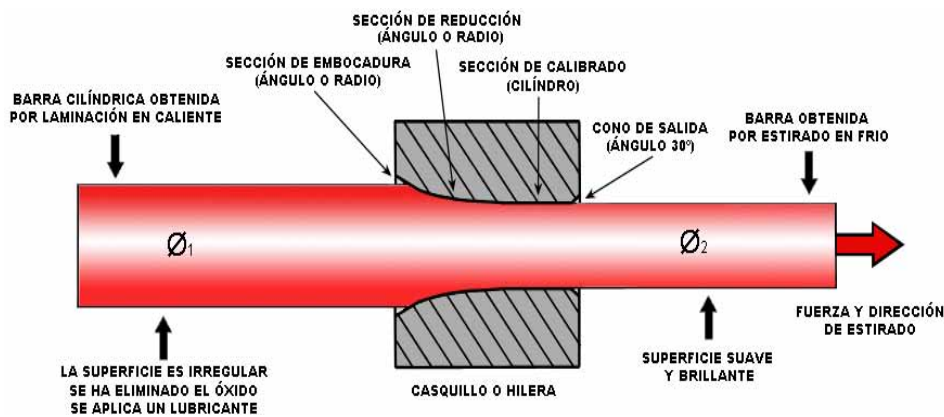


Figura 2.2 Estirado de barras, alambre o hilo metálico (elaboración propia).

Una variante técnica del proceso de estirado es el estirado de tubos huecos, aunque el presente trabajo se centrará en el análisis del proceso de estirado de elementos macizos, tal como se ha especificado en el párrafo anterior.

La diferencia fundamental que existe entre el estirado de barras y el estirado de alambre es el rango de diámetros del material procesado en cada caso. El estirado de barras es el proceso que se aplica a los diámetros más grandes, mientras que el estirado de alambre o hilo metálico es el que se emplea para obtener diámetros pequeños. En el estirado de alambres o hilo metálico se pueden llegar a alcanzar diámetros de hasta 0,03 mm.

La técnica empleada en el estirado de barras y en el estirado de alambres o hilo metálico es exactamente la misma, pero el equipo y la terminología empleados difieren en gran medida. El estirado de alambre o hilo metálico se denomina trefilado.

El estirado de barras se realiza generalmente como una operación de estirado de una sola etapa y, debido a que la sección de la barra es relativamente grande, la forma del material estirado es recta y rígida, mientras que en el caso del trefilado de alambre, al ser el diámetro relativamente pequeño, es posible enrollar el material en bobinas. Este aspecto va a limitar la longitud barra que se puede procesar en el primer caso, mientras que en el segundo va a ser posible procesar grandes longitudes de alambre.

El proceso de estirado se aplica para obtener una sección final determinada en una barra o alambre o con el fin de calibrar su sección final con precisión, pero además permite conseguir unas determinadas características mecánicas aprovechando el fenómeno de endurecimiento por deformación del material durante el proceso de conformado. En determinados casos va a interesar emplear unos parámetros de proceso que permitan obtener un grado de dureza y resistencia al desgaste, así como otras propiedades apropiadas para elementos de máquinas y elementos estructurales, mientras que en otros casos se emplearán parámetros de proceso mediante los cuales se obtiene un producto con una serie de características determinadas para facilitar trabajos posteriores, como es el caso del estirado de barras destinadas al mecanizado.

En el trefilado se emplean una serie de hileras o dados de estirado para conseguir una reducción progresiva de la sección del alambre, de tal manera que es posible hablar de un proceso verdaderamente continuo en el estirado. Sin embargo, esto no es factible cuando se trata de estirar barras de gran sección, hasta alcanzar una sección final notablemente inferior a la inicial, en cuyo caso será necesario aplicar a la barra una sucesión de operaciones de estirado hasta alcanzar dicho diámetro final.

Cuando en adelante se hable de estirado multi-etapa o estirado secuencial, se hará referencia a aquel proceso de estirado a partir de una sección inicial de una barra hasta conseguir la sección final deseada aplicando dos o más operaciones de estirado simples de manera consecutiva y en cada una de las cuales se empleará una hilera o

matriz de sección menor que aquel que se haya empleado en la operación o etapa inmediatamente anterior. Este será concretamente el proceso objeto de estudio y análisis en el presente trabajo.

### **2.3.1 Proceso de estirado de barras de sección circular**

Mediante la máquina denominada banco de estirado se hace pasar la materia prima, que generalmente es una barra obtenida mediante técnicas de laminación en caliente, a través de la matriz o hilera de estirado aplicando la fuerza de tracción suficiente en su extremo, de manera que se consigue un aumento de la longitud además de reducir y transformar su sección transversal. Esta transformación se realiza habitualmente en frío, con lo cual las propiedades mecánicas del material se van a ver alteradas.

Se trata de un proceso que se aplica a la transformación de barras rectas cuyo diámetro oscila generalmente entre los 500 mm y los 10 mm, siendo este rango distinto en función de las propiedades de cada material.

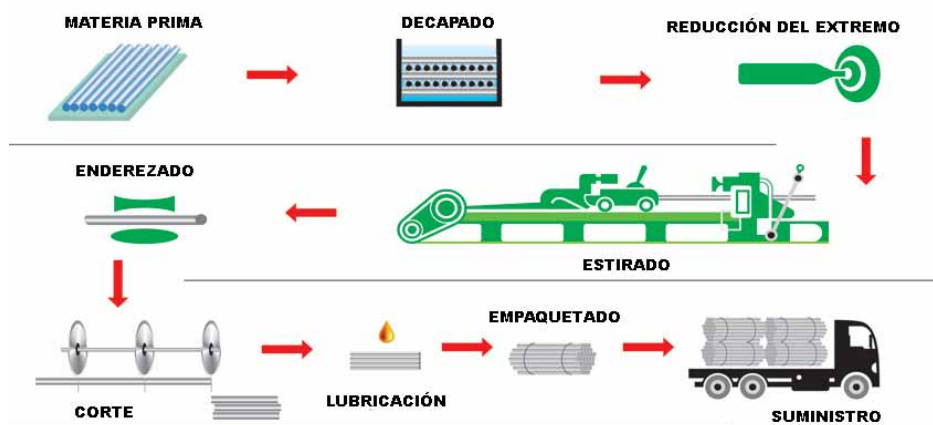


Figura 2.3 Proceso de producción de barras estiradas en Suresh Steel Tubes Pvt. Ltd.

(<http://sst-india.com/process/bright-bars/>, 2016).

El proceso industrial, mostrado en la Figura 2.3, se inicia partiendo de material en bruto con forma de barra que generalmente ha sido obtenido mediante un proceso de laminación o extrusión en caliente, el cual le confiere una estructura y unas propiedades mecánicas aptas para su posterior conformado plástico en frío.

Las diferencias en cuanto a las propiedades iniciales en el caso de un material obtenido mediante técnicas de fundición frente a otro obtenido por extrusión [Wiewiórowska et al., 2008] son muy importantes a la hora de ser procesado por estirado. Esta diferenciación va a influir en sobremanera en la plasticidad del material utilizado y, consecuentemente, en la temperatura que se alcanza como consecuencia de la energía de deformación del proceso de estirado así como en el valor de la fuerza de estirado necesaria.

Antes de someter la barra al proceso de estirado en la máquina se procederá a eliminar toda la suciedad y las impurezas superficiales mediante un baño de decapado para posteriormente enderezarla y preparar uno de sus extremos con la finalidad de facilitar la sujeción con el dispositivo mediante el cual se aplicará la fuerza de tracción necesaria para que se produzca el paso de la barra a través de la hilera. Una vez transformada la barra en su sección y longitud se cortará en segmentos más pequeños según la longitud deseada que se lubricarán y empaquetarán para su distribución final.

Las barras obtenidas mediante estirado se destinan habitualmente al sector industrial del mecanizado y al sector de la construcción de estructuras metálicas.

### **2.3.2 Proceso de estirado de alambre de sección circular: trefilado de hilo metálico**

Para este tipo de proceso se parte inicialmente de un rollo o bobina de alambón, tal y como se muestra en la Figura 2.4, y la materia prima se obtiene generalmente mediante un proceso de colada continua y laminación en caliente. Es posible que el alambón haya adquirido algo de dureza consecuencia de la laminación, pudiendo requerir de algún tratamiento térmico que confiera al material unas características óptimas para realizar el conformado del producto mediante el proceso de estirado.

Se denomina comúnmente trefilado al proceso de estirado en frío de alambre o hilo metálico de sección circular, proceso en el cual se trabajan normalmente diámetros por debajo de los 10 mm, llegando a alcanzar hasta los 0,03 mm.

Este tipo de proceso se realiza en una máquina con múltiples estaciones de estirado denominada trefiladora, en la que se aplica una secuencia de estirados para obtener la reducción hasta el diámetro final deseado, incrementando la longitud del alambre de manera sustancial, haciendo necesario su almacenamiento en bobinas. Se trata de un proceso verdaderamente continuo y cada una de las estaciones dispone de su hilera, su bobina y de los correspondientes dispositivos de control de tensión y velocidad.

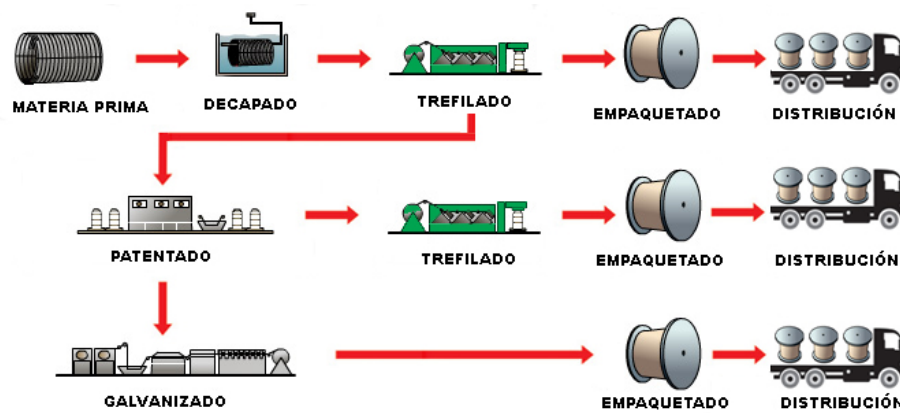


Figura 2.4 Proceso de producción de alambre en Suresh Steel Tubes Pvt. Ltd.

(<http://sst-india.com/process/bright-bars/>, 2016)

La materia prima se somete inicialmente a un proceso de decapado, para eliminar la suciedad, las impurezas y el óxido superficial. Una vez procesada se puede suministrar en diferentes acabados o terminaciones superficiales, entre las cuales las más comunes son el patentado y el galvanizado.

Este tipo de producto se emplea como semielaborado en sectores industriales tan importantes como el sector eléctrico, la construcción de estructuras o la fabricación de multitud de componentes mecánicos.

### **2.3.3 Proceso de estirado de barras de sección cuadrada o rectangular**

Una de las muchas variantes del proceso de conformado por deformación plástica denominado estirado de barras es el estirado para la obtención de una barra de sección cuadrada.

En este caso la materia prima o barra en bruto empleada va a tener una sección inicial de forma circular y, a su paso a través de la hilera de estirado, se va a transformar progresivamente en una barra de mayor longitud y una sección menor con forma cuadrada. Un estudio geométrico de la hilera para este tipo de proceso [Kim et al., 1999] puede llegar a ser bastante más complejo que el caso de estirado de productos de sección circular, caso objeto de estudio en este trabajo.

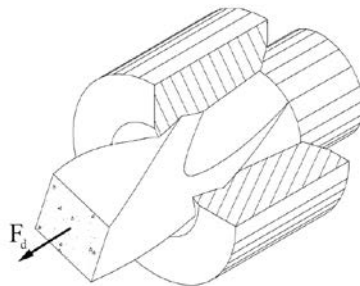


Figura 2.5 Estirado de una barra retorcida de sección cuadrada [Haghighat et al., 2011].

Este tipo de transformación se lleva a cabo habitualmente en diámetros a partir de 5 - 6 mm y es una geometría comúnmente empleada en barras cortadas a una longitud determinada, realizándose muy raramente para la obtención de hilo metálico o alambre bobinado de calibres inferiores.

Será necesario dar forma cuadrada a uno de los extremos de la barra inicial de sección circular con objeto de hacerla pasar a través de la hilera, para amarrar la barra por dicho extremo en el cabezal del banco estirado y así poder iniciar el proceso.

Este tipo de geometría tiene diversas aplicaciones industriales, sobre todo en el ámbito de la fabricación de piezas mediante procesos de estampación y forja así como el mecanizado y es empleada habitualmente en trabajos de carpintería metálica y ornamentación, como es el caso mostrado en la Figura 2.5.

Aunque en el presente trabajo se pretende estudiar únicamente el proceso de estirado de barras de sección circular, mediante una metodología fundamentada en el método del análisis local de tensiones, existen estudios en los cuales se corroboran métodos analíticos específicos basados en el estudio del límite superior [Haghighat et al., 2010] o en el análisis local de tensiones [Haghighat et al., 2011] para la estimación de la fuerza de estirado en el caso de sección cuadrada o rectangular. Otros métodos con los que se analiza el comportamiento de este proceso de estirado tan particular son aquellos que utilizan el método de elementos finitos [Yang et al., 2010]. Incluso se ha planteado el desarrollo de sistemas informáticos capaces de determinar del número de etapas necesarias y el diseño de cada una de las hileras para la ejecución del proceso multi-etapa [Brücker et al., 1988].

## **2.4 La herramienta de estirado: matriz de estirado o hilera**

La herramienta que produce físicamente el conformado por deformación plástica de una barra o alambre es la hilera o dado, la cual va montada en la máquina.

La reducción de sección y el ángulo de la hilera o matriz son los parámetros que van a determinar el perfil de la zona de deformación en el proceso de estirado. Este perfil o geometría, en consecuencia, va a condicionar el valor de la fuerza de estirado, así como el de la presión en la zona de contacto hilera-material y, además, va a ser determinante en el comportamiento del material y en otros muchos aspectos prácticos del proceso [Davis et al., 1988] [Kalpakjian, 2008].

### **2.4.1 Geometría de la matriz de estirado o hilera**

El resultado final en el proceso de estirado depende en gran medida de los diferentes parámetros geométricos de la hilera, los cuales se muestran en la Figura 2.6, así como de su estado de uso o desgaste. Para que el proceso sea satisfactorio, la hilera debe estar correctamente diseñada y fabricada con una calidad óptima ya que, de lo contrario, podrían atribuirse problemas del proceso a otras causas cuando realmente son consecuencia de alguna deficiencia en la hilera [Wright, 1979].

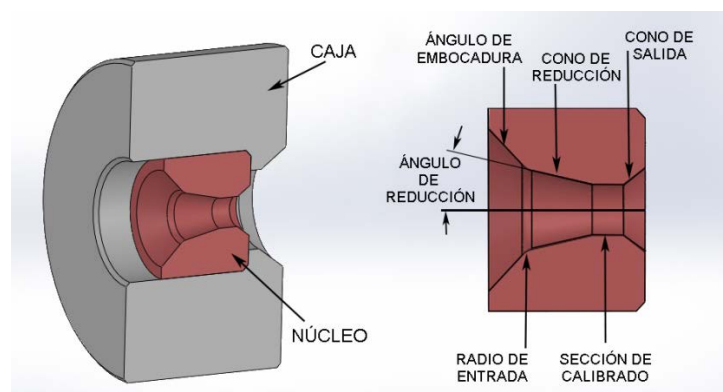


Figura 2.6 Partes de una matriz o hilera de estirado [Groover, 2010].

El semiángulo  $\alpha$  de la zona de reducción y la reducción de sección  $R_s$  aplicada, además de la longitud de calibración  $L_c$ , van a determinar la geometría de la zona de reducción o cono de reducción [Groover, 2010].

La geometría de la zona de reducción va a condicionar a todos los parámetros fundamentales del proceso de estirado: esfuerzo o tensión de estirado y presión en la superficie de contacto.

Aunque todos ellos son importantes, el parámetro geométrico de mayor influencia para un mayor o menor valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$  necesaria para que el proceso de estirado sea posible es el semiángulo  $\alpha$  del cono de reducción.

El valor óptimo de este semiángulo  $\alpha$  será aquel para el cual la tensión de estirado  $\sigma_e$  es más pequeña. Este valor óptimo depende fundamentalmente del tipo de material a estirar y de la reducción de sección  $\%R_s$  que se desea aplicar, además de otros factores como el tipo de lubricación empleada en el proceso, como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Semi-ángulos de reducción óptimos para el estirado de aceros [Tschaetsch, 2005].

Material				%Rs
Acero (< 0,4% C)		Acero (> 0,4% C)		
En seco	Lubricación	En seco	Lubricación	
11°	9°	10°	8°	10
16°	14°	15°	12°	22
19°	17°	18°	15°	35

Además de este ángulo tan importante en el proceso, la herramienta presenta un ángulo de embocadura cuyo principal objetivo es facilitar la entrada del alambre o barra y del lubricante en la zona donde se produce el conformado plástico del material. Un tercer ángulo, denominado ángulo de salida, se aplica para reforzar la zona de salida de la hilera para evitar la aparición de micro-roturas que originarían el destrozado de la herramienta a partir de esa zona.

El valor del semiángulo  $\alpha$  va a influir en sobremanera en la distribución de las tensiones que se crean durante el proceso de estirado [Kocov et al., 2003].

Un incremento en el valor de este parámetro va a repercutir en un mayor endurecimiento del material y en el valor de la fuerza de estirado. Además, un mayor valor de  $\alpha$  implica una menor superficie de contacto, con lo cual las presiones sobre esta superficie en la herramienta van a ser mayores. Por otro lado, si el valor de  $\alpha$  aumenta, también lo hará la velocidad de deformación del material a su paso por la hilera y, por lo tanto, se producirá un incremento en el valor de las tensiones que se generan en la superficie de contacto y, consecuentemente, un incremento en el coeficiente de rozamiento en la misma superficie en la interfase.

Una disminución en el valor del semiángulo  $\alpha$  conducirá generalmente a un aumento de la superficie de contacto y la fuerza necesaria para el estirado. Por otro lado, las tensiones en la interfase serán menores, provocando un mejor rendimiento de la película de lubricante en las superficies de contacto.

En la Figura 2.7 se puede ver el valor óptimo del semiángulo  $\alpha$  de la hilera, cuando la tensión de estirado es menor, para diferentes ratios de reducción [Wistreich, 1955]:

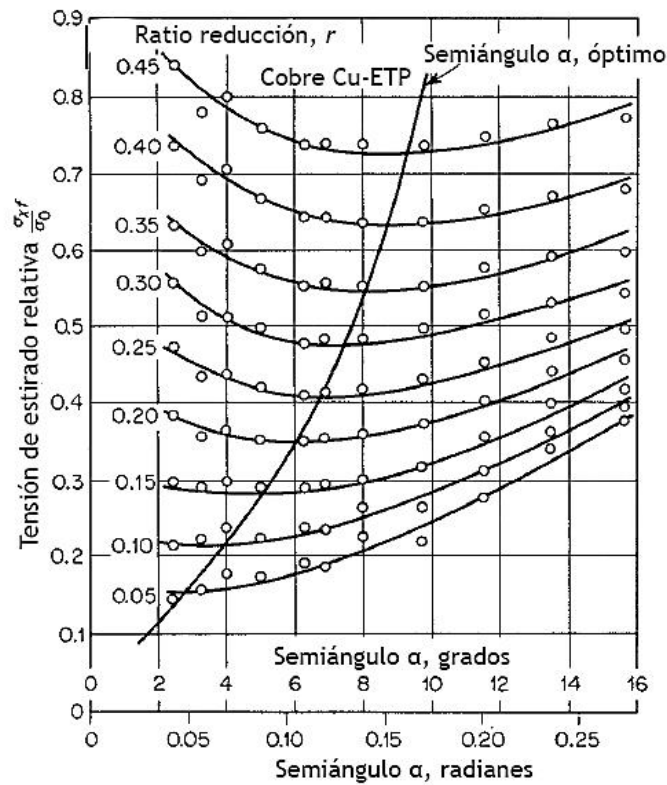


Figura 2.7 Tensión de estirado relativa vs. semi-ángulo  $\alpha$  de la hilera [Wistreich, 1955].

El parámetro delta  $\Delta$  determina la forma en la que se produce la deformación plástica en función de la geometría de la zona de reducción de la matriz o hilera [Wright, 1979], [Kristensen et al., 2004], [Cunningham et al., 2011] [Wright, 2011]. Este parámetro define el ratio entre el diámetro medio y la longitud en la zona de contacto, representando la relación óptima entre el semiángulo  $\alpha$  y el factor de reducción  $r$  correspondiente a dicho cono, parámetros todos mostrados en la Figura 2.8:

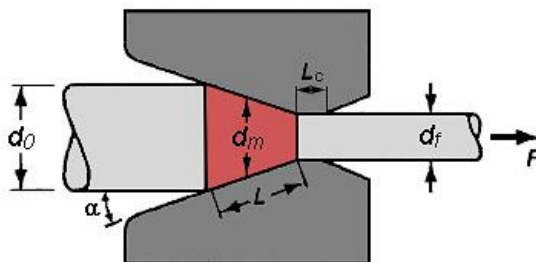


Figura 2.8 Parámetros geométricos para la determinación de  $\Delta$  [Kristensen et al., 2004].

Analizando la geometría de la zona de deformación, el factor delta  $\Delta$  se puede deducir mediante la siguiente expresión:

$$\Delta = \frac{d_m}{L} = \frac{d_0 + d_f}{d_0 - d_f} \cdot \text{sen} \alpha \quad (2.1)$$

Conociendo el denominado factor de reducción de la sección como:

$$r = 1 - \left(\frac{d_f}{d_0}\right)^2 \quad (2.2)$$

El ratio de reducción aplicado es el parámetro que implica mayor influencia en el proceso de estirado y en el resultado de este. Un incremento en la ratio de estirado va a suponer un incremento en el valor de la tensión de fluencia y la tensión de rotura del material estirado [Çetinarslan et al., 2013], como se ha demostrado para el caso de algunos tipos de aceros maleables con bajo contenido en carbono.

Es importante considerar, tal y como muestra la Tabla 2.3 y según la experiencia práctica [Tschaetsch, 2005], un límite máximo para la deformación en frío, en función del metal o aleación, en el estirado entre dos etapas consecutivas %Rs y en el total del proceso secuencial  $\Delta\%Rs$ .

Tabla 2.3 Porcentajes de reducción típicos admisibles en el estirado [Tschaetsch, 2005].

Aleación	Rm [MPa]	d <sub>0</sub> [mm]	%Rs	$\Delta\%Rs$	Etapas
Acero	400	4-12	18-22	38-400	8 a 21
	1200	4-12	18-22	380-400	
	1200	0,5-2,5	12-15	120-150	
Cobre	250	8-10	40-50	350-400	5 a 13
		1-3,5	18-20	200-300	
		12-16	20-25	250-300	
Aluminio	80	1-3,5	15-20	150-200	5 a 13

El factor delta  $\Delta$  puede definirse mediante la expresión:

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} [1 + \sqrt{1 - r}]^2 \quad (2.3)$$

Un valor bajo de  $\Delta$  vendrá dado para una pequeña diferencia entre secciones, implicando un semiángulo  $\alpha$  pequeño y una longitud grande en la zona de reducción, con la consecuencia de una mayor superficie de contacto. La fricción entre superficies y el calentamiento aumentan y la presión entre estas disminuye [Tittel et al., 2012].

Un valor alto de  $\Delta$  implica mayor diferencia entre secciones, mayor semiángulo  $\alpha$  y menor longitud del cono de reducción, originando una menor superficie de contacto.

En estos casos la fricción y el calentamiento se van a reducir, aunque aumentará el valor de la presión en la superficie de contacto del dado.

El fenómeno de fricción y el calentamiento asociado al mismo han de mitigarse con el uso de lubricantes y refrigerantes aplicados en la zona de reducción ya que, de no hacerlo, se podrían producir efectos indeseados en la superficie del producto estirado y de la hilera. Es muy importante, en el caso de emplear bajos valores para el factor delta  $\Delta$ , una lubricación estable y que propicie condiciones de baja fricción, lo cual se favorece cuando se utilizan valores bajos en el semiángulo  $\alpha$  de la hilera, consiguiendo de esta forma reducir el valor del coeficiente de rozamiento en la zona de contacto.

El desgaste en la superficie de contacto de la herramienta está asociado directamente con la presión del material en dicha superficie [Kim et al., 1997]. Es imprescindible evitar reducciones de sección muy acusadas y ángulos de reducción elevados, o lo que es igual, evitar valores elevados del factor de forma  $\Delta$  [Cunningham et al., 2011].

En la Tabla 2.4 se muestra los valores que adopta el factor de forma  $\Delta$  de la hilera en función de los valores habituales del semiángulo  $\alpha$  y de la reducción aplicada %Rs:

Tabla 2.4 Valores del factor  $\Delta$  para diversos semi-ángulos y reducciones [Campos et al., 2005].

$\alpha$ [°]	%Rs							
	5	10	15	20	25	30	35	40
2	2,72	1,33	0,86	0,63	0,49	0,39	0,33	0,27
4	5,44	2,65	1,72	1,25	0,97	0,78	0,65	0,55
6	8,17	3,98	2,58	1,88	1,46	1,18	0,98	0,82
8	10,89	5,30	3,44	2,51	1,94	1,57	1,30	1,10
10	13,61	6,63	4,30	3,13	2,43	1,96	1,63	1,37
12	16,33	7,95	5,16	3,76	2,92	2,35	1,95	1,65
14	19,06	9,28	6,02	4,38	3,40	2,75	2,28	1,92
16	21,78	10,60	6,88	5,01	3,89	3,14	2,60	2,20
18	24,50	11,93	7,74	5,64	4,38	3,53	2,93	2,47
20	27,22	13,26	8,60	6,26	4,86	3,92	3,25	2,75

Para el correcto diseño de la hilera conviene considerar también el efecto producido por el trabajo adicional. Esta componente del trabajo total que interviene en el estirado, consecuencia del exceso de energía por encima de la estrictamente necesaria para producir la reducción de sección transversal deseada, produce una distorsión interna en la estructura del metal conformado. Esta distorsión será más importante a mayor valor del factor de forma  $\Delta$  aplicado en el diseño de la hilera.

El trabajo adicional contribuye a un excesivo endurecimiento por deformación, sobre todo en la superficie de la barra o alambre. Este aspecto influye en el diseño del proceso secuencial ya que, a mayor trabajo adicional, menor será el grado de

deformación aplicable antes de que el tratamiento térmico de recocido sea necesario, encareciendo el proceso y afectando las propiedades del producto final obtenido.

Considerando el límite de mínima tensión de estirado [Atkins et al., 1967], el valor delta  $\Delta$  para la mayoría de diseños de hilera habituales está comprendido entre 1 y 3 [Campos et al., 2005]. Para un óptimo diseño geométrico de la matriz o hilera se pueden considerar los siguientes intervalos aconsejados para el valor del factor delta  $\Delta$ :

- ✓ Para disminuir los efectos de la fricción:  $\Delta \leq 3$  y lo más próximo posible a 1,5.
- ✓ Para minimizar el desgaste en la superficie de contacto:  $1 \leq \Delta \leq 1,5$

#### **2.4.2 Longitud de calibración de la matriz de estirado o hilera**

La longitud de la zona de calibración (véase Figura 2.8) va a tener una influencia notable en la calidad del producto final estirado [Vannes et al., 1981], influyendo directamente en el valor final de la tensión de estirado como consecuencia del efecto del rozamiento. Además, este parámetro geométrico favorece la aparición de un mayor o menor trabajo adicional debido a la distorsión interna provoca, sobre todo en la zona más cercana a la superficie del producto estirado [Adamczyk et al., 2012].

Tabla 2.5 Algunos valores típicos para  $\alpha$  y  $L_c$  en las hileras de Fort Wayne Die Inc.

Material	Diamante Policristalino		Diamante Monocristalino	
	$\alpha$ [°]	$L_c$ [mm]	$\alpha$ [°]	$L_c$ [mm]
Cobre	9	$0,25 \cdot df$	9	$0,40 \cdot df$
Aluminio	10	$0,25 \cdot df$	10	$0,25 \cdot df$
Acero Inoxidable	7,5	$0,35 \cdot df$	7	$0,50 \cdot df$
Acero al carbono	7	$0,30 \cdot df$	7	$0,50 \cdot df$

(<http://www.fwwd.com/FWWD-literature/index.html>, 2016).

En la Tabla 2.5 se pueden ver los valores típicos para el semiángulo  $\alpha$  y la longitud de calibración  $L_c$  en función del tipo de material a estirar y del tipo de material del que está fabricada la hilera. Generalmente se aplica el 20-40% del diámetro de salida para el estirado de materiales dúctiles y entre 40-60% para materiales menos dúctiles, en el cálculo de la longitud de calibración de la hilera de estirado.

El tramo de calibración reduce las deformaciones en el producto estirado, producidas por efecto del trabajo adicional y que afectan a las dimensiones del este. En el caso de un material duro, este tramo cilíndrico corrige el ligero aumento de sección que se produce por efecto muelle o “spring-back” a la salida de la hilera y, en el caso de un material dúctil, reduce la pérdida de sección consecuencia del efecto de la fuerza de estirado a la salida de la hilera.

La longitud de esta zona afecta además a fenómenos como el de la recuperación que presenta el material deformado como consecuencia del trabajo redundante que acumula a su salida de la herramienta de estirado [Korchunov et al., 2014] o el fenómeno de fragilización por el efecto del hidrógeno en aceros [Lorenzo et al., 2009].

Las hileras fabricadas de carburo de tungsteno o metal duro (WC) tienen un comportamiento similar a las fabricadas en diamante policristalino, aunque este último es mucho más resistente al desgaste, siempre bajo condiciones óptimas de lubricación.

Hay estudios analíticos y experimentales en los que se demuestra que en un rango de valores bajos del semiángulo  $\alpha$  y de la longitud de calibración  $L_c$  de la herramienta o hilera el proceso de estirado se puede llevar a cabo con éxito [Kabayana et al., 2009] para la mayoría de los materiales transformados por este tipo de proceso industrial.

Esto se refleja en una menor influencia del rozamiento en la zona de contacto y valores inferiores en la fuerza de estirado para una herramienta con un valor del semiángulo y/o de la longitud de calibración más pequeños, aunque el valor del semiángulo repercute en mayor medida en la fuerza de estirado.

Se ha demostrado también que existe una relación directa de la presión que el material ejerce en la superficie de contacto en la zona de reducción de la herramienta y la geometría de esta, definida mediante el valor del factor delta  $\Delta$ , para unas determinadas condiciones de fricción en la interfase [Cunningham et al., 2011].

También se puede afirmar que a mayor semiángulo en el cono de reducción de la hilera, mayores serán las tensiones residuales acumuladas en el producto final obtenido tras realizar el estirado [Kabayana et al., 2009] [Salcedo et al., 2010]. Generalmente este tipo de tensiones son de tracción en la zona de la sección más cercana a la superficie del alambre o barra estirada acumulándose tensiones de compresión en la zona interna de la geometría del producto estirado, aunque la velocidad del proceso va a influir en sobremanera en la forma de la distribución de estas tensiones en la sección cilíndrica del material estirado [Atienza, 2001] [Atienza et al., 2004] [Atienza et al., 2005]. El estado de tensiones residuales existentes en un producto estirado va a ser función de las características geométricas de la herramienta [Salcedo et al., 2010], semiángulo y porcentaje de reducción de sección además de las condiciones tribológicas (rozamiento) del proceso.

El estado tensional obtenido en el material una vez estirado es muy importante ya que los esfuerzos residuales condicionan en gran medida las propiedades mecánicas del material y su comportamiento frente a la fatiga, tratándose de tensiones que van a ser permanentes en el material estirado mientras este no sea sometido a un tratamiento térmico para eliminarlos.

Una longitud de calibración mayor implicará una mayor vida de la herramienta y mayor precisión en la sección final, mayor fricción, más calor generado, peor lubricación y un incremento de las tensiones residuales, así como del endurecimiento por deformación del material estirado, mientras que una longitud pequeña en esta zona de la hilera produce justo los efectos opuestos en el proceso [Jindal et al., 2015].

Existen otros tipos de diseño de hilera además del perfil cónico tradicional. Perfiles compuestos o con geometría curva y radios de transición entre zonas de reducción y calibración se aplican en el diseño de hileras de acabado en diamante natural o hileras utilizadas para el trefilado de materiales sintéticos (polímeros). Este tipo de perfil permite una mayor velocidad en el proceso y se emplea para valores de reducción pequeños [Mohanraj et al., 2006]. La combinación de diferentes radios de transición permite una disminución del desgaste de la herramienta en esos puntos y una ligera reducción de la tensión de estirado [Sadok et al., 1992].

### **2.4.3 Materiales para la fabricación de la matriz de estirado o hilera**

La matriz de estirado o hilera debe soportar elevadas presiones como consecuencia de los esfuerzos que soporta por la acción de la fuerza de estirado y el paso del material, trabajando además bajo unas condiciones de desgaste severas durante el proceso de estirado de la barra o alambre. Los materiales de gran dureza y resistencia al desgaste son generalmente poco tenaces y es por este motivo por el cual la hilera de estirado se diseña en dos partes: núcleo y caja. En la Figura 2.9 se presentan hileras con este tipo de construcción.

El núcleo se construye en un material de gran dureza mientras que la caja será de un material resistente y tenaz para contrarrestar la fragilidad del propio núcleo.



Figura 2.9 Hileras con núcleo de carburo de tungsteno fabricadas por Esteves Group. (<http://www.estevesgroup.com/es/products/wire-drawing-dies/tungsten-carbide-dies/>, 2016).

Los materiales comúnmente empleados para la construcción de la caja son el acero, en las hileras de tamaño medio y grande que se utilizan para el estirado de barras, y el bronce en el caso de las hileras pequeñas empleadas en el trefilado de alambre.

Para el núcleo de las hileras de tamaño medio o grande, como es el caso del proceso de estirado de barras, es muy habitual emplear el carburo de tungsteno. El metal duro, como se conoce, es un material obtenido mediante un proceso pulvimetalúrgico y se utiliza habitualmente para la fabricación de herramientas de corte. Posee una gran dureza, resistencia y muy buena tenacidad.

Existen diversos ejemplos de estudios sobre el rendimiento de este tipo de material empleado en hileras de trefilado, estudios en los que se analiza el desgaste en la zona de contacto de la hilera [Takada et al., 2011], [Lee et al. 2012], [Haddi et al., 2012].

Para hileras pequeñas, como ocurre en el caso del trefilado de alambre o hilo metálico, se fabrica el núcleo de diamante policristalino (*Poli-crystalline Diamond, PCD*) o de diamante monocristalino (*Single-crystal Diamond, SCD*). El diamante monocristalino se aplica en materiales no férricos, normalmente para las últimas etapas de acabado final, mientras que el diamante policristalino ofrece gran rendimiento en el trefilado de aleaciones de cobre y de aluminio, empleado además para trefilado de aceros bajo condiciones térmicas muy estables [Esteves Group, 2008].

Existen estudios sobre el rendimiento del diamante policristalino utilizado en hileras de estirado [Wang et al., 2012] en los que, mediante simulación numérica, se analiza el proceso de estirado para hileras con diferente valor del semiángulo  $\alpha$ .

Otra opción para mejorar el rendimiento son los recubrimientos de alta resistencia en las superficies de la zona de contacto del núcleo en las hileras de carburo de tungsteno. Una fina película de elemento o compuesto se aplica a la superficie del núcleo mediante técnicas de electro-deposición, consiguiendo de esta forma complementar y mejorar las propiedades del metal duro frente al desgaste.

Tabla 2.6 Recubrimientos para herramientas.

Recubrimiento	Dureza [HV]	Espesor [ $\mu\text{m}$ ]	$\mu$ (acero/en seco)	t <sup>a</sup> oxidación [°C]
TiN	2300	1-4	0,4	600
TiCN	3000	1-4	0,4	400
TiAlN	3400	2,5-15	0,3-0,4	900
AlTiN	3300	2-5	0,4	900
AlCrN	3200	1-5	0,4	1100
CrN	1750	1,5-10	0,5	700
WC/C	1300	1-4	0,1-0,2	300
TiCrN	2100	8-10	0,5	700
DLC (Diamante Carbono)	2000-4000	0,3-0,5	0,1-0,2	350
C (Diamante)	8000	6-30	0,1	-
CrC	1850	2,5-10	0,5	700

([http://selector.ascamm.org/tratamientos/recubrimientos\\_metalicos\\_capa\\_fina.php](http://selector.ascamm.org/tratamientos/recubrimientos_metalicos_capa_fina.php), 2016).

Recubrimientos tradicionalmente empleados para mejorar la resistencia al desgaste [Cunningham et al., 2013] [Lin et al., 2011] [Nilson et al., 2011] son el diamante policristalino (PCD), el nitruro de boro cúbico (cBN), el nitruro y el carbonitruro de titanio (TiN, TiCN) o la alúmina ( $Al_2O_3$ ), todos ellos mostrados en la Tabla 2.6.

Actualmente, a causa de la voraz competencia del mercado, la industria dedicada a la manufactura de productos estirados y/o trefilados se ve obligada a mejorar su productividad y reducir sus costes. Los clientes de este tipo de producto exigen cada vez mayor calidad y mejores prestaciones en el producto final. Los fabricantes y proveedores de hileras de estirado se ven obligados, ante las exigencias de la industria y los clientes, a mejorar el rendimiento y la vida de la hilera. Mientras, las herramientas se someten a trabajar bajo unas condiciones cada vez más severas.

## **2.5 Maquinaria empleada en el proceso de estirado**

### **2.5.1 El banco de estirado**

El banco de estirado consiste en un chasis de acero dividido en una mesa de entrada y otra de salida a la altura del bastidor porta-hileras en el cual se puede montar una o varias hileras. El extremo de la barra previamente empuntado pasa a través de la hilera y se fija a la corredera mediante la garra o mordaza. El movimiento lineal de la corredera se consigue por tracción mediante un sistema mecánico-hidráulico. La transmisión de la fuerza de tracción puede ser directa, mediante un cilindro hidráulico como el de la Figura 2.10, pero generalmente los bancos de estirado modernos utilizan transmisión de corredera o cadenas [Davis et al., 1988] [Groover, 2010] [Horna, 2014].

Los mencionados sistemas de transmisión hacen posible procesar barras de gran longitud y este aspecto hace necesaria la automatización de este tipo de maquinaria. Los más modernos bancos de estirado de barras están equipados con un sistema de corte y almacenaje automático de las barras cortadas a la longitud previamente ajustada. La fotografía de la Figura 2.11 muestra una de estas máquinas.

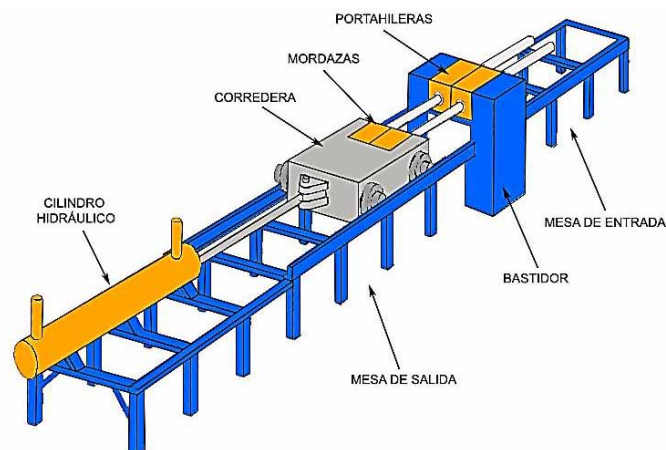


Figura 2.10 Partes principales de un banco de estirado [Groover, 2010].



Figura 2.11 Instalación automática para estirado y corte de barras Bültmann.  
(<https://www.bueltmann.com/instalaciones-de-estirado-recto.html>, 2016).

### **2.5.2 La trefiladora**

En el proceso de trefilado de alambre o estirado de hilo metálico el material se hace pasar por una serie de hileras para conseguir la reducción de sección de manera progresiva en una secuencia de etapas de estirado [Davis et al., 1988].

Como se puede ver en la Figura 2.12 se muestra la estructura más fundamental de una trefiladora. El proceso se inicia a partir de una bobina de carga, mediante la cual se alimenta el alambre cuya sección se desea reducir, mientras el material procesado se almacena en la bobina de tracción o en una bobinadora a continuación de la máquina. Las bobinas de tracción están motorizadas y transmiten la tensión al hilo metálico en cada una de las estaciones consecutivas que constituyen la secuencia de estirado multi-etapa. La velocidad de cada bobina se controla, para cada etapa, mediante un sistema de engranajes, de manera cumplen la doble función de mantener una mínima tensión en el alambre o hilo a la entrada a la hilera, además de traccionar a la salida de la misma. Cada hilera se monta fija en su bastidor, sumergida dentro del depósito de lubricación para conseguir la fricción material-hilera y el desgaste de esta.

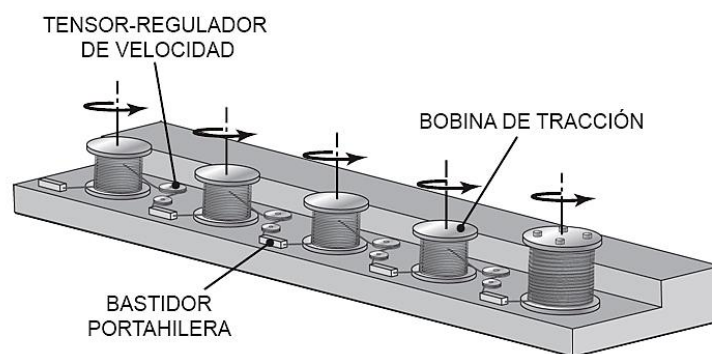


Figura 2.12 Estructura de una máquina trefiladora en línea [Kalpakjian, 2008].



Figura 2.13 Máquina trefiladora en línea hasta 10 estaciones de estirado.

(<http://www.koch-ihmert.de/en/products/drawing-machines/>, 2016)

Una configuración alternativa más compacta es la máquina de poleas que se puede ver en la Figura 2.14. Este otro sistema consta de una bobina de carga y una bobina de tracción, pero las hileras están montadas en un dispositivo central de manera que el hilo pasa a través de ellas siguiendo la secuencia de reducción deseada. Las poleas están motorizadas y mediante estas se aplica el esfuerzo de tracción necesario para hacer pasar el hilo a través de la hilera en cada etapa. La velocidad del proceso en cada etapa es fija y viene dada por la relación de transmisión existente entre los diámetros del juego de poleas montado a ambos lados en la máquina.



Figura 2.14 Trefiladora compacta de poleas cónicas, modelo CL-15D.

([http://es.made-in-china.com/co\\_jyxiangle/product\\_group\\_s\\_s\\_1.html](http://es.made-in-china.com/co_jyxiangle/product_group_s_s_1.html), 2016).

El proceso continuo de trefilado multi-etapa conlleva generalmente la necesidad de aplicar un recocido intermedio entre algunas de las estaciones de estirado, con el fin de llevar la estructura del material procesado a unas condiciones óptimas de ductilidad y resistencia que permitan continuar con la secuencia completa de estirado.

Este tratamiento térmico se puede aplicar en un horno de inducción, a una bobina de material procesado, realizando el enfriamiento dentro de una cámara en atmósfera controlada. No obstante, para no tener que detener el proceso, generalmente se realiza en continuo en la misma línea de trefilado. Para este efecto se utiliza la técnica de cortocircuito, técnica que consiste en aplicar una determinada diferencia de potencial entre dos poleas, entre las que avanza una determinada longitud de hilo, creando un cortocircuito que produce el calentamiento de este tramo por el efecto Joule y enfriándolo a su paso por un depósito con refrigerante. De esta forma se consigue recocer el metal de forma continua y uniforme en toda su longitud, ahorrando tiempo, espacio y dinero.

## **2.6 Consideraciones sobre el proceso de estirado**

### **2.6.1 Propiedades mecánicas del material**

#### **➤ Límite de rotura o resistencia a la tracción**

Determinado por el valor de la tensión de rotura o tensión de tracción máxima, el límite de rotura o resistencia a la tracción hace referencia al valor del cociente entre la carga de tracción máxima que soporta una barra de un determinado material, en el instante en el que se produce la rotura, y la superficie correspondiente en la sección transversal [Rowe, 1972].

El proceso de estirado se produce, precisamente, como consecuencia de la acción directa de la fuerza de estirado en el extremo de la barra y, por lo tanto, el estirado del material es el resultado de una carga de tracción.

Debido a la deformación plástica que sufre el material durante el proceso de estirado en frío, esta propiedad se verá alterada en función del grado de deformación aplicado al mismo. Generalmente, en la mayoría de los metales utilizados como materia prima en el proceso de estirado, el valor de la resistencia a la tracción se verá incrementado como consecuencia del proceso de conformado por deformación plástica.

Es conveniente que la fuerza de estirado aplicada a la salida de la hilera, función directa del grado de deformación aplicado en la reducción, no alcance el valor de la resistencia a la tracción. Si este valor límite se ve superado, el material podría llegar a romperse a la salida de la hilera haciendo inviable el proceso.

#### **➤ Límite elástico o de fluencia**

La fluencia de un material sometido a un esfuerzo de tracción consiste en el alargamiento plástico de dicho material, lo cual va a implicar una deformación permanente en dicho material.

El límite elástico se define como el valor de la carga de tracción aplicada, a una barra de un determinado material, en el instante en el que comienza a producirse una pequeña deformación permanente. No todos los materiales tienen esta zona de fluencia claramente definida, aunque en la mayoría de los metales empleados en los procesos de conformado por deformación plástica este intervalo de deformación es suficientemente reconocible. Este límite se refiere, a la tensión que alcanza la probeta en un ensayo de tracción justo en el instante en el que se inicia la fluencia del material.

Como consecuencia de la deformación sufrida por el material, una vez sometido al proceso de estirado en frío, el límite de fluencia del producto obtenido por estirado se verá alterado significativamente.

En un proceso de estirado en frío es conveniente que el material posea un límite de fluencia relativamente bajo, ya que de lo contrario sería complicado alcanzar el límite plástico. En este caso, el valor de la tensión de estirado necesaria podría incrementarse hasta tal punto en que la hilera soportaría tal presión que provocaría su rotura.

Un material estirado va a incrementar su límite de fluencia. Esta característica de los metales es fundamental en el proceso de estirado, ya que conviene que el material obtenido a la salida de la hilera posea un límite de fluencia mínimo que permita soportar la tensión de estirado aplicada en el extremo, evitando deformaciones indeseadas en el producto estirado. El material estirado debe mantener un comportamiento elástico durante el proceso, permitiendo obtener una sección uniforme, sin irregularidades y homogénea en toda la longitud del producto.

La fuerza aplicada en el extremo de la barra o hilo y necesaria para conseguir hacerlo pasar a través de la abertura de la hilera nunca podrá alcanzar el valor de dicha tensión de fluencia para que el producto estirado mantenga la sección deseada en toda su longitud y sea posible una calidad óptima del mismo.

#### ➤ **Dureza**

Es la propiedad de los materiales a oponerse a ser penetrados, rayados o cortados.

Los procesos de conformado por deformación plástica mediante compresión del material, como la forja o la estampación en frío, producen generalmente un incremento significativo de la dureza del material conformado en el producto obtenido. A diferencia de procesos como los mencionados anteriormente, el estirado en frío es producido mediante la aplicación de una tensión de tracción, pero el material es sometido a compresión a su paso a través de la hilera.

En el proceso de estirado, este incremento de la dureza en el material es directamente proporcional al grado de deformación aplicado, es decir, va a ser función de la reducción aplicada en la sección de la barra o alambre.

Además de una modificación en la geometría de la sección, con el proceso de estirado se persigue conseguir un producto con unas determinadas propiedades mecánicas y características, entre las que el grado de dureza superficial es una de las más importantes.

Para conseguir incrementar el valor de la dureza superficial se deben aplicar reducciones de sección pequeñas en las últimas etapas del proceso secuencial de estirado en frío. Esta técnica permite conservar las propiedades cerca del núcleo del alambre o hilo estirado, transformando el material en la zona cercana a la superficie y confiriéndole así una mayor dureza superficial.

### ➤ **Ductilidad**

Se define ductilidad como la aptitud de un material metálico para deformarse plásticamente sin llegar a romperse. Es una cualidad necesaria en un material que vaya a ser sometido a cualquier proceso de conformado por deformación plástica.

El proceso de estirado afecta significativamente la ductilidad del metal que, una vez conformado, verá reducida esta propiedad de manera proporcional al grado de deformación aplicado. La ductilidad será una propiedad deseable en el material previamente a la aplicación del proceso de conformado plástico.

Un proceso de estirado secuencial multi-etapa debe tener un buen diseño para mantener la ductilidad del material, de esta forma será posible avanzar un mayor número de etapas sin que se produzcan deformaciones indeseadas o roturas en el producto final estirado. Esta característica evita la necesidad de recocidos intermedios innecesarios en el proceso continuo.

La ductilidad de un metal puede expresarse cuantitativamente como la capacidad de alargamiento de una barra de dicho metal sometido al ensayo de tracción. Se define como el porcentaje de alargamiento que alcanza dicho material en el momento justo antes de su rotura a tracción [Kalpakjian, 2008], expresado como:

$$\%EL = [(l_f - l_0)/l_0] \times 100 \quad (2.4)$$

### ➤ **Endurecimiento por deformación en frío**

Se trata del fenómeno por el cual un metal ve incrementada su dureza y su límite de fluencia como consecuencia de la deformación permanente, deformación plástica producida generalmente en frío.

El endurecimiento producido por deformación en frío se aplica, en ocasiones de forma controlada, con objeto de mejorar las propiedades mecánicas de los productos fabricados. Los efectos producidos como consecuencia de este fenómeno pueden

reducirse o incluso eliminarse mediante un tratamiento térmico de recocido, realizado bajo condiciones de temperatura, tiempo y condiciones de enfriamiento apropiados, que permitirá la reestructuración cristalina del metal de una manera controlada.

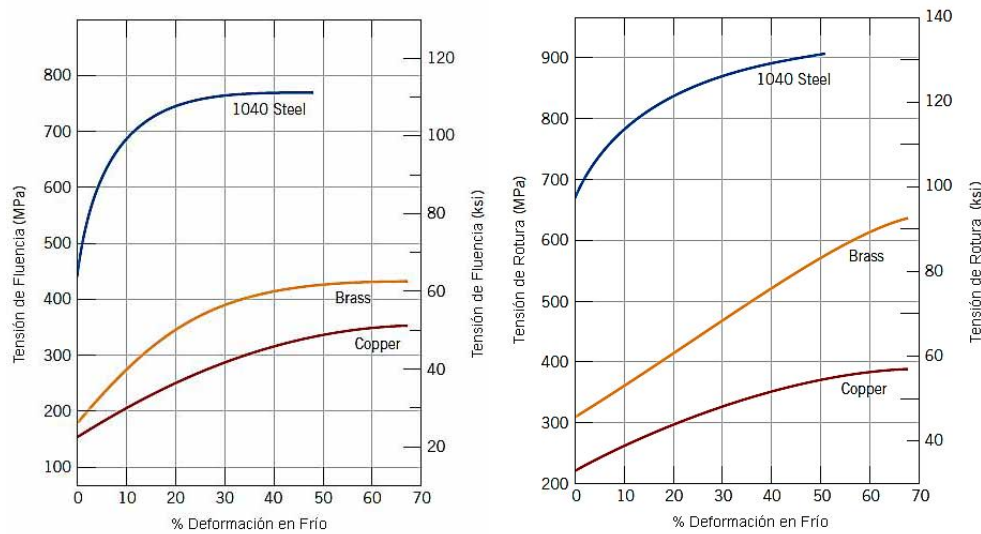


Figura 2.15 Evolución de las propiedades mecánicas como consecuencia del conformado por deformación plástica en frío aplicado a diferentes metales [Callister, 2007].

En las gráficas que se muestran en la Figura 2.15 se puede observar cómo evoluciona el valor de las principales propiedades mecánicas en función del grado de deformación en frío aplicado, para un acero al carbono, el latón y el cobre. Tal y como se puede apreciar, tanto la tensión o límite de fluencia  $Y$  como la tensión o límite de rotura  $R_m$  ven incrementado su valor cuando el porcentaje de deformación aplicada es mayor.

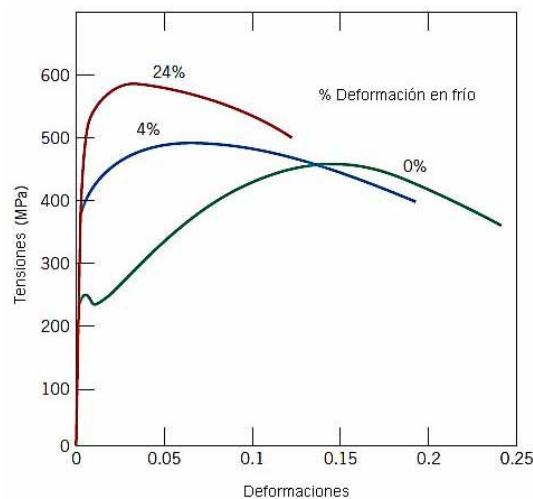


Figura 2.16 Influencia del endurecimiento por deformación en frío en la curva de tensiones-deformaciones de un acero con bajo contenido en carbono [Callister, 2007].

En la Figura 2.16 se puede apreciar cómo se va transformando la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  a medida que el porcentaje de deformación aplicado a un acero dúctil de bajo contenido en carbono se incrementa. Tanto el límite de fluencia como el límite de rotura ven

incrementado su valor como consecuencia de la deformación aplicada. Se observa una disminución del tramo plástico, entre ambos límites, lo que se traduce en detrimento de la ductilidad a medida que el porcentaje de deformación en frío aplicada es mayor.

Esta misma conclusión se obtiene tras el análisis de la gráfica mostrada en la Figura 2.17, en la que se aprecia cómo la capacidad del metal para ser deformado plásticamente en frío se ve reducida cuando el grado de deformación aplicado en el proceso se incrementa, alterando además de manera ostensible las propiedades mecánicas fundamentales del metal deformado [Callister, 2007].

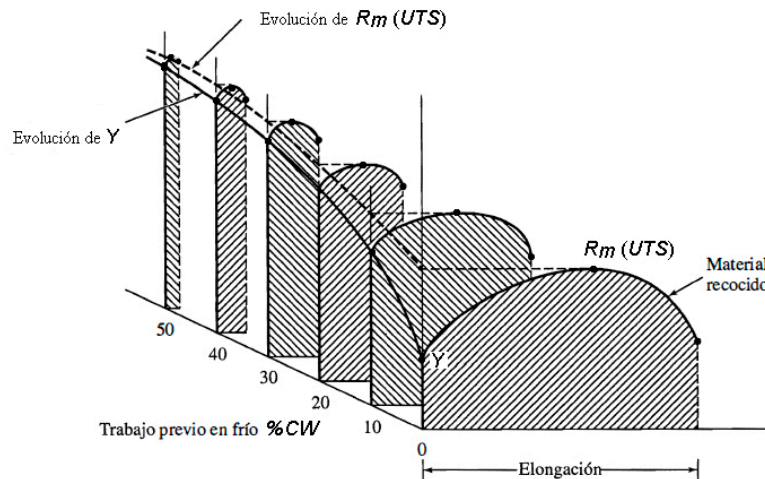


Figura 2.17 Evolución de las propiedades mecánicas en el estirado [Schey, 2002].

La influencia del fenómeno de endurecimiento por deformación plástica en frío en los aceros ha sido estudiada por diversos autores [He et al., 2002]. Se puede afirmar que este fenómeno, considerando el proceso de estirado en frío de los aceros, afecta de manera diferente en función del contenido en carbono. El contenido de este elemento en el acero afecta en sobremanera a las condiciones del proceso y a las propiedades obtenidas en el metal procesado.

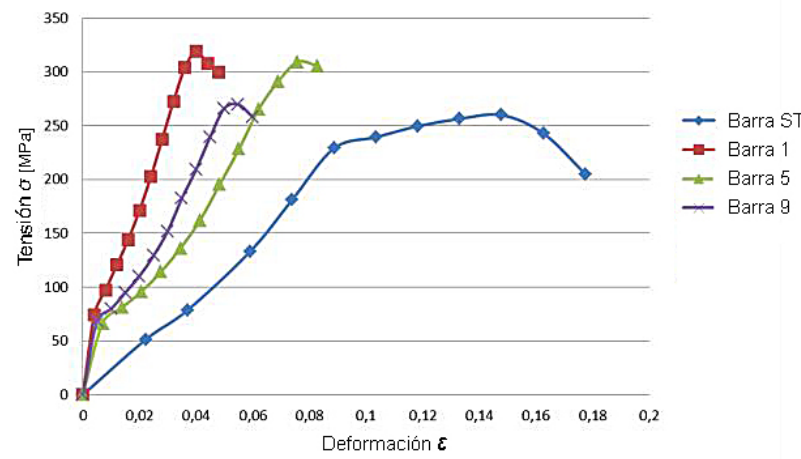


Figura 2.18 Alteración de la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  del aluminio estirado [Betancourt et al., 2014]

En la Figura 2.18 se aprecia la evolución del valor de la tensión de fluencia y de la tensión de rotura a partir de una barra de aluminio sin estirar [Betancourt et al., 2014].

En definitiva, el estirado secuencial multi-etapa produce cambios significativos en la microestructura, tales como el alargamiento del grano, sea cual sea el metal procesado. La tenacidad y ductilidad de este se ven reducidas, mientras su límite de fluencia, así como su límite de rotura y su dureza se ven afectadas cuando el grado de deformación en frío aplicado se incrementa a medida que se avanza en las etapas del proceso. Estas afirmaciones se corroboran en recientes estudios de diversos autores [Nurudeen et al., 2011] [Çetinarslan et al., 2013] [Raji et al., 2013] [Lee et al., 2014].

## **2.6.2 Tratamientos térmicos de reestructuración**

Un tratamiento térmico es un proceso mediante el cual se calienta un metal a una determinada temperatura para enfriarlo inmediatamente después. Esta operación se realiza bajo condiciones de entorno y velocidad totalmente controladas, con la finalidad de modificar propiedades mecánicas propias de este metal tales como su resistencia, tenacidad, dureza o ductilidad [Apraiz, 1949] [Molera, 1991].

Las propiedades mecánicas de un metal van a depender de su composición química y de su estructura cristalina. Un tratamiento térmico permite alterar la estructura cristalina, sin afectar la composición química del metal, para conseguir unas propiedades mecánicas determinadas.

En un proceso de estirado multi-etapa puede existir la necesidad de algún tratamiento térmico entre dos etapas intermedias concretas, con la finalidad de conseguir las propiedades mecánicas apropiadas, para poder continuar el proceso sin que se produzcan defectos o rotura del material. También es habitual aplicar un tratamiento térmico al final del proceso, en el producto estirado, para conferir las cualidades deseadas a la barra o hilo metálico obtenido por estirado o trefilado.

Evidentemente, los parámetros del tratamiento térmico en cuestión van a ser muy diferentes, dada la diversidad de metales y aleaciones que se emplean como materia prima en este tipo de proceso. A continuación se realiza una breve descripción de los tratamientos térmicos comúnmente empleados durante el proceso de estirado.

### **➤ Recocido**

El recocido consiste, por lo general y en la mayoría de los metales, en calentar el metal hasta alcanzar su temperatura de recristalización, enfriándolo a continuación hasta alcanzar la temperatura ambiente, todo ello a una velocidad y atmósfera controladas.

El recocido tiene la finalidad principal de recuperar la estructura del metal, eliminando tensiones internas, devolviéndole su ductilidad y reestableciendo sus propiedades mecánicas iniciales [Apraiz, 1949] [Molera, 1991].

La temperatura de recristalización de un metal es aquella a la cual se comienzan a formar nuevos granos estructurales libres de tensiones. Las dislocaciones desaparecen en la estructura cristalina y el metal recupera su ductilidad.

El objetivo principal de este tipo de tratamiento es permitir continuar con el conformado por deformación plástica en frío cuando el metal ha alcanzado su grado máximo admisible de endurecimiento por deformación, consiguiendo de esta forma una buena estabilidad dimensional en todas las etapas del proceso y eliminando las tensiones producidas durante el mismo. Se puede aplicar antes de comenzar el proceso secuencial de estirado, entre etapas o incluso al final, en el propio producto estirado, y afectará las propiedades mecánicas del producto final obtenido.

Según del tipo de aleación y las propiedades que se desean conseguir, existen diversos ciclos térmicos para los diferentes objetivos buscados en el recocido. Estas variantes difieren entre sí en la temperatura a la que se calienta el metal y el método de enfriamiento utilizado, el cual condicionará la velocidad de enfriamiento del material.

En el estirado secuencial multi-etapa, como consecuencia del endurecimiento por deformación en frío que adquiere el metal estirado, a medida que el proceso secuencial avanza en sus etapas, pueden ser necesarios uno o varios recocidos intermedios con el fin de mantener la ductilidad y el grado de plasticidad necesarios para que sea posible completar la secuencia de estirado sin romper el alambre o hilo metálico [Kocov et al., 2003]. En función de esta secuencia de estirados y recocidos intercalados o recocidos “en línea”, se obtiene un producto final con un diferente grado de dureza y características mecánicas.

Estudios recientes certifican que, en el estirado del cobre, para combinar propiedades mecánicas óptimas tales como dureza, resistencia a la rotura por tracción o resistencia a la fractura por impacto, no es aconsejable superar el 20% de reducción del área inicial sin realizar un tratamiento de recocido de recocido para continuar conformando plásticamente el material en frío en un proceso multi-etapa [Olokode, 2008].

En el proceso de trefilado secuencial multi-etapa, la microestructura del alambre o hilo metálico evoluciona de forma que se produce un incremento progresivo de las tensiones internas del metal, con la consecuente pérdida de ductilidad. Esto implica el incremento del grado de endurecimiento por deformación plástica en el metal y, como consecuencia, se puede producir la ruptura del alambre o hilo en cualquier momento del proceso. Así, el recocido intermedio entre etapas de estirado es imprescindible, regenera la estructura cristalina del metal eliminando el endurecimiento y las tensiones internas que el metal adquirió durante el estirado [Kang, 2014].

Un caso en el que el tratamiento de recocido entre etapas es absolutamente indispensable se muestra en la Figura 2.19, el hilo de cobre ultra fino empleado para la fabricación de micro-bobinas de inducción que se utilizan en la relojería.



Figura 2.19 Bobina de cobre ultra fino de un mecanismo de reloj.

(<http://miyotamovement.com/>, 2016).

### ➤ **Patentado**

Este tratamiento se aplica generalmente a alambre e hilo metálico de acero y consiste en calentar el material hasta alcanzar su temperatura de recristalización, enfriándolo a una velocidad relativamente rápida [Apraiz, 1949] [Molera, 1991].

La particularidad de este tratamiento es el método de enfriamiento, el cual consiste en un baño de plomo que puede ser aplicado de forma continua entre dos bobinas o por inmersión del rollo de alambre o hilo metálico.

La ventaja de este tratamiento es que, mediante este procedimiento de enfriamiento tan particular, se forman estructuras de grano muy fino que van a favorecer el conformado en frío e incrementan la resistencia del acero. Utilizado en el momento adecuado en la secuencia de etapas del proceso de trefilado, permite conseguir productos estirados de acero con unas muy buenas propiedades mecánicas.

Se trata de un tratamiento de gran importancia en el proceso de trefilado de alambres para la fabricación de resortes, cables de alta resistencia o cuerdas para instrumentos musicales.

### **2.6.3 Condiciones tribológicas**

La consecuencia más evidente de la existencia del rozamiento pieza-herramienta, en un proceso de conformado por deformación plástica como el estirado, es la aparición de un trabajo adicional que afectará directamente sobre el valor final de la tensión mínima necesaria para que el estirado pueda realizarse.

Cuanto mayor sea el valor del rozamiento, mayor va a ser el valor de la tensión requerida para producir el conformado del metal. Por este motivo es primordial reducir al máximo el valor del coeficiente correspondiente al rozamiento entre pieza e hilera durante el proceso. Sin embargo, a pesar de que dicho incremento en la tensión no es un inconveniente fundamental se debe considerar el efecto perjudicial de un excesivo rozamiento, ya que este factor afecta en sobremanera el grado de deterioro de la superficie de contacto en la hilera [Martín, 2009].

El material del que está fabricada la propia herramienta, así como el propio material de la barra a estirar, son factores determinantes y van a influir notoriamente en el valor de dicho coeficiente de rozamiento. Como cabe esperar, tanto la calidad del acabado superficial de la herramienta, en toda la superficie de contacto con la barra, como la calidad de la propia superficie de la materia prima utilizada, implicarán un mayor o menor rozamiento en el proceso.

Para poder controlar el proceso de estirado y minimizar el desgaste de la hilera es indispensable conocer la influencia de todos los factores implicados en el mismo, los cuales afectan tanto al metal estirado como a la propia hilera [Dubar et al., 2006].

Un excesivo rozamiento puede llegar a producir efectos indeseados en la hilera y en la barra estirada, pero este rozamiento, por otro lado, será necesario en su óptima expresión. El conformado plástico del material se produce como consecuencia de la acción de la presión ejercida por la superficie de contacto de la herramienta o hilera contra el material de la barra que se estira, lo cual conlleva un efecto de rozamiento en la interfase. La conclusión es clara y determina que será necesario conocer el valor de dicho coeficiente de rozamiento y aplicar métodos para poder controlarlo.

La lubricación a aplicar en un determinado proceso de conformado por deformación plástica en frío depende de diversos parámetros como el material de la herramienta y el de la pieza, la calidad superficial en ambas, la reactividad química entre ambos materiales, la temperatura, la presión existente en la zona de contacto herramienta-pieza, la velocidad del proceso de estirado. La principal función de una buena lubricación es reducir y mantener estable un valor de rozamiento óptimo durante el proceso de conformado por deformación plástica de manera que se optimizará durabilidad de la herramienta, la calidad del producto estirado y como consecuencia la productividad del proceso [Kalpakjian, 2008]. No obstante, la lubricación también va a cumplir la función de refrigerar y mantener limpia la superficie en la zona de trabajo de la hilera o matriz así como la propia superficie de la barra o alambre. Existen diversos estudios sobre la eficiencia de diversos lubricantes como los aceites grasos [Obi et al, 1996], jabones [Dubois et al., 2002] o [Lazzarotto et al., 1998].

### ➤ **Rozamiento**

Además del consiguiente incremento de la tensión necesaria para realizar el proceso de estirado, las tensiones generadas en la zona superficial del producto conformado a causa del efecto del rozamiento tienen una gran influencia en la fluencia del metal en dicha zona, pudiendo llegar a provocar heterogeneidades, grietas superficiales y otro tipo de defectos en el producto estirado [Martín, 2009].

El modelo de deformación definido para un determinado proceso de conformado por deformación plástica puede verse completamente alterado como consecuencia de un

excesivo valor del rozamiento o variaciones del mismo, de manera que los resultados obtenidos en el análisis del proceso serían distorsionados y erróneos.

La consecuencia más grave de un excesivo valor en el coeficiente de rozamiento sería la adherencia del metal de la barra en la superficie de la hilera. Este fenómeno puede llegar a limitar sensiblemente el intervalo de reducción de sección que será posible realizar en cada una de las etapas de un proceso secuencial de estirado multi-etapa.

El fenómeno de adherencia ocurre más fácilmente en unos metales que en otros y puede producirse de dos formas diferentes. La primera tiene una relación directa con la rugosidad de la superficie de la zona de trabajo de la herramienta que, en ausencia total de lubricante, va a provocar que pequeñas partículas superficiales del material de la barra se desprendan, produciendo imperfecciones y defectos en la superficie del producto estirado. Otra forma de adherencia, más grave aún, se producirá cuando la superficie de la barra pierda su película protectora superficial por la acción de pequeñas partículas de óxido o cascarilla. En este caso el metal queda al desnudo y, por la acción de la presión en la zona de trabajo, tiende a soldarse. Este fenómeno puede llegar a provocar que un trozo de metal de la barra se desgarre, teniendo consecuencias catastróficas en la barra y en la hilera e imposibilitando que el proceso de conformado se pueda realizar con éxito.

En la teoría fundamental del conformado de los metales se conoce como tensión de cizalladura o tensión cortante a la tensión tangencial. Esta tensión es directamente proporcional a la tensión normal, o lo que es lo mismo, a la presión en el caso del proceso de estirado. El coeficiente de rozamiento se define como el cociente entre la tensión cortante y la presión inherente al proceso de estirado.

Para que el fenómeno de adherencia en un metal no se produzca, la tensión tangencial  $\tau$  se debe limitar a un valor igual al límite de fluencia por cizalladura  $k$  de dicho metal y, considerando que el valor mínimo de la tensión normal que se necesita para producir deformación plástica es la tensión de fluencia uniaxial  $Y$  o límite de fluencia del metal, el valor máximo que podrá alcanzar el coeficiente de rozamiento en condiciones de adherencia total será:

$$\mu_{m\acute{a}x} = k/Y \quad (2.5)$$

Por otra parte, según von Mises:

$$2k = 1,155Y \quad (2.6)$$

Sustituyendo se obtiene el valor máximo para el coeficiente de rozamiento:

$$\mu_{m\acute{a}x} = k/Y = 0,577 \quad (2.7)$$

Se debe tener en cuenta que el coeficiente de rozamiento en la interfase puede variar durante el proceso de conformado por deformación plástica, aunque bajo condiciones ideales de lubricación la variabilidad de este es despreciable.

Para realizar cálculos, teniendo en cuenta estos fundamentos sobre conformado por deformación plástica, se puede considerar entonces que la tensión de cizalladura es el producto entre el coeficiente de rozamiento y la presión normal existentes en la superficie de contacto metal-hilera:

$$\tau = \mu p \quad (2.8)$$

El proceso se podrá realizar siempre que dicha tensión no alcance el límite de fluencia por cizalladura  $k$  o lo que es lo mismo siempre que  $\tau < k$ .

La determinación del valor del coeficiente de rozamiento existente en la interfase entre dos materiales conocidos va a ser fundamental para poder realizar los cálculos en base a los fundamentos expuestos anteriormente. Los únicos datos válidos para dicho coeficiente serán aquellos obtenidos de los ensayos realizados bajo las mismas condiciones del proceso objeto del estudio. Para poder determinar el valor del coeficiente de rozamiento existente entre dos materiales son necesarios una serie de ensayos que reproduzcan idénticas condiciones en cuanto a superficies de contacto, condiciones químicas, lubricación, temperatura, velocidad y todo el resto de condiciones de la operación correspondiente al proceso objeto del estudio [Coelho et al., 2008] [Lazzarotto et al., 1997] [Porrello, 2014].

### ➤ **Lubricación**

La lubricación es un parámetro importantísimo en el proceso de estirado en frío, determinante en la productividad del proceso y en la calidad óptima del producto final estirado, así como en la duración de las herramientas.

Existen diferentes métodos de lubricación y tipos de lubricante [Schey, 2002], cuya elección debe determinarse en función del tipo y la geometría de la materia prima, la reducción que se pretende realizar, y las especificaciones del cliente.

Una vez que el sistema de lubricación está definido, es primordial conseguir un rendimiento constante para asegurar que las condiciones óptimas se mantienen durante todo el proceso. Resultados de diversos experimentos [Radojevic et al., 2000] [Muskalski, 2014] confirman que una lubricación óptima y un control continuo durante el proceso de estirado [Chiduiwa et al., 2013] van a propiciar valores más pequeños en la tensión de estirado, evitando de esta forma roturas innecesarias.

Existen interesantes estudios en los cuales se analiza la efectividad de diversos tipos de lubricantes, en base al tamaño de las partículas que los componen y su efecto en el

valor de la fuerza de estirado, además de considerar los defectos producidos sobre la superficie del alambre estirado [Byon et al., 2011].

La denominada lubricación hidrodinámica (véase Figura 2.20) es el caso ideal de lubricación, caso en el que el material de la barra o hilo estirado se mantiene separado de la superficie de contacto por una fina película de lubricante. Esta separación, que reduce la fricción y el desgaste de la herramienta, es función de la viscosidad del lubricante y la velocidad del proceso de estirado [Hosford et al., 2007] [Gur'yanov, 2015]. Un alto grado de viscosidad del lubricante combinado con elevadas velocidades de proceso va a propiciar unas condiciones óptimas de lubricación hidrodinámica.

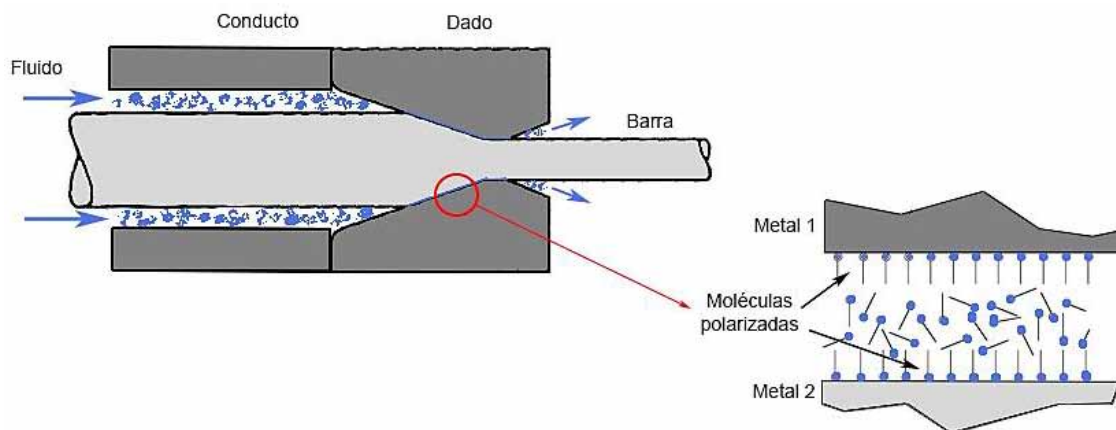


Figura 2.20 Lubricación hidrodinámica en el estirado [Hosford et al., 2007].

Recientes estudios demuestran la eficacia de este tipo de lubricación, mediante la cual es posible obtener una distribución de tensiones más homogénea en toda la sección del producto estirado, aspecto reflejado en la disminución del valor de la deformación efectiva en la zona cercana a la superficie y el incremento de ésta en la zona más cercana al eje [Muskalski, 2014].

Esta condición permite mejorar el proceso secuencial de estirado multi-etapa, ya que hace posible la disminución del efecto del rozamiento en la interfase. Hace posible combinar una disminución del semiángulo  $\alpha$  y un aumento de la ratio de reducción por pasada, siempre hasta un cierto límite, dando como resultado un perfil de tensiones más homogéneo en la sección transversal del metal estirado [Fabík, 2013].

Los jabones, grasas, polvos de grafito y aceites emulsionados en agua son empleados habitualmente en el estirado de aceros, proceso en el cual se requiere de un mayor poder de refrigeración. Aceites vegetales, grasas animales y emulsiones de alta concentración son aplicados en el estirado de metales no ferrosos como el cobre, el aluminio y sus aleaciones, ya que estos metales necesitan de una mayor acción lubricante para reducir problemas generados por el rozamiento.

Además de los típicos lubricantes, se emplean también sólidos como el teflón o el polietileno. Este tipo de materiales poliméricos, junto con otro tipo de materiales

como el grafito o el di-sulfuro de molibdeno, tienen la capacidad de crear una película sólida que actúa como lubricante sólido entre las superficies en contacto.

Existen lubricantes grasos que, al reaccionar con la superficie metálica, crean una lámina jabonosa de separación hidrostática en la interfase hilera-barra.

La elección del método de lubricación y el lubricante más apropiado a cada proceso, fundamental para el éxito del mismo, debe realizarse considerando las condiciones tecnológicas del mismo, así como las características y propiedades del material a estirar [Stepina et al.,1992], [Lazzarotto et al., 1998], [Mang et al., 2007].

Los tipos de lubricantes comúnmente empleados en los procesos de conformado por deformación plástica en frío se presentan en la Tabla 2.7, a continuación:

Tabla 2.7 Diversos valores del coeficiente de rozamiento  $\mu$  [Schey, 2002].

<b>Material</b>	<b>Lubricante</b>	<b><math>\mu</math></b>
Aleaciones de Sn, Pb, Zn	FO	0,05
Aleaciones de Al	FA/MO	0,03
Aleaciones de Cu	MO	0,03
Aceros	JB + PH	0,03
Aceros Inoxidables	JB + PH/CL/MO	0,05
Aleaciones de Titanio	PL	0,1

CL = Parafina clorada.

JB = Jabón.

FA = Ácidos y alcoholes grasos, por ejemplo, ácido oleico, ácido esteárico.

FO = Aceites grasos, por ejemplo, aceite de palma y aceite sintético de palma.

MO = Aceite mineral.

PH = Fosfatos.

PL = Polímeros.

#### **2.6.4 Temperatura**

En el estirado en frío, en el cual el conformado plástico del material se realiza a temperatura ambiente, se va a generar un calor como consecuencia del trabajo aplicado y de la fricción en la interfase hilera-pieza. La distribución de temperatura en ambas, barra e hilera, afectará al grado de expansión térmica, al patrón de deformación y a la recuperación elástica del material. Este factor tiene consecuencias directas en las características y propiedades del producto final conformado [Changsun et al., 2012].

El trabajo originado por la tensión de estirado aplicada, unido a las condiciones tribológicas existentes en interfase del proceso de estirado, produce un incremento de temperatura en la zona en la cual se produce la deformación. La efectividad del sistema de lubricación va a depender en gran medida de la temperatura que se llega a alcanzar en la interfase. Por lo tanto, se puede afirmar que el aumento de la temperatura en la zona de deformación va a depender directamente del coeficiente de rozamiento entre los materiales [Martín, 2009].

La distribución de temperatura en el proceso secuencial de estirado condiciona los efectos de la fricción en la interfase, en función de la temperatura inicial del metal y la hilera, el incremento de temperatura por deformación producido y la conductividad térmica o capacidad para absorber y disipar el calor del material de la hilera, la barra o alambre procesado y el entorno [Kobayashi et al., 1989] [Haddi et al., 2011].

El empleo de un sistema de lubricación eficiente va a significar una reducción considerable en el incremento de la temperatura en la zona de la interfase durante el proceso de estirado y, en consecuencia, llevará a un importante ahorro en el consumo de energía del mismo. La eficiencia energética es un factor determinante en cualquier proceso de conformado por deformación plástica, como es el caso del estirado, ya que se trata de una cuestión muy importante a la hora de valorar si el proceso es viable económicamente, teniendo en cuenta la competitividad del mercado actual.

La temperatura es un factor determinante a la hora de diseñar un proceso secuencial de estirado multi-etapa. La tensión mínima de estirado a aplicar en el extremo de la barra o alambre va a ser función de la temperatura existente en la zona de la interfase durante el proceso de estirado, de ahí el interés de establecer un modelo de análisis y diseño del proceso secuencial que incluya la influencia de este factor.

Diversos estudios consultados [El-Domiaty et al., 1998] [Sang-Kong et al., 2010] proponen un modelo para el cálculo del incremento de temperatura en la interfase barra-hilera producido durante el proceso de estirado de hilo metálico, para diversos materiales. Éstos ofrecen resultados satisfactorios que corroboran la aplicabilidad de dicho modelo, permitiendo determinar los parámetros iniciales óptimos que satisfacen un incremento mínimo en la temperatura con el consiguiente ahorro de energía.

No obstante, y dada la gran complejidad que supondría implementarlo, en el presente trabajo no se ha considerado la influencia del factor temperatura. Para el desarrollo de la metodología que se propone y para los casos estudiados, se asume el supuesto de condiciones de temperatura ideal o proceso isotérmico, bajo las cuales la temperatura ambiente es la temperatura inicial y se mantiene estable en todo proceso.

En un proceso de estirado secuencial multi-etapa, cuando el sistema de lubricación es suficientemente eficiente y se utilizan velocidades en un rango adecuado, el valor de la temperatura del metal en la zona de deformación en el interior de la hilera se

estabiliza pasado un determinado tiempo [Changsun et al., 2012], de forma que el proceso es isotérmico estacionario. Esta condición permite además minimizar la cantidad de calor generado en dicha zona, reduciendo la influencia de este fenómeno en las condiciones de fricción existentes en la interfase [Vega et al., 2009].

Cuando un incremento importante de temperatura en la interfase se produce, el valor del coeficiente de rozamiento  $\mu$  en ésta se ve incrementado en función de gradiente de temperatura y del factor fricción o de lubricidad  $m$  [Kobayashi et al., 1989], el cual que determina las características del sistema tribológico metal-lubricante-hilera.

El incremento de temperatura en dicha zona se reducirá cuando la capacidad del sistema de lubricación sea mayor, de forma que será posible incrementar el rango de velocidades y con ello la productividad [Chiduwa et al., 2013].

La metodología propuesta asume condiciones ideales, con lo cual el factor de fricción  $m$  es nulo, manteniéndose el coeficiente  $\mu$  de rozamiento inalterable. La aplicabilidad de ésta tiene validez cuando el sistema de lubricación es capaz de absorber el calor generado durante el proceso, lo cual será factible siempre que se trabaje en el rango de velocidades convencionales óptimas, debiendo tener especial cautela con los resultados obtenidos cuando se implique una alta velocidad de producción.

#### **2.6.5 Velocidad**

La velocidad de avance del material a su paso por la hilera determina la velocidad del proceso de estirado de una barra o alambre. Se trata de un factor que va a influir en gran medida en la eficiencia general del proceso y en el desgaste de la herramienta.

Dependiendo de la velocidad del proceso, va a existir un determinado incremento de la temperatura en la zona donde se produce el conformado plástico del material, incremento de temperatura que va a hacer que las condiciones de rozamiento en la interfase se alteren notablemente. Como se ha demostrado en diferentes estudios [Haddi et al., 2011], existe un rango de velocidades para el proceso en el que el incremento de temperatura, debido al efecto del rozamiento en la interfase, es mínimo y controlable mediante un sistema de lubricación apropiado que mantendrá estables las condiciones de rozamiento durante el proceso de estirado.

Para maximizar la productividad en el proceso se debe incrementar al máximo la velocidad del mismo, sin que se produzcan roturas o empeore la calidad del producto.

En un proceso de estirado secuencial multi-etapa, la velocidad del proceso en cada una de las etapas se incrementa a medida que el diámetro del producto estirado disminuye. En la Tabla 2.8 se muestran las velocidades más habituales que se aplican en el proceso de estirado de diversos metales [Tschaetsch, 2005].

Tabla 2.8 Velocidades de estirado habituales [Tschaetsch, 2005].

<b>Material</b>	<b>Tensión rotura <math>R_m</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b><math>v</math> [m/s]</b>
Acero	400	20
	800	15
	1300	10
Cobre (recocido)	250	
Latón, Bronce	400	25
Aluminio (recocido) y aleaciones	80-100	

En las etapas finales del estirado secuencial multi-etapa de acero con alto contenido de carbono pueden llegar a alcanzarse velocidades de hasta 1000 m/min. Estas altas velocidades implican un incremento de temperatura significativo en la zona de deformación, interfase entre material y herramienta de estirado, con las consiguientes consecuencias en las condiciones de rozamiento del proceso.

La velocidad de estirado aplicada a la secuencia de etapas del proceso multi-etapa también va a tener un efecto significativo sobre las propiedades mecánicas en algunos aceros, aunque su influencia sobre estas propiedades no es tan notable como la que implica la ratio de reducción [Çetinarslan et al., 2012] [Suliga et al., 2015].

Un aumento en la velocidad del proceso produce un incremento en el endurecimiento por deformación. La resistencia a la tracción del producto obtenido aumenta, pero también lo hace la temperatura del material. Como se ha mencionado antes, este fenómeno puede ser contraproducente, pudiendo llegar a generar un endurecimiento excesivo que produzca la fragilización del metal hasta el punto de romperse [Prakash et al., 2012]. Por otro lado, a velocidades de estirado más altas se obtienen mejores resultados en la calidad superficial del producto estirado.

El empleo de altas velocidades es muy habitual en el proceso de trefilado o estirado de hilo metálico, ya que así es posible obtener mayores tasas de productividad.

La mayor o menor influencia de la velocidad en las propiedades mecánicas del acero trefilado también es función del contenido en carbono, siendo esta mayor cuanto mayor es el contenido en este elemento [Gálvez et al., 2001]. Es conocido que las altas velocidades de deformación afectan de manera muy notable a las propiedades del material estirado, sobre todo en el caso de los aceros [Gálvez et al., 2002].

La propuesta de Vega, Imad y Haddi [Haddi et al., 2011], en la que se considera el coeficiente de fricción como función de la temperatura, demuestra que el incremento de la temperatura en la zona de deformación tiene una relación directa con la velocidad a la que se realiza el proceso de estirado y, consecuentemente, influye en el valor final de la tensión de estirado. Dicho estudio que ofrece una mejora del modelo que tiene origen en otros posteriores realizados por Avitzur y varios [Avitzur, 1964] [Vega et al., 2009] [de Castro et al., 1996], en los cuales se consideraba la tensión de

estirado como función del ratio de conformado de la sección, el semi-ángulo de la herramienta y las condiciones de rozamiento existentes en la interfase, pero independiente de la velocidad del proceso de estirado.



Figura 2.21 Factores de influencia en el proceso de estirado (elaboración propia).

En definitiva, en cada una de las etapas de la secuencia de estirado es necesario conseguir, conocer y controlar las condiciones de fricción óptimas en la zona de la interfase, pero sería ideal disponer de un modelo que permitiese determinar la máxima velocidad posible en el proceso de estirado, velocidad tal que la temperatura originada en la zona de deformación no modifique dichas condiciones de rozamiento.

Un modelo completo e ideal para el cálculo de la tensión necesaria para realizar el proceso de estirado debería considerar la influencia de los parámetros rozamiento, velocidad y temperatura que además interactúan entre sí junto con la influencia de cada uno de los diferentes parámetros que definen la geometría de la herramienta.

Para el desarrollo de la metodología que se propone en este trabajo se despreciará la influencia del factor velocidad a la hora de definir el diseño geométrico de la secuencia de etapas. Siempre que se trabaje dentro del rango de velocidades que permitan que el sistema tribológico se mantenga estable, la velocidad del proceso no afectará a las propiedades del metal estirado y, por lo tanto, tampoco influirá en el diseño geométrico de las etapas del proceso de estirado secuencial.

Como se ha indicado anteriormente, la velocidad es un factor capaz de alterar las condiciones del proceso, por ello se deben acotar los resultados obtenidos en esta tesis. Para el desarrollo de la metodología que se propone y para los casos estudiados se debe tener en cuenta que el proceso se realiza en condiciones de temperatura ideal o proceso isotérmico, condiciones bajo las cuales la temperatura ambiente es la temperatura del proceso, los efectos de la velocidad están controlados o son despreciables y no producen alteración térmica significativa que perturbe las condiciones de fricción en la interfase. El parámetro tecnológico velocidad será únicamente utilizado al efecto de los cálculos de potencia y consumo energético.

## **2.7 Métodos para el análisis de procesos de conformado por deformación plástica**

El método analítico es aquel método de investigación que consiste en la descomposición de un problema o fenómeno, separándolo en todas y cada una de las partes o elementos más simples que lo constituyen. Esta simplificación permitirá observar y conocer las variables que intervienen en dicho problema, su naturaleza y su influencia. El análisis consiste en la observación y el estudio del fenómeno en unas condiciones particulares haciendo posible explicar su funcionamiento, hacer analogías, comprendiendo mejor la influencia de cada una de las variables que en él intervienen y permitiendo el establecimiento de nuevas teorías.

### **2.7.1 Fundamentos para el análisis de un proceso de conformado por deformación plástica**

En los procesos de conformado plástico de metales se producen fenómenos físicos de gran complejidad que complican su análisis, tanto desde el punto de vista teórico como su propio tratamiento matemático. Es por ello que se establecen una serie de hipótesis y reglas para simplificar el desarrollo analítico de los mismos.

Las hipótesis que comúnmente se consideran en el análisis de estos procesos son:

- Incompresibilidad del material
- Comportamiento rígido-plástico con ausencia de endurecimiento del material.
- Estructura homogénea del material.
- Deformación homogénea.
- Consideración de deformación plana o axisimétrica.
- Ausencia de rozamiento (o considerado de valor constante).
- Se desprecian los efectos a causa de la velocidad de deformación.
- Ausencia de variaciones de temperatura.

Las reglas fundamentales que se siguen generalmente para el estudio analítico de un proceso de estas características son:

- Las ecuaciones diferenciales de equilibrio para el tensor de esfuerzos deben de satisfacerse en todo punto del cuerpo deformado (homogeneidad).
- Debe darse la continuidad del flujo de material durante todo el proceso, es decir, el volumen ha de mantenerse constante (conservación de masa).
- Las relaciones entre esfuerzos internos y flujo de material en los metales reales no son completamente conocidas y normalmente se trabaja siguiendo el comportamiento del material definido por von Mises [von Mises, 1913] de

forma que, para un metal, la relación entre el tensor desviador y las deformaciones han de mantenerse durante el conformado plástico.

- Las condiciones de contorno deben ser satisfechas, incluyendo la influencia del rozamiento sobre la superficie de contacto entre pieza y herramienta.

Cuando estas cuatro reglas se cumplen se puede afirmar que la solución completa y única obtenida en el estudio analítico determina un modelo correspondiente al estado de tensiones y de esfuerzos de todo el sistema.

Un modelo analítico basado únicamente en la consideración del trabajo originado por la deformación plástica homogénea ( $W_H$ ) se podrá emplear cuando la carga se aplica directamente a toda la sección transversal de la pieza, como es el caso de la tracción uniaxial. Este modelo dejará de ser fiable para cualquier proceso en el que la influencia del rozamiento sea significativa, como por ejemplo la forja abierta.

El trabajo originado por efecto del rozamiento ( $W_F$ ) puede llegar a tener una repercusión significativa en un proceso de conformado por deformación plástica. Un completo análisis del equilibrio de esfuerzos que actúan sobre el material durante el proceso de conformado permite considerar los efectos de dicho fenómeno de rozamiento originado por deslizamiento.



Figura 2.22 Componentes principales del trabajo en un PCDP (elaboración propia).

En el estirado, se ha demostrado que el cálculo del trabajo considerando únicamente deformación homogénea y tensiones infravalora de forma significativa las cargas de trabajo ya que no tiene en cuenta el trabajo adicional, cuyo origen está en la propia naturaleza de la deformación producida ( $W_R$ ). La forma cómo se produzca esa deformación determina un mayor o menor trabajo adicional en el proceso. El trabajo total realizado ( $W_T$ ) incluirá las tres componentes citadas, tal y como puede verse en la Figura 2.22 y Figura 2.23.

Cabe reseñar que el trabajo adicional ( $W_R$ ) tiene su origen en los esfuerzos de cizalladura internos existentes en el proceso de conformado plástico, causados por el rozamiento interno. Esta componente no puede ser analizada únicamente desde un punto de vista tensional, por lo que se debe recurrir a métodos que tengan en cuenta la forma en que el material fluye durante el proceso, es decir, la distribución de la deformación además de la distribución de tensiones.

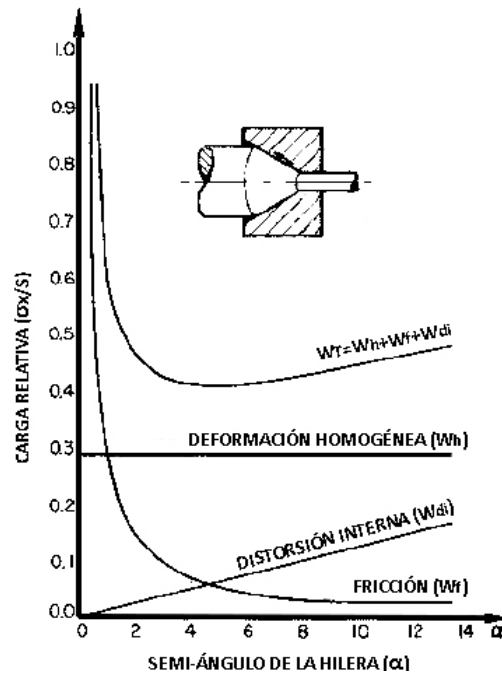


Figura 2.23 Contribución de las diferentes energías del proceso a la carga final de estirado en función del semi-ángulo  $\alpha$ . [Avitzur, 1983] [Peña, 2008].

La combinación de las herramientas teóricas existentes para la modelización del medio continuo, junto con la caracterización del mismo, que en el caso presente sería el comportamiento plástico de los metales en el proceso de conformado por deformación plástica de los mismos, y con la asunción de determinadas hipótesis simplificadoras, permite diferenciar los métodos analíticos habitualmente empleados para el estudio de los procesos de conformado por deformación plástica frente a otros métodos tales como los métodos numéricos, los semiempíricos, o los puramente experimentales.

De entre todos estos métodos de análisis, son dos los que no consideran la influencia de la distorsión interna del material que se produce durante el proceso y se limitan a analizar las componentes del trabajo de deformación homogénea y el rozamiento de deslizamiento. Los resultados obtenidos por estos dos métodos se corresponden, por tanto, con un límite inferior o condición de carga mínima necesaria para producir la deformación. Estos dos métodos son el método de la deformación homogénea y el método de análisis local de tensiones.

Tanto el método de análisis del campo de líneas de deslizamiento, así como la teoría del límite superior se fundamentan en la magnitud y las direcciones del campo de velocidades de la deformación aplicada, sin necesidad de entrar en el análisis de los desplazamientos incrementales del material deformado. Son métodos que ofrecen resultados muy precisos y acordes con los resultados reales, considerando los efectos del rozamiento y los originados por las distorsiones internas y el endurecimiento que el material sufre durante el proceso.

Todos los métodos analíticos mencionados se aplican generalmente, entre otros, a los procesos de conformado por deformación plástica realizados en frío. Esta característica permitirá desprestigiar, bajo condiciones ideales de velocidad y lubricación como se ha explicado anteriormente, la componente de energía debida a los efectos del gradiente de temperatura que eventualmente se produciría en la interfase.

Los métodos numéricos, entre los que se incluye el análisis de elementos finitos, sí permiten considerar tanto los efectos producidos por el endurecimiento del material como los causados por las condiciones térmicas del proceso.

A continuación se describen de forma más detallada cada uno de los principales métodos de análisis aplicables a los procesos de conformado por deformación plástica.

### **2.7.2 Método de la deformación homogénea**

Método que permite la determinación de las cargas de trabajo mediante la única consideración de la acción de las tensiones que actúan sobre la pieza, sin tener en cuenta el rozamiento en la interfase pieza-herramienta ni tampoco el endurecimiento provocado en el material conformado. El resultado obtenido va a ser únicamente en base a la consideración del trabajo originado por la deformación plástica homogénea del material ( $W_H$ ). Este modelo acepta la hipótesis de que las secciones rectas antes de la deformación permanecen rectas una vez deformado el material.

Si se considera la hipótesis anterior y se analiza la tracción simple (véase Figura 2.24) de un cilindro como proceso que evidencia la ausencia total de rozamiento, para observar la deformación plástica de un material, se puede afirmar que cualquier elemento cúbico de material se transforma en un elemento paralelepípedo tras la deformación plástica.

Se trata de un método que ofrece un resultado sencillo, pero bastante alejado de la realidad en casi todos los procesos, exceptuando el caso ideal de tracción uniaxial simple. En este caso las tensiones principales para un punto cualquiera serán:

$$\sigma_1 = Y, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0 \quad (2.9)$$

La tensión de fluencia  $Y$  corresponderá a una deformación  $\epsilon$  para una sección transversal  $A$  y una longitud  $l$ . El incremento del trabajo, correspondiente a un incremento de la longitud durante la deformación, es entonces:

$$\Delta W = (Y \cdot A) \cdot \Delta l \quad (2.10)$$

$$\frac{\Delta W}{V} = \frac{\Delta W}{A \cdot l} = \frac{Y \cdot A \cdot \Delta l}{A \cdot l} = Y \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (2.11)$$

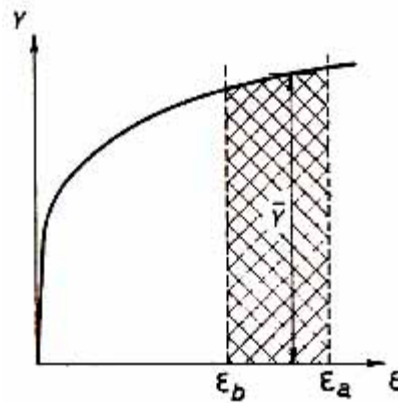


Figura 2.24 Curva tensión-deformación. Tensión de fluencia media y trabajo de deformación en un proceso ideal de tracción uniaxial simple [Rowe, 1972].

Integrando entre la longitud inicial y la final se obtiene la fórmula del trabajo para el proceso ideal de tracción uniaxial simple (véase Figura 2.24):

$$\frac{W}{V} = \int_{l_0}^{l_1} Y \cdot \frac{dl}{l} = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_1} Y \cdot d\varepsilon = \bar{Y} \cdot \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \bar{Y} \cdot \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (2.12)$$

### **2.7.3 Método de análisis de las tensiones locales (*Slab method*)**

A igual que el modelo anterior, permite determinar las potencias de trabajo requeridas para conformar plásticamente el material mediante el estudio del estado de equilibrio de las tensiones que actúan sobre el mismo, considerando además el efecto del rozamiento de deslizamiento, rozamiento de Coulomb, entre pieza y herramienta.

Esta hipótesis de rozamiento complementa el estado de esfuerzos más simplificado, suponiendo que las direcciones principales de los esfuerzos coincidirán con los ejes principales del sistema plano, además de no considerar el rozamiento por adherencia ni las variaciones existentes en la tensión de fluencia del material conformado, la cual se considera constante durante todo el proceso. Tampoco se considera el efecto de la distorsión interna que sufre el material que es conformado plásticamente.

Este método supone que el trabajo total ( $W_T$ ) del proceso incluye solamente las componentes del trabajo de deformación homogénea ( $W_H$ ) y del rozamiento de Coulomb ( $W_F$ ), sin tener en cuenta los efectos producidos como consecuencia del endurecimiento por deformación. La ventaja principal de este método está en que se trata de componentes analizables desde un punto de vista puramente tensional.

Se puede intuir por otro lado que, al no considerar la influencia del trabajo adicional ni los efectos provocados por el endurecimiento que el material conformado sufre al ser procesado, el resultado obtenido mediante la aplicación del método de análisis local de tensiones en un proceso de conformado por deformación plástica va a constituir un

límite inferior mediante el cual se define el valor mínimo de la carga necesaria para producir la deformación deseada [Osakada, 2008].

La forja abierta podría considerarse el proceso de conformado por deformación plástica más básico (véase Figura 2.25). Análogamente, las principales componentes de trabajo en el estirado, debidas a la deformación homogénea y al rozamiento, suponen más del 50% del trabajo total invertido. Por este motivo se ha decidido que este sea el método analítico en el cual se fundamente la metodología propuesta en este trabajo.

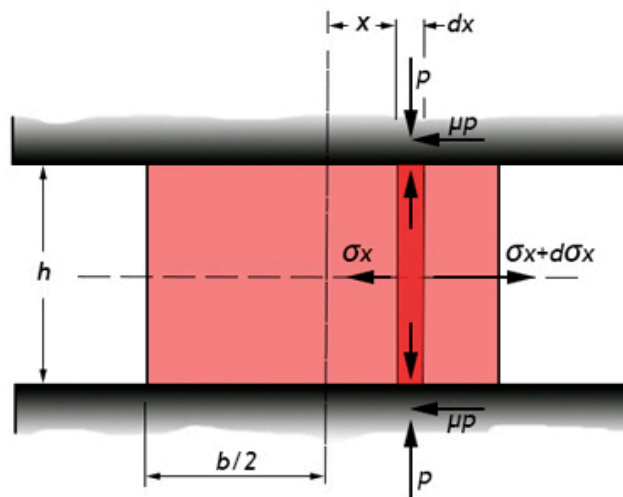


Figura 2.25 Modelo para el análisis local de tensiones en forja de [Siebel, 1923].

#### **2.7.4 Método del campo de líneas de deslizamiento (*Slip line field method*)**

Este método, basado en los dos anteriores, define un campo de líneas de deslizamiento o de cizalladura pura como un diagrama vectorial ortogonal de dos dimensiones en las que se representan las direcciones de los esfuerzos cortantes máximos o direcciones de deslizamiento, para cualquier punto del material.

En un caso sencillo, estas líneas serán todas rectas formando un sistema cartesiano [Johnson, 1978]. Sin embargo, esto no tiene porqué ser así ya que, habitualmente, se emplea un sistema de líneas radiales y cuadrantes de círculo que se parece a lo que sería un sistema de coordenadas polares.

Las líneas de deslizamiento constituyen un mapa o red bidimensional mediante la que se representan las direcciones de los esfuerzos cortantes máximos del material plástico deformado. Esta red permite conocer el valor de dicho esfuerzo cortante en un punto cualquiera del cuerpo que se está conformando plásticamente, tal y como se puede ver en los dos ejemplos representados en la Figura 2.26, incluso en casos en los que la deformación no es homogénea.

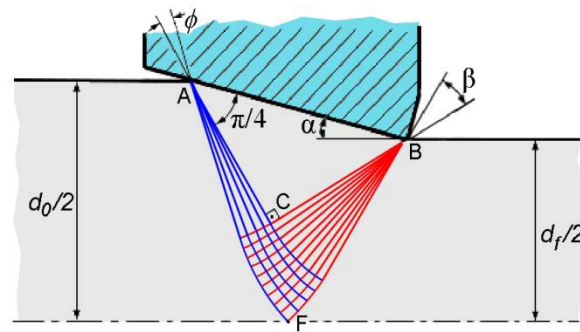


Figura 2.26 Campo de líneas de deslizamiento en el estirado [Sebastián et al., 1979].

En el caso del estudio del CLD en el estirado, los ángulos formados en los abanicos  $\phi$  y  $\beta$  deben trazarse de manera que las tangentes a las líneas de deslizamiento en el punto F formen un ángulo de  $45^\circ$  respecto del eje del alambre o barra, eliminando así la existencia de esfuerzos cortantes en dicho eje [Sebastián et al., 1979].

Efectuando el desarrollo matemático de este modelo se obtienen las ecuaciones de Hencky [Hencky, 1923], mediante las que se puede determinar la presión hidrostática para cualquier punto del cuerpo deformado a partir de la curvatura de las líneas de deslizamiento, siempre que el valor de la constante  $k$  sea conocido. Esta se calcula a partir de las condiciones de equilibrio en uno de los límites y, como con la teoría de la deformación homogénea, se consideran condiciones de deformación plana.

Los campos de deslizamiento ofrecen una herramienta extremadamente rigurosa, aunque compleja, ya que el diseño de dicho campo se fundamenta en la experiencia previa. Además, su aplicación está limitada a los casos en los cuales se cumple la condición de deformación plana, por lo cual se trata de una herramienta de difícil aplicación en muchos procesos de conformado por deformación plástica.

### **2.7.5 Método del límite inferior (*Lower bound method*)**

Una carga calculada, para un sistema en equilibrio que cumple con la condición de plasticidad y con las hipótesis asumidas en el modelo de estudio de procesos de conformado por deformación plástica de los metales, será un límite inferior de la solución del sistema cuando su valor es igual o inferior a la carga límite o mínima carga necesaria para producir dicha deformación plástica.

Este concepto de un límite inferior va asociado con el principio de trabajo máximo. La distorsión causada por la tensión aplicada es tal que provocará una disipación máxima de energía o, lo que es lo mismo, el sistema tiende a alcanzar un estado de energía mínima compatible con las condiciones de equilibrio y de deformación plástica.

En consecuencia, cualquier otro sistema de tensiones estáticamente admisible producirá un incremento de trabajo que, como máximo, será igual o inferior al producido por el sistema real. Así, el resultado obtenido a partir del equilibrio de tensiones será insuficiente, o como mucho suficiente para llevar a cabo la operación.

Este método no considera la velocidad ni la deformación y su resultado va a ofrecer siempre un valor, como máximo, igual a la carga mínima requerida para llevar a cabo la operación en la práctica real [Dieter et al., 2003].

Un ejemplo claro de método analítico en el que se considera el límite inferior o la carga mínima necesaria para que el proceso pueda llevarse a cabo es el método de análisis local de tensiones, método analítico que se utiliza como base en la metodología desarrollada en la presente tesis.

### **2.7.6 Método del límite superior (*Upper bound method*)**

A diferencia del límite inferior, el estudio del límite superior implica el conocimiento de las condiciones que se han de cumplir durante el conformado de un cuerpo plástico perfecto y no se ocupa del equilibrio de las tensiones. Además, como el material se considera incompresible, el volumen se mantendrá constante durante todo el proceso.

Según el principio de trabajo máximo, un elemento se va a deformar ofreciendo una resistencia máxima a la fuerza que produce dicha deformación de manera que, para el estado tensional correspondiente a una determinada deformación cinéticamente válida, la presión calculada será siempre mayor que la presión real necesaria. El caso particular en el cual se establece el campo real de líneas de deslizamiento es la única solución en la que el valor de carga calculado será igual a la carga real requerida para producir dicha deformación [Martín, 2009].

Para obtener una solución aceptable en el cálculo de la fuerza necesaria para deformar un material plásticamente se requiere un conocimiento previo de los factores que intervienen en el proceso. Hay que conocer las propiedades mecánicas del material deformado y las condiciones de fricción, pero es especialmente importante la geometría y el flujo del material durante el proceso de conformado plástico, ambos en términos de dirección y velocidad [Martín et al., 2013].

Este método permite calcular un valor límite superior de la carga mínima necesaria en la operación real que, combinado con el cálculo del límite inferior, permitirá acotar el valor de la presión necesaria para el proceso entre un mínimo y un máximo.

El límite superior es, por lo tanto, entre los teoremas del límite, el más valioso para el estudio y análisis de los procesos de conformado plástico de metales, ya que permite determinar el valor de la carga de trabajo mínima que realmente opera al realizar la operación.

### **2.7.7 Método de los elementos finitos (*MEF*)**

Este método de numérico general, comúnmente empleado en la resolución de una aproximación de soluciones de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, es ampliamente utilizado para el análisis de diversos problemas de ingeniería y física.

El denominado método de los elementos finitos o FEM (*Finite Element Method*) está pensado para ser usado en computadoras, permitiendo resolver un sistema de ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico complejo. El MEF se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad y naturaleza de los problemas a los que puede aplicarse es muy extensa, siendo requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano.

Frente a los demás métodos analíticos, el MEF, que inició su desarrollo a finales de la década de los cincuenta, nace con el objetivo principal de resolver problemas estructurales surgidos de la evolución de la tecnología aeronáutica. Posteriormente propició grandes avances en la ingeniería civil y en la actualidad se aplica en tecnologías de muy diferente ámbito, entre estas el estudio y análisis de los procesos de conformado por deformación plástica de los metales.

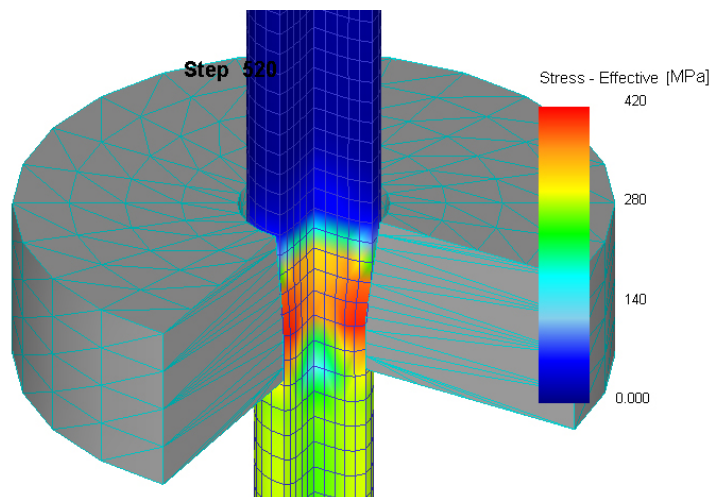


Figura 2.27 Distribución de tensiones en la malla de elementos finitos correspondiente a una barra durante el proceso de estirado (elaboración propia-*Deform3D*).

La discretización del sistema continuo o estructura objeto del análisis en una malla de elementos interconectados en nodos, como la de la Figura 2.27, es el fundamento de este método. Conociendo las funciones matemáticas que rigen el comportamiento de cada elemento es posible conocer la evolución de la malla que constituye el sistema, sometido a un sistema de cargas bajo condiciones de contorno conocidas.

En la actualidad, debido al desarrollo en el ámbito de la informática y los ordenadores, este método está generalizado para la resolución de todo tipo de problemas estructurales, aunque es comúnmente empleado en el estudio de sistemas continuos, ya sean de naturaleza tridimensional (volúmenes) o bidimensional (superficies). Gracias a la evolución exponencial de las capacidades de cálculo de los actuales ordenadores, este método ha desarrollado tal grado de precisión que permite obtener resultados exactos para el análisis de todo tipo de parámetros y procesos.

El método de los elementos finitos, implementado por diferentes empresas en potentes aplicaciones informáticas comerciales como *Abaqus*, *Ansys* o *Deform2D*, es en la actualidad una herramienta de gran utilidad para el análisis de los procesos de conformado por deformación plástica. Este hecho se corrobora en diversos trabajos que lo utilizan para estudiar la influencia de los diferentes parámetros y la evolución de fenómenos que ocurren en el proceso de estirado.

Parámetros y fenómenos tales como la tensión y la carga necesarias para el estirado [Luis et al., 2005] [Morales et al., 2008], la tensión de retroceso [Camacho, 2005], la fractura [Milenin et al., 2008], la evolución de defectos [Xu et al., 2009], la geometría de la hilera [Kesavulu et al., 2014], la velocidad [Hassan et al., 2015] [Cunningham, 2008] o incluso la temperatura [Chen et al., 2007] han sido estudiados utilizando el método de los elementos finitos.

Actualmente se comercializan diversos paquetes informáticos que implementan el método de análisis numérico de los elementos finitos y ofrecen buenos resultados para el análisis del proceso de estirado [Morales, 2007]. Más adelante se entrará en detalle sobre *Deform2D*, aplicación informática para la resolución de problemas por el método de los elementos finitos desarrollada especialmente para el análisis y estudio de procesos de conformado por deformación plástica.

### **2.7.8 Métodos experimentales: empíricos y semi-empíricos**

Después de revisar los diferentes métodos analíticos que existen para estudio de los procesos de conformado por deformación plástica, es importante hacer mención de los métodos experimentales.

La metodología experimental es muy utilizada en la práctica, aunque es mucho más laboriosa y costosa que la metodología analítica. Se trata de un procedimiento en el cual se realizan ensayos reales empleando los materiales y equipos necesarios para la realización del proceso y las mediciones.

En esta metodología se diferencian dos variantes: el método empírico y el método semi-empírico.

Mediante el método empírico se obtienen los resultados directamente de los ensayos realizados en unas condiciones concretas y por lo tanto no son extrapolables a otros casos en los cuales cualquiera de las condiciones y parámetros del proceso objeto del análisis se modifique. Los resultados obtenidos mediante este método son muy interesantes cuando lo que se pretende es analizar un proceso bajo unas condiciones muy específicas.

Un ejemplo en cuanto a resultados experimentales bien fundamentados sobre el análisis del proceso de estirado son los obtenidos por J. Wistreich [Wistreich, 1955]. En

dicho estudio se realizaron una serie de ensayos, considerando el estirado de alambre de sección circular mediante hileras de estirado cónicas, a bajas velocidades y sin considerar la fuerza de retroceso o “backpull”, para conseguir mediciones de parámetros tales como la fuerza de estirado, la presión media en la superficie de la hilera o el valor medio del coeficiente de rozamiento en la zona de contacto. Se trata de uno de los primeros y más completos estudios realizados sobre este proceso y en él se concluye, por ejemplo, que durante el proceso se produce el abultamiento del alambre antes de su entrada en la hilera y una disminución de su sección a la salida de la misma cuando se un trabajo adicional excesivo en el proceso de estirado.

En los métodos semi-empíricos se obtienen unos resultados iniciales a partir de los experimentos realizados para, con ayuda del desarrollo posterior de procedimientos y/o expresiones matemáticas que describan fielmente el sistema, obtener nuevos resultados para el análisis del mismo tipo de proceso bajo diferentes condiciones.

Los métodos de análisis llamados semi-empíricos y empíricos que, a diferencia de los métodos analíticos, se apoyan en la experiencia previa, así como en los resultados obtenidos previamente mediante los propios métodos experimentales, han sido empleados tradicionalmente y se emplean actualmente en la industria, aunque están muy bien complementados, incluso en algún caso sustituidos, por aquellos fundamentados en la simulación numérica.

## **2.8 El método de análisis local de tensiones aplicado al estirado**

En este apartado se inicia un estudio cronológico, con el fin de documentar cronológicamente las bases del método analítico que se aplica en el presente trabajo, avanzando en el desarrollo del método de análisis local de tensiones y los factores que lo complementan para la determinación de la tensión de estirado.

En el anexo primero de esta memoria se expone la evolución histórica a partir de la teoría fundamental de la plasticidad, justo hasta los primeros indicios investigadores sobre los fundamentos teóricos de este método analítico, con objeto de obtener una visión global sobre el desarrollo de estas bases hasta la actualidad.

Sin embargo, lo que a continuación se pretende es tratar las diversas referencias consultadas, siguiendo un orden cronológico, haciendo hincapié en aquellas que tienen mayor repercusión en este trabajo. Se presentan aquellos hitos que han tenido una mayor repercusión, en los ámbitos tecnológico e investigador, en el desarrollo de las diferentes cuestiones concernientes al proceso de estirado.

El objetivo ha sido presentar una expresión matemática que permita calcular el valor de la tensión de estirado necesaria para llevar a cabo el proceso de estirado, expresión cuyo pilar central es el análisis local de tensiones, complementada en el resto de teorías en las que se implementa la influencia de otros factores importantes.

### **2.8.1 El método de análisis local de tensiones aplicado al estirado**

A partir de la investigación sobre diferentes procesos de conformado por deformación plástica han ido desarrollándose diversos métodos analíticos que han servido para el estudio y conocimiento del funcionamiento de estos procesos. Estos métodos, basados en fundamentos físicos-matemáticos y fundamentados en la teoría de la plasticidad, consideran hipótesis simplificadoras para facilitar el procedimiento de análisis. Es muy importante tener en cuenta que, en procesos de esta tipología, en el interior de un material que es deformado plásticamente se producen fenómenos físicos cuya modelización es harto compleja.

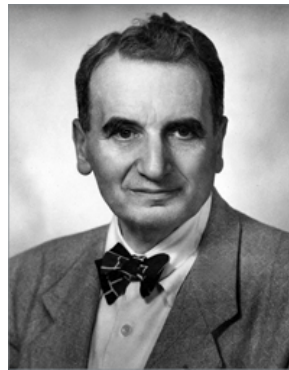


Figura 2.28 Theodore von Karman, 1881-1963.

(Ségres E., recuperado de <https://www.aip.org/history/acap/biographies/bio.jsp?vonkarmant>, 2016).

El ingeniero e investigador húngaro-estadounidense Theodore von Karman, Figura 2.28, fue quien aplicó por primera vez el método de análisis local de tensiones, en la región en la cual se produce la deformación plástica del material, al proceso de laminación.

Mediante este método determinó numéricamente, mediante el análisis local de las tensiones en la interfase, la distribución de presión existente en la superficie de contacto desde la entrada a la salida del rodillo de laminación. No obstante, para poder diseñar un tren de laminación, es necesario conocer explícitamente el par y la fuerza necesarios para llevar a cabo el conformado plástico así como la energía total requerida por el proceso.

Desde los primeros estudios llevados a cabo mediante el método de análisis local de tensiones aplicado al proceso de estirado [Sachs, 1954] hasta la actualidad, la investigación sobre el comportamiento mecánico de este tipo de proceso industrial se sigue fundamentando en una serie de consideraciones basadas en las leyes desarrolladas mediante la teoría de la plasticidad [Alexander et al., 1957], revisadas por M.A. Sebastián [Sebastián et al., 1999] y expuestas a continuación:

- ✓ Relaciones tensión-deformación.
- ✓ Ecuaciones de equilibrio de esfuerzos.
- ✓ Criterios de fluencia del material.
- ✓ Ecuaciones de compatibilidad entre deformaciones y desplazamientos.
- ✓ Volumen constante del material durante la deformación plástica.
- ✓ Condiciones de contorno (rozamiento, temperatura,...).

El método de análisis local de tensiones fue popularizado a principios del siglo XIX por Theodore von Karman, pero fue George Sachs [Sachs, 1927] el primer investigador que aplicó este método para determinar la fuerza de tracción que se requiere, para conseguir el avance del alambre al través de la hilera a velocidad estable, durante el proceso de conformado por deformación plástica mediante la técnica de estirado.

En el desarrollo del método, a partir de dicho análisis inicial, se ha de diferenciar claramente entre estirado y trefilado. En el trefilado de hilo metálico van a intervenir factores que no existen en el estirado de una barra. Se puede afirmar que ambos procesos son mecánicamente iguales, pero la maquinaria y la forma en la que se sucede la secuencia de etapas o reducciones difieren notablemente entre uno y otro.

Generalmente, en el estirado de barras se pretende conseguir pequeñas reducciones para un diámetro preciso [Kampûs, 1999] y una determinada calidad en el acabado superficial, mientras que en el trefilado de alambre o hilo el fin es alcanzar diámetros pequeños mediante una secuencia lo más eficiente posible.

Sachs desarrolló su teoría considerando además las particularidades del proceso de estirado, al tener en cuenta el efecto e influencia que el rozamiento tiene en el mismo.

Esta teoría continuó su evolución gracias a las diferentes investigaciones, aportando soluciones a los problemas de la industria del trefilado. Fue a partir de las décadas de los 50 y 60 cuando se inició la carrera por la automatización los procesos industriales de conformado por deformación plástica del acero en los Estados Unidos, Reino Unido y Japón, cuando realmente se mejoró la metodología de aplicación de esta teoría de cálculo analítico a los procesos industriales.

El desarrollo de la expresión de cálculo de la tensión de estirado requerida, obtenida mediante el análisis local de tensiones del proceso de estirado, ha evolucionado gracias a la investigación de los fundamentos mecánicos asociados a dicho proceso [Wistreich, 1955]. La geometría de la hilera de estirado y el rozamiento existente en la superficie de contacto hilera-material, este último definido mediante el coeficiente de rozamiento de Coulomb, son los parámetros tecnológicos más determinantes en el análisis proceso de estirado. Estos factores, geometría y tribología, van a condicionar en gran medida el comportamiento del metal durante el proceso de estirado, pero se

debe considerar además la influencia otros factores que, bajo determinadas condiciones, pueden llegar a ser muy importantes en el desarrollo del mismo.

A partir de la expresión formulada por Sachs, se han realizado estudios que han demostrado la necesidad de incluir otros factores en esta fórmula fundamental planteada según el balance de tensiones en el estirado [Atkins et al., 1968].

El efecto del endurecimiento del material durante el proceso de estirado, provocado por la deformación plástica, o la influencia del trabajo adicional, fenómeno capaz de producir una distribución de tensiones y deformaciones indeseada que provocaría defectos en el producto estirado, son factores que se han incluido en el posterior desarrollo de este método analítico [Rowe, 1972]. La expresión obtenida para determinar la tensión de estirado por esta completa teoría será aplicable incluso en un proceso secuencial multi-etapa, proceso que requiere el diseño de una secuencia de múltiples pasadas consecutivas para poder conseguir el diámetro final deseado.

En un estudio relativamente reciente [Rojas et al., 2008], se presenta el desarrollo de una nueva variante para el criterio de fluencia aplicado al análisis local de tensiones en el estirado. Esta variante que, a diferencia del criterio de von Mises donde  $\tau=0$ , sí considera el esfuerzo cortante en la zona de deformación, mejora los resultados del modelo obtenido del análisis tensional. No obstante, requiere de herramientas para el cálculo computacional al tratarse de una teoría de fluencia mucho más compleja.

Como se ha podido ver, en conclusión, el método de análisis local de tensiones es mejor en su fiabilidad y precisión en la medida en que se consideren todos los factores cuya repercusión puede llegar a ser importante en el proceso.

El método de análisis de las tensiones locales, aplicado al proceso de estirado y a otros procesos de conformado por deformación plástica, ha ofrecido resultados que no han sido mejorados hasta la aparición de nuevos métodos analíticos [León et al., 2004].

Otros métodos, analíticos como el análisis del límite superior, o numéricos como es el caso del análisis de elementos finitos, han supuesto una revolución en el ámbito análisis de los procesos de conformado por deformación plástica. Los métodos mencionados ofrecen resultados mucho más acordes a los resultados experimentales [Rubio et al., 2003].

Estos métodos, a diferencia del método de análisis local de tensiones, permiten realizar el análisis del estirado considerando la evolución de las propiedades mecánicas del metal e incluso del material de la hilera, así como de las condiciones térmicas del proceso, todo ello durante todo el lapso de tiempo en el que se desarrolla el proceso de estirado en si [Camacho, 2005]. Por otra parte, se trata de métodos de mucha mayor complejidad y, en consecuencia, mayor dificultad en el desarrollo de herramientas para su aplicación.

El método de análisis local de tensiones ha ido evolucionando, en su fiabilidad y aplicabilidad, hasta el presente gracias a las más recientes investigaciones en las cuales se combina el método de análisis local de tensiones con eficaces algoritmos que, considerando el sistema en unas condiciones de contorno definidas y bajo ciertas condiciones límite establecidas para el proceso de estirado, permiten realizar un cálculo preciso de las variables tecnológicas del mismo, incluso en los casos más complejos como es el proceso secuencial de estirado multi-etapa [Zhang et al., 2013].

La optimización o diseño de un proceso de estirado de un alambre metálico consiste, fundamentalmente, en el diseño de la secuencia de reducciones a aplicar o en la modificación del perfil de las hileras utilizadas en esa secuencia o una combinación de ambos [Teja et al., 2016].

El método de análisis local de tensiones, aplicado al proceso secuencial de estirado multi-etapa y considerando todos los factores implicados en dicho proceso, va a ser la base fundamental de una nueva metodología que permitirá diseñar la secuencia de etapas necesarias, la geometría de la sección de las hileras utilizadas y las estaciones de recocido intermedio que serán necesarias para llevar a cabo satisfactoriamente el proceso secuencial multi-etapa.

### **2.8.2 Factores de influencia para la determinación de la tensión de estirado en el estirado de productos de sección circular**

Tal como se indicó anteriormente, el valor final de la tensión de tracción necesaria en el proceso de estirado depende de diversos factores evaluables mediante el procedimiento analítico, pero existen algunos otros para los que se requieren complejos métodos numéricos. A continuación, se presentan los diferentes factores de influencia que han sido considerados en la aplicación del método de análisis local de tensiones al proceso de estirado en este trabajo.

#### **➤ Influencia de la deformación homogénea y del rozamiento**

La expresión fundamental que se obtiene como resultado del análisis local de tensiones en el estirado de una barra o hilo metálico de sección circular, aplicable a cada una de las etapas de un proceso secuencial multi-etapa, definida por George Sachs en 1927 [Sachs, 1953], permite determinar el valor de la tensión de tracción necesaria para poder realizar el estirado. [Rubio et al., 2005] Conociendo los parámetros geométricos, las propiedades mecánicas del metal estirado y la influencia del rozamiento existente entre herramienta y material en la zona de contacto, tal y como se puede ver en la Figura 2.29, es posible analizar el equilibrio de tensiones de un elemento diferencial  $dx$  de longitud en dicha zona:

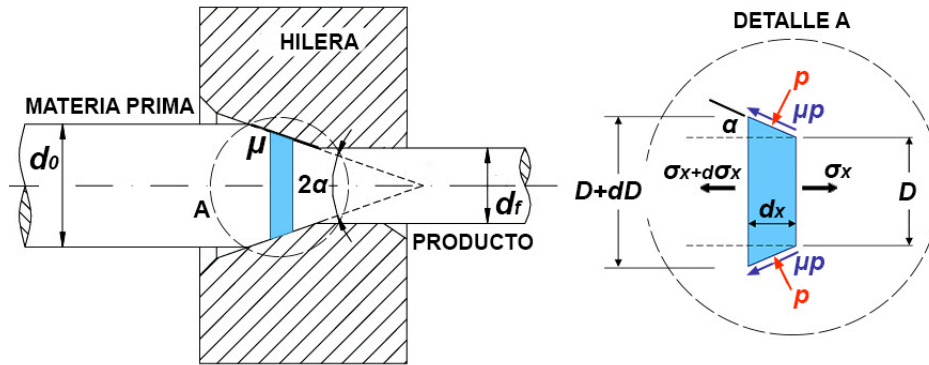


Figura 2.29 Esquema del análisis local de tensiones en el estirado de una barra o hilo metálico de sección circular [Rowe, 1972].

La expresión obtenida, mediante la que se determina la tensión de estirado necesaria, a partir del equilibrio de tensiones es:

$$\frac{\sigma_x}{Y} = \frac{(1+B)}{B} \left[ 1 - \left( \frac{d_f}{d_0} \right)^{2B} \right] \text{ siendo } B = \mu / \tan \alpha \quad (2.13)$$

➤ **Influencia del endurecimiento producido por la deformación en frío**

Como ya se ha dicho, el efecto del endurecimiento que sufre el metal estirado, como consecuencia del conformado plástico, tiene una gran repercusión en el valor final de la tensión de estirado [Davis et al., 1944] [Atkins et al., 1968].

La tensión de fluencia  $Y_0$  de un metal en su estado inicial va a ser el valor de tensión en el que se inicia la deformación permanente del metal sometido a un esfuerzo de tracción y determinará el límite para la tensión aplicable en el proceso de estirado, definiendo el valor de esta propiedad correspondiente al estado recocado concreto.

La tensión de fluencia del metal conformado plásticamente viene dada mediante la expresión de *Ludwik-Hollomon* [Hollomon, 1945] [Rowe, 1972]:

$$Y_{(\epsilon)} = Y_0 + C \cdot \epsilon^n \quad (2.14)$$

$$\bar{Y}_{(\epsilon)} = Y_0 + \frac{C \cdot \epsilon^n}{1+n} \quad (2.15)$$

Considerando el valor medio de la tensión de fluencia en la zona de deformación  $\bar{Y}$ , para cada etapa  $i$  del proceso de estirado secuencial multi-etapa, la tensión de fluencia del metal deformado  $Y$  se verá incrementada a la salida de la hilera como consecuencia del endurecimiento que sufre el material, debido al grado de deformación en frío  $\epsilon$  que la ha sido aplicado en el proceso.

En esta última expresión, correspondiente a la tensión de fluencia media  $\bar{Y}$  [Davis et al., 1944], [Atkins et al., 1968],  $C$  y  $n$  son constantes asociadas al metal y definen el

comportamiento del mismo frente al endurecimiento producido por el efecto de la deformación  $\epsilon$ , resultado del conformado plástico aplicado.

➤ **Influencia de la tensión de retroceso o “backpull” en el trefilado**

La tensión de retroceso se produce y controla mediante bobinas o tensores de fricción, tal y como se muestra en la Figura 2.30, antes de la entrada en cada una de las etapas de la secuencia de trefilado multi-etapa [Davis et al., 1944] [Camacho et al., 2005]. La acción de esta produce una reducción de la presión en la superficie de contacto de la herramienta alargando la vida útil de la misma.

A partir del análisis local de tensiones en un tramo de hilo metálico enrollado una o varias vueltas sobre la bobina de tensión, es posible conocer la expresión que determina el valor de la tensión  $\sigma_{bp}$  de retroceso, considerando el número de vueltas enrolladas, el efecto del rozamiento y la geometría de la reducción realizada [Attaway, 1999]. Estudios similares han sido realizados recientemente por otros autores [Zhang et al., 2013] [Thimont et al., 2011].

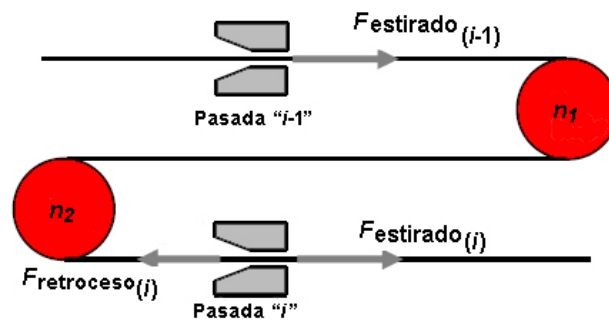


Figura 2.30 Acción de la bobina o tensor de fricción en una etapa i del proceso secuencial de estirado multi-etapa [Thimont et al., 2011].

$$\sigma_{bpi} = \left( \sigma_{(i-1)} \cdot e^{-2\pi \cdot \mu_b \cdot n_b} \right) \cdot \left( \frac{d_{fi}}{d_{oi}} \right)^{2B} \quad (2.16)$$

La repercusión de este nuevo factor en el valor final de la tensión en la dirección del estirado se refleja como un incremento directo en el valor de esta:

$$\sigma_{xi} = \bar{Y} \frac{(1+B)}{B} \left[ 1 - \left( \frac{d_{fi}}{d_{oi}} \right)^{2B} \right] + \sigma_{bpi} \quad (2.17)$$

Los diferentes estudios anteriormente referenciados certifican la aptitud de esta teoría aplicada al estirado de alambre metálico y, por tanto, es este el modelo de cálculo de la tensión de retroceso o “backpull” que ha sido implementado en la metodología de aplicación a procesos secuenciales multi-etapa propuesta en esta tesis.

➤ **Influencia del trabajo adicional consecuencia de la distorsión interna**

Tal y como se mencionó al inicio del presente capítulo, el análisis local de tensiones no tiene en cuenta los efectos de la distorsión interna durante el proceso de estirado, distorsión producida en la estructura cristalina del metal deformado. Es evidente que se trata de un factor a tener en consideración para el cálculo final de la tensión de estirado, como bien demuestran las investigaciones de diversos autores [Wistreich, 1955] [Atkins et al., 1968] [Magzoobi et al., 2008].

Como consecuencia de la distorsión interna del metal y según los resultados de los diferentes trabajos revisados [Zhang et al., 2013] [Wen J.L., 2003], se ha complementado la expresión para el cálculo de la tensión de estirado mediante la componente  $\sigma_{di}$  definida como:

$$\sigma_{di} = \frac{4 \cdot \bar{Y}}{3\sqrt{3}} \tan \alpha \quad (2.18)$$

La expresión anterior determina que la energía, consecuencia de la distorsión interna de un material dúctil conformado por estirado en frío, va a ser mayor cuanto mayor sea el valor del semiángulo de la hilera  $\alpha$  y cuanto más dúctil sea dicho material.

➤ **Influencia del rozamiento en la zona de calibrado**

El diseño convencional de la hilera consta de varias zonas entre las cuales se distingue la zona de calibrado. Esta zona, de sección cilíndrica, está a la salida de la herramienta de estirado y tiene la función de hacer que la forma del producto estirado se mantenga a su salida de la matriz, permitiendo obtener unas propiedades uniformes y una mejor calidad superficial del producto final estirado.

La longitud  $L_c$  de la zona de calibración influye directamente en el valor final de la tensión de estirado, como consecuencia del efecto del rozamiento del metal a su paso por el cilindro de calibración.

$$\sigma_{cal} = 0,1 \cdot \mu \cdot \frac{L_c}{d_f} \bar{Y} \quad (2.19)$$

El valor final de la tensión de estirado se incrementa con esta tensión de calibración  $\sigma_{cal}$ , componente cuya expresión de cálculo se obtiene del correspondiente análisis del estado tensional en equilibrio en dicha zona durante el estirado [Zhang et al., 2013].

➤ **Expresión final para la tensión de estirado de productos de sección circular**

La acción conjunta de los factores implicados en el proceso de estirado: tensión por deformación homogénea  $\sigma_{dh}$ , tensión debida al rozamiento entre las superficies en contacto  $\sigma_{roz}$ , tensión consecuencia del trabajo adicional  $\sigma_{di}$  y tensión de retroceso  $\sigma_{bp}$ ;

van a dar lugar al valor total de la tensión de estirado  $\sigma_x$  necesaria en el mismo, valor que será igual a la suma de los valores de todas estas componentes.

$$\sigma_x = \sigma_{dh} + \sigma_{roz} + \sigma_{bp} + \sigma_{di} + \sigma_{cal} \quad (2.20)$$

Sustituyendo cada uno de los términos correspondientes en la expresión anterior, se ha obtenido la expresión general para el cálculo de la tensión final de estirado  $\sigma_{xi}$  en una etapa cualquiera  $i$  del proceso secuencial de estirado multi-etapa:

$$\sigma_{x_i} = \bar{Y} \frac{(1+B)}{B} \left[ 1 - \left( \frac{d_{fi}}{d_{oi}} \right)^{2B} \right] + \left( \sigma_{x_{(i-1)}} \right)^{(-2\pi \cdot \mu_{bobina} \cdot n_b)} \cdot \left( \frac{d_{fi}}{d_{oi}} \right)^{2B} + \frac{4 \cdot \bar{Y}}{3\sqrt{3}} \tan \alpha + 0'1 \cdot \mu \cdot \frac{L_c}{d_{fi}} \bar{Y} \quad (2.21)$$

Para todos los términos de la expresión general se asumirá la tensión de fluencia media  $\bar{Y}$ , obtenida a partir de la expresión de *Ludwik-Hollomon* (2.15), en la cual se considera la influencia del endurecimiento por deformación en frío en el estirado:

$$\sigma_{x_i} = Y \frac{(1+B)}{B} \left[ 1 - \left( \frac{d_{fi}}{d_{oi}} \right)^{2B} \right] + \left( \sigma_{x_{(i-1)}} \right)^{(-2\pi \cdot \mu_{bobina} \cdot n_b)} \cdot \left( \frac{d_{fi}}{d_{oi}} \right)^{2B} + \frac{4 \cdot Y}{3\sqrt{3}} \tan \alpha + 0'1 \cdot \mu \cdot \frac{L_c}{d_{fi}} Y \quad (2.22)$$

Recuérdese que la constante  $B$ , la tensión media de fluencia  $\bar{Y}$  o la tensión de fluencia  $Y$ , tras el conformado plástico en frío, deben calcularse empleando las expresiones (2.13), (2.15) o (2.14) respectivamente.

En la metodología propuesta, cuyo desarrollo se expone más adelante, se aplicará la expresión para el cálculo de la tensión de estirado en cada una de las etapas del proceso secuencial de estirado multi-etapa (2.21), ya que es esta expresión la que tiene en cuenta el efecto del endurecimiento por deformación del metal al considerar el incremento en el valor de la tensión de fluencia producido por dicha deformación.

## **2.9 Antecedentes en el estudio del proceso secuencial de estirado multi-etapa.**

Uno de los más antiguos estudios sobre el proceso de estirado, si no el más antiguo, es el realizado por *Theophilus* en el siglo XII [Thomsen et al., 1974]. Por aquel entonces, este aventajado obrero de la metalurgia antigua no intuyó en ningún momento la importancia del semiángulo  $\alpha$  de la hilera de estirado, quizás por su ignorancia a cerca de su función e influencia en el proceso. Sin embargo sí fue capaz de comprobar que unos simples orificios taladrados con forma cónica en una placa de metal empleada como herramienta eran válidos para conseguir el estirado de un alambre metálico (véase Figura 2.31), sin llegar a conocer los detalles que hacían posible dicho proceso.

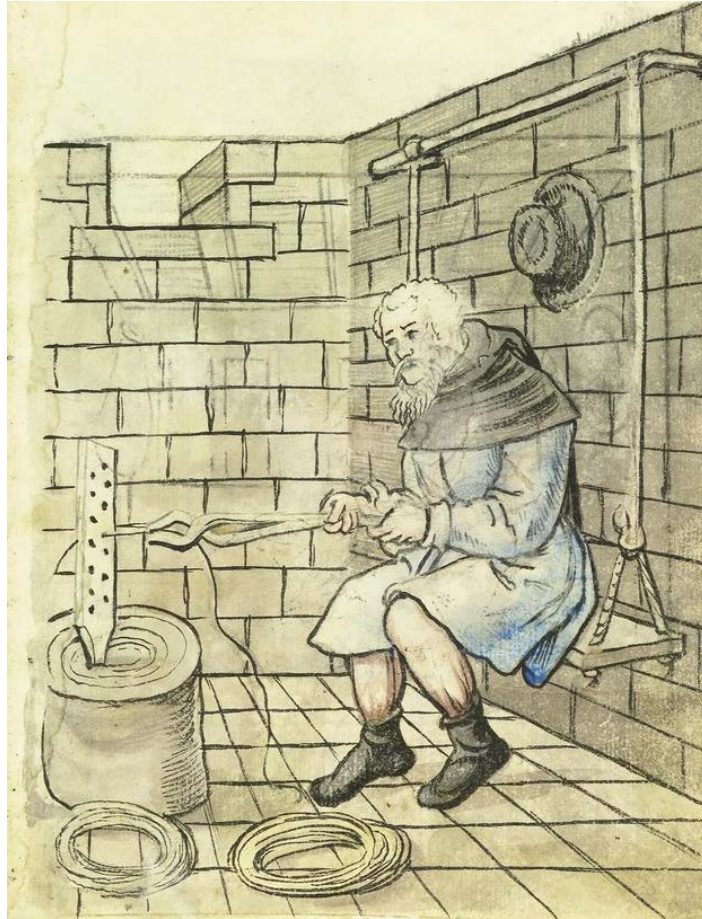


Figura 2.31 Antiguo procedimiento de estirado secuencial multi-etapa.

(<http://www.nuernberger-hausbuecher.de/75-Amb-2-317-151-r/data>, 2016)

Estudios realizados a mediados del pasado siglo certifican la gran importancia que el semiángulo  $\alpha$  de la hilera y la ratio de reducción  $r$  aplicada tienen en el proceso de estirado de alambre o barra de sección circular [Wistreich, 1955]. Existe un rango de valores, para cada uno de estos dos parámetros geométricos, dentro del cual el proceso es posible sin que se produzca la rotura del material estirado.

Las propiedades del producto obtenido, así como la forma en que se distribuyen las deformaciones en el material estirado, dependen directa y fundamentalmente de los dos parámetros mencionados además del coeficiente de rozamiento en la interfase herramienta-material estirado y del límite de fluencia del propio material procesado [Davis, 1944], entre otros factores que también son importantes.

El semiángulo de la hilera va a determinar el perfil de la zona de deformación de la herramienta de estirado. Esta forma, definida por el factor delta  $\Delta$  mediante el que se determina la relación entre semiángulo y ratio de reducción, va a condicionar el valor de la fuerza de estirado, la presión en la superficie de contacto material-hilera, así como la distribución de tensiones en la sección del material estirado, entre otros muchos aspectos prácticos del proceso de estirado.

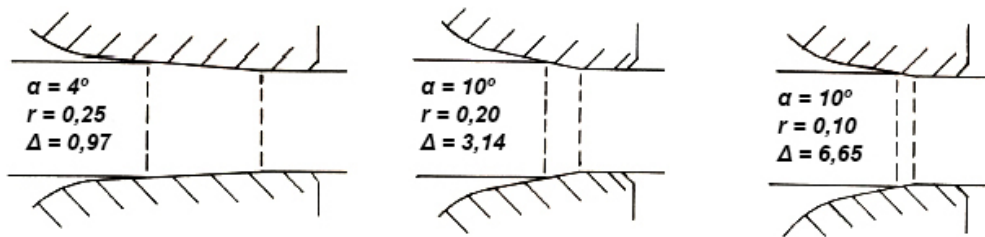


Figura 2.32 Varios perfiles de la zona de deformación de la hilera [Wright, 1979].

El valor del factor de forma condicionará la forma del perfil de la hilera (véase Figura 2.32) de manera que, un valor bajo de este factor  $\Delta$  reduce el grado de endurecimiento que el material sufre como consecuencia de la deformación y previene defectos en la línea central del mismo (*“central burst”*), ahorrando recocidos intermedios innecesarios. Por el contrario, un valor alto de  $\Delta$ , comercialmente más utilizado y que suele estar entre 2 y 3, implicará una considerable reducción del valor de la tensión de estirado en detrimento de las ventajas mencionadas [Wright, 1979].

Estudios sobre los parámetros geométricos mencionados demuestran la conveniencia de utilizar una combinación de compromiso, combinación apropiada para conseguir las cualidades y calidades deseadas en el producto final estirado [Castro de et al., 1996].

Una vez definidos los factores geométricos que caracterizan el proceso de estirado es posible el diseño del proceso secuencial de estirado multi-etapa en base a estos. El diseño establecido para proceso de estirado podrá ser estudiado desde el punto de vista tecnológico, para lo cual se han utilizado históricamente diversos métodos analíticos, empíricos y numéricos [Sebastián et al., 1983].

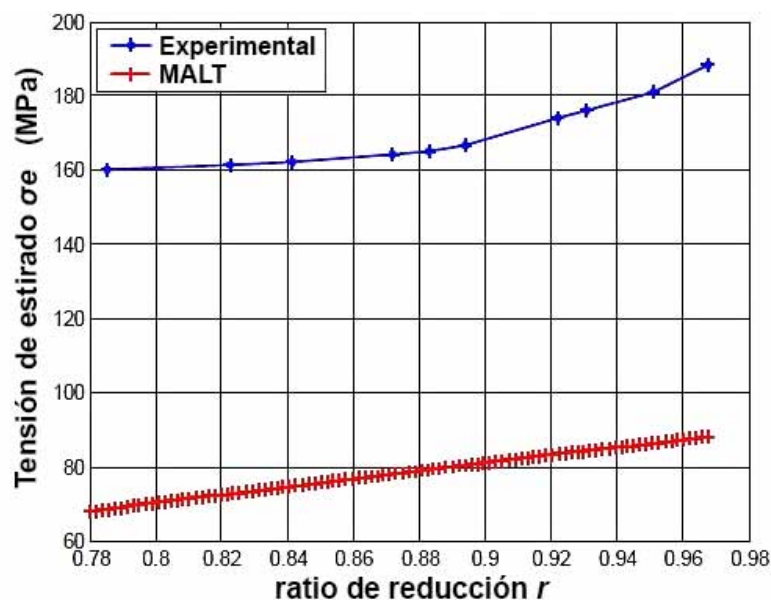


Figura 2.33 Resultados obtenidos mediante el método de análisis local de tensiones clásico comparados con la tensión de estirado obtenida en ensayos reales [Ikumapayi et al., 2015].

Se ha demostrado la facilidad de aplicación de este método, aunque se debe mejorar de alguna forma la correspondencia de los resultados que ofrece, ya que considera únicamente el efecto del rozamiento en el sistema herramienta-pieza y las condiciones de fluencia del material estirado [Sebastián, 1999] [Ikumapayi et al., 2015]. En la Figura 2.33 se muestran los resultados de uno de los estudios consultados para este trabajo, resultados en los cuales se muestra la diferencia entre los valores de la tensión de estirado obtenidos por este método analítico frente a los obtenidos a partir del método experimental.

La metodología propuesta para el diseño y análisis tecnológico del proceso de estirado multi-etapa, desarrollada en el presente trabajo, se fundamenta en los aspectos anteriores y está basada en la determinación de la tensión de estirado existente en cada una de las etapas que constituyen la secuencia completa de un proceso de estirado multi-etapa.

El valor de la tensión de estirado  $\sigma_x$  se calculará mediante una expresión obtenida a partir del método de análisis local de tensiones aplicado al proceso de estirado [Rowe, 1972] [Groover, 2010] [Hassan et al., 2015].

Se ha demostrado que el método de análisis de las tensiones locales ofrece una solución de compromiso en la mayoría de los procesos de estirado estudiados hasta la fecha, aunque en todos los casos se ha podido comprobar que sus resultados en el cálculo del valor de la tensión de estirado están generalmente por debajo de los valores obtenidos mediante métodos más fiables y afines a la realidad, como los métodos numéricos (MEF) o los métodos empíricos basados en ensayos reales.

En las últimas décadas del siglo XX, los estudios sobre el proceso de estirado se han centrado sobre todo en el análisis del mismo mediante diferentes métodos analíticos, numéricos y experimentales con el objetivo de conocer los factores fundamentales del mismo y la influencia que tiene cada uno de ellos en el desarrollo del proceso.

Generalmente, este tipo de estudio analiza la influencia de cada uno de los diferentes parámetros a la hora de determinar el valor de la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$  o conocer el rango de valores para un proceso óptimo. Por otro lado, son comunes los trabajos en los que se busca analizar la influencia de una u otra variable en el estado final del metal que es procesado por estirado [Atkins et al., 1968].

La distribución de deformaciones en la sección de la barra va a condicionar las cualidades y aptitudes del producto estirado en la medida en la que el proceso de conformado aplicado repercutirá en sus propiedades mecánicas [Majta et al., 1992].

Las propiedades finales del producto estirado y los diferentes parámetros tecnológicos en un proceso multi-etapa van a ser función directa de la geometría de cada una de las hileras empleadas en la secuencia de estirado aplicada [Adamczyk et al.2012].

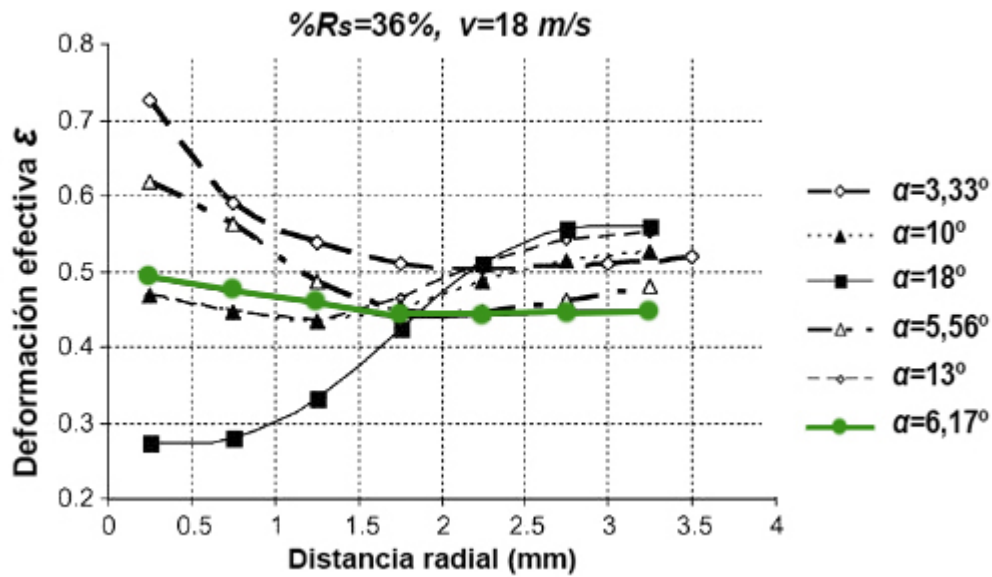


Figura 2.34 Variación de deformación efectiva en la sección circular estirada, para diferentes valores del semiángulo  $\alpha$  [Majzoubi et al., 2008].

Un producto estirado presentará generalmente una distribución de deformaciones heterogénea en su sección [Caddell et al., 1971]. Esta distribución de la deformación efectiva en la sección del alambre estirado es función de la geometría de la hilera y, fundamentalmente, depende de la ratio  $r$  de reducción aplicada así como del semi-ángulo  $\alpha$  de la hilera empleada en el mismo.

Un valor óptimo del semi-ángulo  $\alpha$  de la hilera de estirado implicará una distribución de deformación uniforme en toda la sección del alambre estirado [Vega et al., 2009].

La no homogeneidad en la distribución de deformaciones y tensiones residuales en la sección del producto estirado es consecuencia del trabajo adicional aplicado en el proceso, cuya magnitud difiere en función de parámetros geométricos de la hilera [Lorenzo, 2009] [Majzoubi et al., 2008] tal como se observa en la Figura 2.34.

La deformación adicional producida durante el proceso de estirado va generalmente en detrimento del proceso y empeora las propiedades mecánicas y la calidad del producto estirado [Widdrington, 1987]. La cantidad de trabajo adicional implicado en el proceso va a ser función del semi-ángulo de la hilera y de la ratio de reducción aplicado en el proceso además de, en menor medida, del diámetro inicial así como el estado inicial del material a estirar. El trabajo adicional implicado será mayor cuando se aplican valores grandes del semi-ángulo de estirado y valores pequeños en el ratio de reducción, sobre todo en barras de gran diámetro que han sido recocidas para el proceso de estirado [Sadok et al., 1992].

En un proceso de una sola etapa de estirado se producen mayores valores de tensión a compresión en el centro del material, siendo inferiores los valores de la tensión a

tracción cerca de la superficie, todo ello comparado con los valores obtenidos, realizando la misma reducción de área, mediante un proceso secuencial de estirado en varias etapas [Narayanan et al., 2010].

Para determinado tipo de aceros, un incremento en el número de etapas para una misma reducción de área por estirado conduce generalmente a un incremento en la resistencia a la tracción y el límite de fluencia del material estirado, en detrimento de sus propiedades plásticas y su ductilidad [Luksza et al., 2002].

La influencia de la velocidad es relativa valores relativamente bajos. Con una buena lubricación, el efecto del incremento de la temperatura en la interfase del proceso de estirado no es generalmente muy significativo. Sin embargo, en el estirado a altas velocidades se produce un notable incremento en la temperatura del proceso.

Existen sistemas y productos que permiten condiciones de lubricación y refrigeración tales que, cuando el proceso de estirado se realiza a velocidad apropiada, son capaces de mantener condiciones isotérmicas en la zona de deformación. Este aspecto permite asumir que en el proceso de estirado es posible controlar un valor óptimo y constante de la temperatura en dicha zona [Jo et al., 2002].

El estudio completo de un proceso de estirado, ya sea de una única etapa o de una secuencia multi-etapa, consiste en dos partes: en una primera se deberá caracterizar geoméricamente el proceso bajo unas condiciones límite determinadas generalmente por el valor máximo admisible para la tensión de estirado, mientras que la segunda parte va a permitir definir mediante algún método, generalmente analítico o numérico, los valores de los parámetros tecnológicos correspondientes a todas y cada una de las pasadas de estirado que constituyen la secuencia del proceso multi-etapa.

La metodología de diseño y análisis ideal será aquella que implemente estas dos partes en una sola herramienta debidamente desarrollada y que facilite el estudio y análisis de un proceso secuencial de estirado multi-etapa [Sawamiphakdi et al., 1998].

El objetivo de idear una metodología que permita diseñar y caracterizar la secuencia de etapas en el estirado multi-etapa de metales como el acero y el cobre, ha sido abordado en diversas investigaciones con la finalidad de conocer en detalle el proceso.

Los sistemas expertos, complementados con los sistemas de simulación y análisis numérico, permiten diseñar el proceso multi-etapa y conocer la distribución de tensiones y deformaciones en cada una de sus etapas, así como las propiedades del producto final. Se trata de sistemas que permiten diseñar el proceso adecuado para obtener un producto con una calidad y propiedades determinadas [Luksza et al., 1998].

La aplicación de métodos analíticos, los cuales se fundamentan en la geometría del proceso y las condiciones de rozamiento, es muy útil para el diseño del mismo. Se ha

demostrado que estos métodos permiten conocer los parámetros tecnológicos del proceso de estirado bajo la condición de energía mínima necesaria para realizar el estirado [Rubio, 2006].

Diversos métodos analíticos aplicados al estirado, entre éstos el método de análisis local de tensiones, se pueden aplicar para determinar fuerzas, energías, potencias, tensiones y deformaciones efectivas, en cada una de las etapas del proceso secuencial de estirado multi-etapa [Luis et al., 2005].

A partir de la década de los noventa y con la irrupción de las herramientas informáticas CAE (*Computer Aided Engineering*), fundamentadas en el análisis numérico aplicado a la discretización del sistema en elementos finitos (*Finite Element Method*) se han realizado multitud de estudios sobre diferentes procesos secuenciales de estirado constituidos en varias etapas.

El desarrollo de sistemas informáticos basados en el CAD (*Computer Aided Design*) ha sido también aplicado al diseño del proceso de estirado secuencial multi-etapa [Brücker et al., 1988]. Este tipo de sistemas permite la determinación y el diseño de las etapas de estirado para prácticamente cualquier forma, pero ofrece resultados caso a caso que generalmente deben ser analizados y optimizados mediante otros métodos.

Los métodos numéricos basados en el análisis de elementos finitos aplicado al análisis de un proceso secuencial de estirado multi-etapa han sido validados en ejemplos como el estirado del acero al carbono y existen varias investigaciones al respecto [Rojas et al., 2008] en las que se realiza incluso un estudio comparativo de los resultados numéricos con resultados experimentales obtenidos para cada una de las etapas del proceso [Celentano et al., 2009] [Vega et al., 2009].

Empresas como *Arcelor Mittal* producen diversos tipos de hilo fino de acero, para distintas aplicaciones, mediante procesos de estirado secuencial multi-etapa. Gracias a diversas investigaciones se conoce muy bien hoy en día el proceso de trefilado de este tipo de producto tan demandado. Existen estudios recientes que dan un ejemplo de la fiabilidad que puede llegar a ofrecer el modelo analítico propuesto [Thimont et al., 2011].

En el caso especial del trefilado multi-etapa de cobre ultra-fino, las roturas internas iniciadas por impurezas en el material y la producidas por el fenómeno conocido como “*central burst*” o “*chevron crack*” son fatales para el desenlace del proceso. La pureza y calidad del material a estirar será determinante de manera que, cuanto menor número y tamaño de las impurezas, menor probabilidad de rotura existirá [Xu et al, 2009] [Norasetthopon, 2011]. El procesado por estirado de este metal requiere un gran número de pasadas con el fin de evitar la rotura del hilo. El estudio detallado del estirado de este metal es posible gracias a los métodos numéricos y empíricos, aunque también es aplicable el método analítico tal y como se propone en esta tesis.

Diversos métodos para calcular la secuencia de etapas de un proceso de estirado multi-etapa han sido propuestos y existen trabajos de investigación que lo demuestran.

Los métodos utilizados para el diseño y análisis del proceso de estirado multi-etapa pueden ser muy básicos, como por ejemplo los basados en un valor constante de variables tales como la ratio de reducción del área o en un límite para la deformación aplicable en cada etapa bajo condiciones de deformación homogénea [Sebastián, 2010]. También pueden desarrollarse a partir de un diseño analítico más completo del proceso [Panteghini et al., 2010], e incluso a partir de la interpretación matemática de la curva de Hollomon [Jokovic et al., 2013]. Existen métodos de mayor complejidad fundamentados en el análisis de criterios microscópicos como el índice de vacío [Kuboki et al., 2005]. Más recientemente han sido utilizados otros métodos apoyados en la aplicación de algoritmos en combinación con la evaluación de sus resultados mediante el método de los elementos finitos, métodos que presentan diferentes inconvenientes, e incluso métodos complejos desarrollados a partir de fórmulas explícitas obtenidas de los estudios empíricos realizados previamente.

Estudios muy recientes proponen una nueva metodología para el diseño y optimización del proceso secuencial de estirado multi-etapa, denominado función objetivo de optimización [Kovács et al., 2013] (*optimization objective function*). Esta función fundamenta el diseño de la secuencia de etapas considerando la mayoría de aspectos de planificación del proceso, los parámetros geométricos y las propiedades del material a estirar, así como la deformación total que se desea realizar y la que es posible antes de la necesidad de aplicar recocido intermedio. Se trata de una metodología muy completa pero muy compleja a la vez, cuya implementación puede llegar a ser muy complicada, además, el cálculo matemático que conlleva puede requerir de mucho tiempo de computación.

En el presente trabajo se ha optado por la vía analítica, por la sencillez y facilidad para su implementación informática. Se ha dividido la metodología en dos partes bien diferenciadas: el diseño de la secuencia de etapas del proceso de estirado multi-etapa, mediante un método sencillo que considere todos los factores más determinantes.

Una segunda parte permite la evaluación y optimización del diseño obtenido, a partir del análisis de los valores obtenidos para parámetros tecnológicos tales como tensiones o deformaciones en cada una de las etapas. El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología simple pero eficaz y fiable a la misma vez, llegando a conocer la sensibilidad de la misma, acotando su campo de aplicación en función de las diferentes variables del proceso.

Las principales novedades de esta metodología son, por una parte, la utilización del factor de forma delta de la herramienta de estirado  $\Delta$  como pilar para el diseño de la

secuencia de etapas, apoyado en la consideración de otras limitaciones para los cálculos necesarios y por otra parte la aplicación de una expresión para el cálculo de la tensión de estirado, fundamentada en el método analítico de análisis de tensiones locales aplicado al estirado, complementada con la consideración de factores como la longitud de calibración de la hilera, la distorsión interna producida en el material durante el estirado o la tensión de retroceso en el caso del proceso de trefilado o estirado continuo.

Como se ha mencionado ya anteriormente, existen muchos ejemplos en los que se ha demostrado la fiabilidad de los métodos numéricos. La experiencia existente en el uso de estos métodos aplicados al análisis de procesos de conformado por deformación plástica y su evolución gracias a la mejora exponencial del rendimiento de los sistemas informáticos, hacen de ellos una herramienta muy útil en el análisis de este tipo de procesos. Estos sistemas ofrecen gran fiabilidad y el rápido aprendizaje de su manejo es determinante para su elección como herramienta para realizar el contra-análisis del proceso de estirado en esta tesis. Es por ello por lo que, en este trabajo, se ha optado por la evaluación de los resultados utilizando el método de los elementos finitos como herramienta de comprobación de la metodología analítica propuesta.

Es evidente la necesidad de métodos empíricos si lo que se desea es conocer bien en detalle cualquier aspecto concreto en éste tipo de procesos [Singh et al., 2012] [Lima-Filho, 2003]. Para ello, es necesario realizar el proceso secuencial de estirado multi-etapa, bajo unas condiciones controladas, para después poder validar la viabilidad técnica del proceso o incluso para validar los resultados obtenidos mediante otras metodologías, como es el caso de la presente tesis.

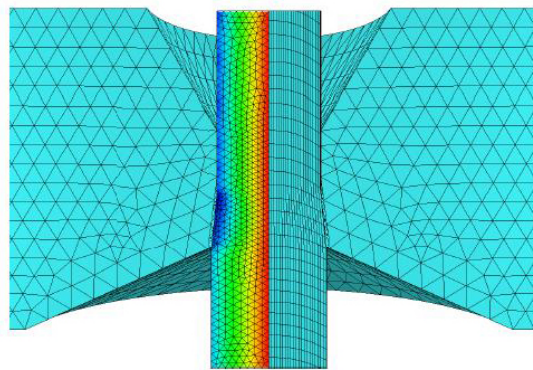


Figura 2.35 Vista de la distribución de deformaciones obtenida de análisis por el método de los elementos finitos aplicado al estirado [Muskalski et al., 2011].

Tal como ya se ha dicho, poder aplicar el método empírico al proceso de estirado secuencial multi-etapa presenta una gran dificultad. En primer lugar, se trata de un proceso multi-etapa para el cual se necesita una máquina con la que realizar el estirado del alambre, además de todas las hileras correspondientes a todas las etapas de cada una de las secuencias que se pretendan realizar, además de la materia prima a

estirar. La maquinaria debe equipar sistemas que permitan medir y controlar parámetros tales como la fuerza de estirado aplicada o la temperatura en puntos concretos de la interfase hilera-metal. En segundo lugar será también imprescindible contar con el equipamiento necesario para realizar todos los controles metrológicos y ensayos mecánicos necesarios para caracterizar cada una de las muestras tomadas del resultado obtenido en cada etapa del proceso, con el fin de caracterizarlo tecnológicamente. Por estos motivos se opta cada vez más a menudo por los métodos numéricos como herramienta de análisis de este tipo de proceso ya que, basados en el análisis de los elementos finitos, permiten obtener simulaciones gráficas como la que se muestra en la Figura 2.35 [Muskalski, 2014].

El principal objetivo del presente trabajo ha sido desarrollar una metodología con carácter genérico, para el diseño y análisis tecnológico del proceso secuencial de estirado multi-etapa de alambres y/o barras de sección circular. Este objetivo abarca multitud de posibilidades en función de las diferentes variables del proceso objeto del desarrollo (material procesado, parámetros geométricos, condiciones de contorno, etc.), por lo que se ha descartado el planteamiento de una vía experimental en favor de un método numérico para contrastar y validar los resultados obtenidos por la vía analítica propuesta, ya que se ha pretendido desarrollar la metodología y acotar su funcionamiento en un nivel general y no en particular para un material concreto.

No obstante y una vez validado el funcionamiento de la metodología desde una perspectiva generalista, se ha realizado un estudio particular del proceso de trefilado secuencial multi-etapa del cobre en colaboración con la empresa *Cunext Copper Industries S.L.* Este estudio ha servido para optimizar y ajustar la metodología al caso particular del trefilado del cobre, con el fin de comprobar el diseño de las secuencias obtenidas por el método analítico propuesto y compararlo con los diseños de los procesos reales de la planta de producción de la empresa. El análisis tecnológico de estos se ha realizado mediante la metodología propuesta para, posteriormente, contrastar y validar los resultados obtenidos comparándolos a los ofrecidos por el método numérico aplicado en esos mismos diseños.

## **2.10 Recapitulación**

Una amplia exposición sobre aspectos tales como el ámbito del proceso de estirado, sus fundamentos tecnológicos, parámetros característicos, variables y factores de influencia, así como el método analítico aplicado al proceso secuencial de estirado multi-etapa, han constituido el marco teórico de aplicación del presente capítulo.

En el penúltimo apartado del presente capítulo se ha expuesto un análisis del estado del arte, en el que se presenta lo más relevante que ha sido publicado recientemente en el ámbito del estudio y análisis del proceso de estirado.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## **CAPÍTULO 3**

### **Metodología para el análisis de procesos secuenciales de estirado multi-etapa**

---



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

### **3.1 Fundamentos de la metodología aplicada al proceso secuencial de estirado multi-etapa**

A diferencia del proceso de estirado en una sola etapa, en el estirado continuo o estirado multi-etapa el proceso parte de una barra o alambrón con una sección o diámetro inicial para conseguir la sección o diámetro final deseado, mediante la aplicación de una secuencia de etapas de estirado, etapas en las que la sección se va reduciendo progresivamente.

El diseño tecnológico de esta tipología de proceso conlleva la determinación del número de etapas y el porcentaje de reducción que se debe realizar en cada una de estas, todo ello con el fin de conseguir un producto final estirado con la geometría, propiedades mecánicas y calidad superficial deseadas.

Para poder establecer este límite de reducción máximo admisible, es muy importante considerar el efecto del endurecimiento producido como consecuencia de la deformación aplicada al metal durante el proceso de estirado. Un exceso de endurecimiento es causado también por el trabajo adicional generado. Durante el conformado por estirado del metal, y a causa del efecto del rozamiento existente en el proceso, se genera siempre una cantidad de trabajo adicional que provoca la acumulación de tensiones de cizalladura en el metal estirado, consecuencia de la distorsión interna en la estructura cristalina del mismo.

El endurecimiento por deformación máximo en el estirado secuencial multi-etapa se establece cuando el metal, procesado hasta una etapa determinada, adquiere tal grado de endurecimiento que es imposible continuar procesándolo, sin que se rompa o se deforme a su salida de la siguiente hilera o etapa. Es en ese momento en el que será necesario aplicar un recocido al material, tratamiento que devolverá la ductilidad al mismo y permitirá continuar con el proceso secuencial de estirado.

Documentos recientes [Sebastián, 2010] proponen un procedimiento analítico sencillo y básico para el diseño de la secuencia de etapas de un proceso de estirado secuencial multi-etapa, a partir del supuesto de que el metal se deforma bajo las condiciones de deformación homogénea y se endurece por el efecto de la deformación aplicada durante el proceso, según una ley de comportamiento del metal que es conocida. No obstante, se trata de un procedimiento que no considera el efecto de factores tan importantes como el rozamiento en la zona de contacto metal-hilera o la distorsión interna causada por el trabajo adicional existente en el proceso de estirado.

Lo que sí que resulta evidente es la condición límite que se debe considerar para el diseño geométrico del proceso de estirado: ésta se produce justo cuando el valor de la tensión de estirado está a punto de alcanzar el límite de fluencia y, en última instancia, el límite de rotura del metal que sale estirado de la hilera.

### 3.1.1 Fenómeno de endurecimiento por deformación en los metales

Tal como se expone en la Figura 3.1 y en estudios anteriores se ha comprobado que, al conformar plásticamente un metal mediante el proceso de estirado, se produce un incremento en su dureza y resistencia mecánica en detrimento de su ductilidad, como consecuencia de la deformación realizada en frío [Wistreich, 1955].

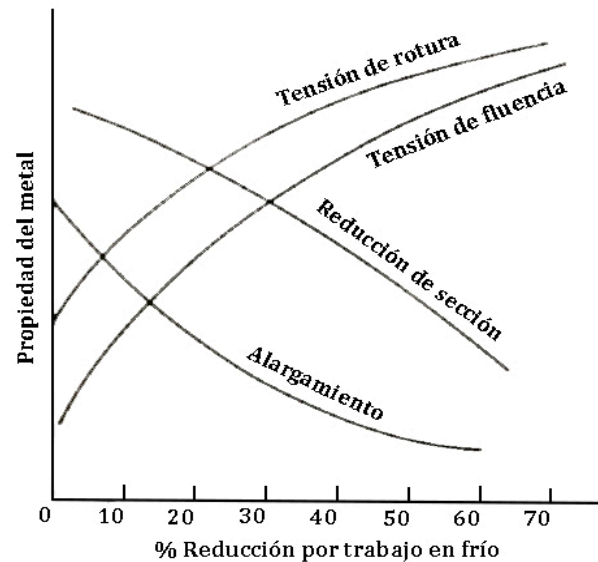


Figura 3.1 Influencia del conformado en frío en las propiedades de los metales [Dieter, 1961].

El fenómeno de endurecimiento por deformación se origina como consecuencia de la alteración de la cantidad y la disposición de las dislocaciones que definen la estructura cristalina de un metal, la cual es producida por la acción de una fuerza externa.

La deformación producida por el proceso de estirado tiene como consecuencia un incremento en la densidad de las dislocaciones y un desplazamiento de éstas en la estructura interna del metal, dificultándose el movimiento relativo entre las mismas. Además de esta alteración del estado de las dislocaciones, durante el proceso de conformado plástico se produce la deformación de los granos que conforman la estructura interna del metal, originando tensiones residuales en su interior.

Cuando un material se deforma plásticamente, sus propiedades mecánicas se pueden ver alteradas como consecuencia del fenómeno de endurecimiento por deformación.

Si el material no sufre endurecimiento durante un proceso de conformado plástico, se define como material rígido-plástico perfecto. En este caso la curva tensiones-deformaciones  $\sigma(\epsilon)$  estará representada por una función en la que la tensión de deformación es igual a la tensión de fluencia  $Y$  del material durante todo el proceso de conformado plástico, siendo  $Y_0$  la tensión de fluencia en estado recocido.

$$\sigma = Y = Y_0 \quad (3.1)$$

En la gran mayoría de los metales conformados en frío, el comportamiento plástico durante el proceso de conformado responde a la expresión matemática que relaciona la tensión aplicada y la deformación obtenida según la ley general de comportamiento de los metales, conocida como ecuación de *Hollomon* [Hollomon, 1945].

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^n \quad (3.2)$$

En general, los metales presentan un comportamiento elasto-plástico y, por lo tanto, el valor de la tensión en un instante determinado del proceso de deformación plástica de un metal se debe definir considerando además su tensión de fluencia, tal y como se refleja en la expresión conocida como *Ludwik-Hollomon* [Rowe, 1972].

$$\sigma = Y_0 + C \cdot \varepsilon^n \quad (3.3)$$

Para un metal conformado plásticamente en frío, la tensión de fluencia, tras ser sometido este al proceso de estirado, se expresa mediante la expresión anterior y su nuevo valor dependerá del valor de la deformación parcialmente acumulada en una etapa cualquiera del proceso secuencial de estirado multi-etapa. Esta condición se cumplirá después de todas y cada una de las etapas, teniendo en cuenta que cuando el metal está recocado el valor para la deformación inicial es nulo.

El valor medio de la deformación efectiva  $\varepsilon$ , correspondiente a la deformación aplicada durante el proceso de estirado, es función directa del ratio  $r$  o factor de reducción de sección aplicado, en cada etapa de un proceso multi-etapa.

$$\varepsilon_i = \ln \left[ \frac{1}{(1-r_i)} \right] \quad , \quad \text{donde } r_i = 1 - \left( \frac{df_i}{d0_i} \right)^2 \quad (3.4)$$

Estas expresiones serán aplicables al análisis del proceso secuencial de estirado multi-etapa y se utilizan más adelante para poder determinar el nuevo valor que tendrá la tensión de fluencia  $Y$  del metal después de cada etapa de estirado del proceso.

Este nuevo valor de la tensión de fluencia  $Y$  podrá utilizarse para determinar el valor de la tensión de fluencia media durante el estirado y la tensión de estirado  $\sigma_e$  necesaria, en todas y cada una de las etapas del proceso secuencial de estirado multi-etapa.

En un proceso de estirado multi-etapa, para una reducción total determinada, un mayor número de pasadas ligeras o de menor reducción de la sección por pasada van a producir un mayor endurecimiento del metal. Esto produce, como consecuencia, un incremento de la tensión a compresión en el centro del alambre, siendo inferiores los valores de la tensión a tracción cerca de la superficie, todo ello comparado con los valores obtenidos, realizando la misma reducción de área, mediante un proceso secuencial de estirado multi-etapa. Cabe recordar que este tipo de endurecimiento provoca un incremento en la resistencia a la tracción y el límite de fluencia del material estirado, en detrimento de su ductilidad.

### **3.1.2 Recocido del metal conformado plásticamente en frío**

Cuando un metal es conformado plásticamente y su estructura cristalina se ve alterada con un incremento y desplazamiento de sus dislocaciones internas y una deformación en sus granos cristalinos, además de su dureza, se van a ver alteradas otras propiedades tales como la conductividad eléctrica o la resistencia a la corrosión.

En un proceso de estirado multi-etapa va a ser necesario, por lo tanto, algún procedimiento que permita conseguir las propiedades mecánicas y físicas deseadas para el producto final o puede ser necesario hacer disminuir la dureza del material endurecido por deformación antes de realizar alguna de las etapas intermedias del proceso secuencial para poder llevar el proceso a su fin.

Los cambios producidos en el metal como consecuencia del conformado por deformación plástica en frío pueden ser revertidos empleando el tratamiento térmico apropiado y provocando la recuperación de las dislocaciones, la recristalización de nuevos granos y el crecimiento de estos, fenómenos que se consiguen a elevada temperatura.

Todo metal empleado como materia prima para un proceso de conformado por deformación plástica ha de tener unas propiedades mecánicas apropiadas para el proceso de conformado. El recocido devuelve al material, en prácticamente un 100%, sus propiedades mecánicas, denominándose al nuevo estado como estado de recocido.

Durante la ejecución de un proceso secuencial de conformado plástico constituido por varias etapas puede ocurrir que, en una determinada etapa  $i$ , el endurecimiento debido a la deformación alcance un punto crítico, en el cual la acritud del material sea tal que en la siguiente etapa se produciría el agrietamiento o incluso la rotura. Este límite, antes del cual el material debe ser recocido, se establecerá justo antes de que la tensión necesaria para el estirado alcance el valor de la tensión de rotura  $R_m$ , conocida también con las siglas UTS (“*ultimate tensile strength*”). El tratamiento térmico de recocido se deberá aplicar en aquella/as etapas del proceso multi-etapa en las que, sin recocer, se alcance dicho valor en la tensión de estirado.

En un proceso secuencial tendremos dos opciones teóricamente posibles:

- Proceso secuencial sin recocidos intermedios.
- Proceso secuencial con recocidos intermedios.

El primero de los casos solamente será viable cuando el material empleado en el proceso no alcance la tensión crítica o tensión de rotura durante las etapas sucesivas del mismo, aun considerando que se endurece progresivamente como consecuencia de las deformaciones aplicadas.

En el segundo caso, se debe considerar la condición límite del proceso para cada una de las etapas que completan la secuencia de conformado, cuando la tensión de estirado en una etapa  $i$  llega al valor de la tensión de fluencia que el metal ha alcanzado a la salida de dicha etapa, como consecuencia de la deformación sufrida.

Si la tensión de fluencia es superada, al traccionar del extremo del alambre o barra, se podrían producir deformaciones indeseadas e irreversibles en el metal, una vez conformado, incluso pudiendo llegar a romperse si se supera el límite establecido por la tensión de rotura. Para que esto no ocurra se debe proceder al recocido del metal, antes de dicha etapa, con la finalidad de devolverle la ductilidad y deformabilidad necesarias para poder continuar el proceso secuencial.

### **3.1.3 Diseño de la secuencia de etapas del proceso de estirado multi-etapa considerando únicamente deformación homogénea**

#### **➤ Determinación de las etapas del proceso sin considerar recocidos intermedios**

En un proceso de conformado por deformación plástica el material tiene unas características geométricas y unas propiedades mecánicas iniciales, que se conoce como estado de suministro, y mediante la aplicación del proceso se consigue un producto conformado con unas determinadas características geométricas al mismo tiempo que, generalmente, se mejoran sus propiedades mecánicas para su aplicación.

Que un proceso se pueda realizar o no en una sola etapa va a estar condicionado fundamentalmente por la conformabilidad del material empleado, característica que va a depender de las propiedades mecánicas del mismo.

En el proceso secuencial de estirado multi-etapa existen dos casos bien diferenciados. El trefilado de hilo metálico de pequeña sección es un claro caso de estirado continuo en el que el material pasa de forma sucesiva a través de todas las hileras que constituyen la secuencia de etapas de conformado, desde la sección inicial hasta la sección final. El estirado multi-etapa de barras es de proceso secuencial multi-etapa en el que el material conformado no pasa de forma continua desde una hilera a la siguiente y en este caso cada etapa corresponde al paso del material por una hilera con la correspondiente reducción de sección en el banco de estirado. Ambos procesos son secuenciales y se realizan en sucesivas etapas, en las que la sección se reduce de manera progresiva, pero difieren en la continuidad del desplazamiento del material en toda la secuencia de etapas y, por lo tanto, se realizan en máquinas totalmente diferentes, como se verá más adelante.

Cuando no sea posible el conformado en una sola etapa, se deberá diseñar un proceso constituido en una secuencia de etapas, mediante las cuales se realizará el conformado progresivo del producto, desde la etapa 1 hasta la etapa  $n$ . Esta sucesión de etapas se define como:

1, 2, 3,....., (i-1), i, (i+1),....., n

En el proceso de estirado el metal conformado plásticamente en frío es sometido a un estado de tracción uniaxial simple [Sebastián, 2010] a la salida del dado, de manera que la variación en la tensión  $\sigma$ , para una deformación desde un estado inicial  $\varepsilon_i$  hasta un estado  $\varepsilon_f$  final, se puede obtener por integración de la expresión correspondiente al área bajo la curva de comportamiento del metal. Este fundamento es aplicable en el intervalo de deformación mencionado, tal y como se representa en la Figura 3.2.

$$\sigma = \frac{C}{n+1} (\varepsilon_f^{n+1} - \varepsilon_i^{n+1}) \quad (3.5)$$

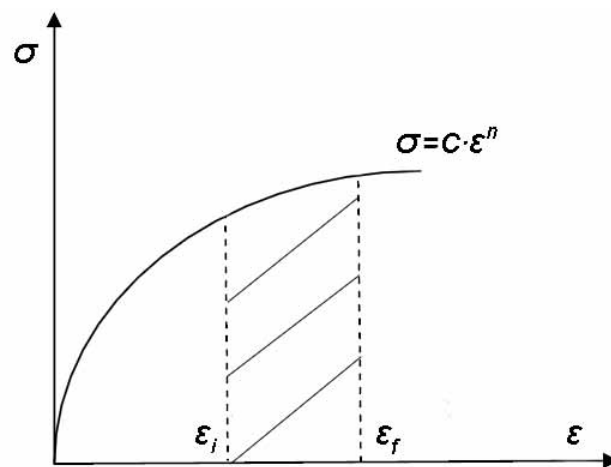


Figura 3.2 Curva tensión-deformación de un metal conformado plásticamente en frío [Sebastián, 2010].

Por otro lado, se debe considerar que el proceso de estirado es un caso claro de tracción uniaxial, en el que la tensión de estirado  $\sigma_{zb}$ , consecuencia de la energía necesaria para conseguir el conformado plástico del metal bajo condiciones de deformación homogénea, viene dada por la expresión:

$$\sigma_{zb} = \int_{\bar{\varepsilon}_i=0}^{\bar{\varepsilon}_f} \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}) \cdot d\bar{\varepsilon} \quad (3.6)$$

El proceso de estirado va a estar condicionado al valor del esfuerzo de tracción aplicado en el metal estirado a la salida de la hilera [Sebastián, 2010]. Si este esfuerzo supera el límite de fluencia del metal conformado, éste podría sufrir deformaciones indeseadas que serían permanentes [Rowe, 1972]. Si se supera incluso el valor de la tensión límite de rotura que posee el metal ya estirado, se llegaría a producir la rotura debida al efecto de la carga de tracción aplicada en el proceso. Es por esto por lo que se establece el valor del límite de fluencia del material estirado como condición límite para la carga o esfuerzo de estirado, en cada una de las etapas de la secuencia de conformado que constituye el proceso multi-etapa, para el desarrollo propuesto.

$$\sigma_{zb} < Y(\varepsilon_f) \rightarrow \frac{C}{n+1}(\varepsilon_f^{n+1} - \varepsilon_i^{n+1}) < Y(\varepsilon_f) \cong C \cdot \varepsilon_f^n \rightarrow \varepsilon_f^{n+1} - \varepsilon_i^{n+1} < \varepsilon_f^n(n+1)$$

$$\frac{\varepsilon_f^{n+1} - \varepsilon_i^{n+1}}{\varepsilon_f^n} < (n+1) \quad (3.7)$$

La expresión anterior permite conocer la deformación máxima  $\varepsilon_{f\text{máx}}$  admisible a la finalización de una etapa del proceso secuencial de estirado, considerando el valor de la deformación inicial  $\varepsilon_i$  y las características dadas por la ley de fluencia del metal.

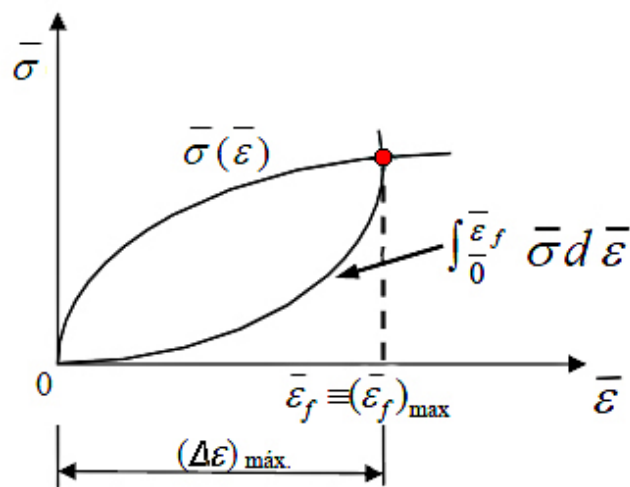


Figura 3.3 Representación gráfica de la condición límite del proceso [Sebastián, 2010].

Si se considera el significado de las expresiones (3.5) y (3.6), como puede apreciarse en la representación gráfica de ambas curvas presentada en la Figura 3.3, es posible discernir claramente una interpretación gráfica para la condición límite del proceso justo en el punto en el que ambas funciones se intersectan para cada etapa.

Considerando lo mencionado anteriormente para un proceso secuencial de estirado multi-etapa, en el cual se supone un comportamiento ideal del metal bajo condiciones de deformación homogénea, partiendo de un estado inicial del metal recocido y con un diámetro inicial  $d_i$  para alcanzar un diámetro final  $d_f$ , la máxima deformación posible, suponiendo que no se aplica recocido intermedio alguno en toda la secuencia de etapas, se representaría tal y como se puede ver en la Figura 3.4.

Como se puede apreciar en la representación gráfica del proceso secuencial de estirado multi-etapa de la Figura 3.4, el incremento de deformación en cada una de las etapas consecutivas ha de ser, necesariamente, cada vez es más pequeño debido al endurecimiento del metal como consecuencia de la deformación.

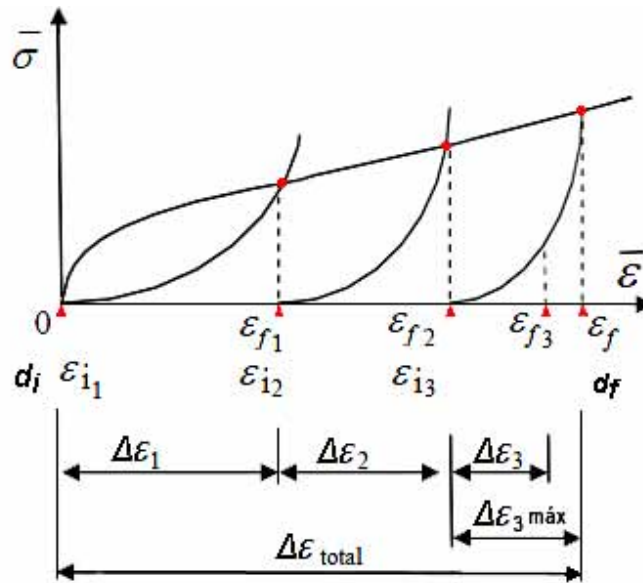


Figura 3.4 Representación gráfica de un proceso de estirado multi-etapa [Sebastián, 2010].

La deformación total del proceso secuencial se expresaría como:

$$\Delta\varepsilon_{total} = \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2 + \Delta\varepsilon_3 = 2 \ln \frac{d_i}{d_f} \quad (3.8)$$

Durante el proceso multi-etapa, el metal incrementa su acritud, disminuyendo su ductilidad a medida que se avanza en las etapas sin aplicársele recocido alguno, con lo cual se vuelve cada vez menos apto para ser conformado plásticamente en frío.

En el caso de que el material fuera plástico perfecto, su coeficiente de endurecimiento por deformación en frío será  $n=0$  y el % de reducción máxima,  $CW\%$ , que se podría alcanzar en la etapa inicial correspondería a un valor  $\varepsilon_f = 1$  para la deformación.

$$\varepsilon = 1 = \ln \frac{1}{1-r} \rightarrow \frac{1}{1-r} = e^1 = 2.7 \rightarrow r = 1 - \frac{1}{2.7} = 0.63 \rightarrow CW\% = 63\% \quad (3.9)$$

La máxima reducción posible en una sola etapa, considerando lubricación perfecta y omitiendo el endurecimiento del material y trabajo adicional, será del 63%.

No obstante, se debe considerar que el trabajo adicional debido a la distorsión interna, la fricción y el endurecimiento por deformación van a reducir considerablemente esta reducción máxima o límite de reducción, que generalmente será de en torno al 48%, siempre que se den las condiciones apropiadas en el proceso de estirado [Rowe, 1972].

Para realizar una reducción total de sección superior a la permitida bajo la condición límite establecida para el proceso de estirado, se diseñará un proceso secuencial de estirado que deberá estar constituido por varias etapas. En cada una de éstas, el límite se establecerá en un valor de la tensión de tracción o tensión de estirado igual al valor de la tensión de fluencia del metal estirado, condición a aplicar para todas y cada una de las etapas del proceso de estirado secuencial multi-etapa.

➤ **Determinación de las etapas del proceso considerando recocidos intermedios**

Como se vio en apartado anterior, se debe considerar que, cuando se parte de metal en estado recocido, la deformación inicial será nula, es decir  $\varepsilon_i = 0$ , con lo que la tensión de estirado viene dada por la expresión:

$$\sigma_{zb} = \frac{C}{n+1} (\varepsilon_f^{n+1}) \quad (3.10)$$

Además, la condición límite para el proceso de estirado de un metal en estado recocido, según lo deducido anteriormente en la expresión (2.30), quedará como:

$$\frac{\varepsilon_f^{n+1}}{\varepsilon_f^n} < (n + 1) \rightarrow \varepsilon_f < n + 1 \quad (3.11)$$

Un proceso secuencial de estirado multi-etapa puede comenzar a partir de un metal recocido cuya estructura se ha estabilizado mediante dicho tratamiento térmico o bien puede realizarse a partir de un metal de partida, que ya ha sido transformado plásticamente en frío antes del proceso de estirado, caso este último en el cual será necesario conocer sus propiedades mecánicas y el % de deformación plástica que acumula dicho material, en el denominado estado de suministro, para así poder determinar la secuencia de etapas del proceso de estirado.

**3.1.4 Parámetros fundamentales del proceso**

En un proceso de conformado plástico mediante la técnica de estirado se van a considerar como parámetros tecnológicos del proceso aquellos que van a depender directamente de la tecnología empleada. La tecnología engloba las maquinarias o sistemas empleados y las herramientas que se utilizan en el proceso.

La hilera, que es la herramienta empleada para el proceso de conformado plástico mediante estirado, se caracteriza por su geometría. Tal y como se ha podido corroborar tras la revisión de multitud de trabajos recientes [Vega et al., 2008] [Cunningam et al., 2011], casi la totalidad de las investigaciones realizadas en el ámbito del proceso de estirado en esta línea [Sadok et al., 1992] [Kampuš, 1999] coinciden en el hecho de que el valor del semi-ángulo  $\alpha$  de la herramienta es el factor geométrico que mayor influencia tiene sobre la tensión necesaria en el proceso de estirado.

En el análisis de tensiones básico del proceso de estirado se suele suponer un único tramo cónico en la hilera, sin embargo la propuesta de esta tesis considera dos tramos fundamentales para la geometría de una hilera de estirado, tal y como se representa en la Figura 3.5. El desarrollo analítico planteado en este trabajo incluye la influencia del tramo correspondiente al cilindro de calibración para el cálculo de la tensión de estirado, pero no la del radio de transición por considerarse un elemento que se aplica fundamentalmente para evitar el desgaste prematuro de la hilera.

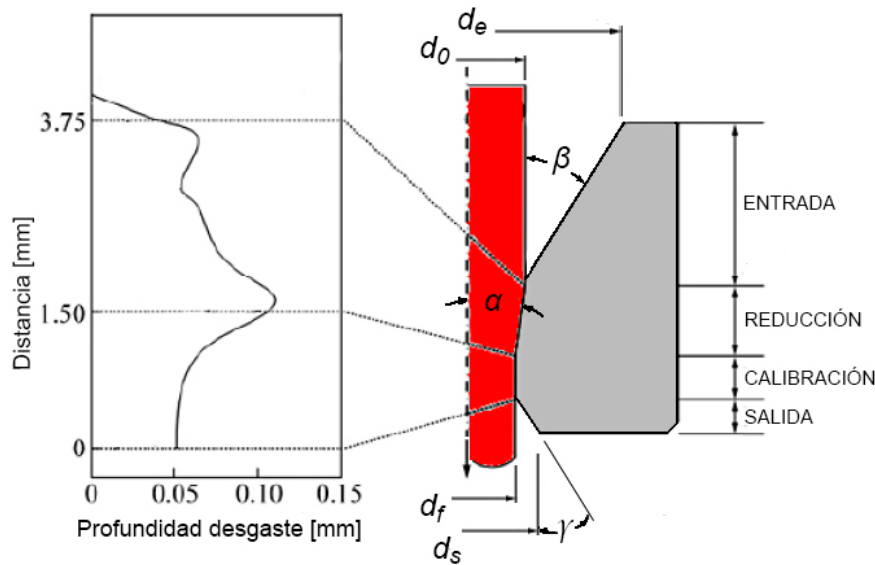


Figura 3.5 Diferentes zonas de la hilera y grados de desgaste [Lee K-H. et al., 2012].

La geometría de la herramienta está caracterizada fundamentalmente por los siguientes parámetros geométricos, los cuales influirán en mayor o menor medida en el análisis de la tensión de estirado  $\sigma_e$  necesaria para realizar el proceso:

$\alpha$ , Tramo de reducción, cónico

$Rh$ , Tramo de transición, radio

$Lc$ , Tramo de calibrado, cilíndrico

Además de estos tres parámetros geométricos, la hilera tiene una zona de entrada o de embocadura, cuyo diámetro mayor  $d_e$  tendrá un valor superior al del diámetro mayor del cono de reducción o diámetro inicial  $d_0$  del alambre o barra. Esta zona permitirá introducir fácilmente la punta de la barra o alambre y, fundamentalmente, favorece la acción del lubricante-refrigerante en la zona de trabajo de la hilera. El cono de salida, en la Figura 3.5, tendrá su diámetro máximo  $d_s$  y un ángulo  $\gamma$  lo suficientemente grandes para evitar la aparición de defectos producidos por el fenómeno de recuperación elástica del metal a su salida de la hilera y permitir la refrigeración del alambre en dicha zona.

Otro aspecto tecnológico fundamental en el cual están de acuerdo todos los estudios realizados hasta el momento, incluyendo los primeros estudios que se realizaron al respecto [Dieter, 1961] [Rowe, 1972], es la gran influencia que tiene el efecto del rozamiento que actúa en la interfase entre la herramienta y la barra o alambre en el proceso de estirado, rozamiento que se produce en la zona de contacto metal-hilera, y que se caracteriza mediante el coeficiente de rozamiento  $\mu$  de Coulomb o coeficiente de rozamiento por deslizamiento (véase Figura 3.6).

El valor del coeficiente de rozamiento  $\mu$ , existente en la zona de contacto entre hilera y metal conformado, va a estar afectado directamente por la tipología del tipo de

lubricante empleado en el proceso. En el presente trabajo se ha integrado la influencia del tipo de lubricante y del sistema de lubricación empleados como un todo, considerando la aplicación del denominado factor de lubricación, tal y como se verá más adelante en la descripción de la aplicación informática desarrollada.

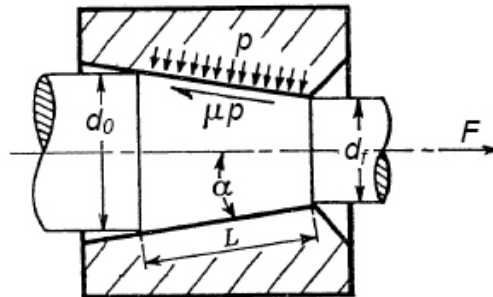


Figura 3.6 Influencia del semi-ángulo  $\alpha$  y del rozamiento [Wistreich, 1955].

Para la realización de la presente tesis se han revisado recientes trabajos de investigación [Changsun et al., 2012] en los que se pretenden abordar novedosos métodos de análisis de este proceso y en los cuales se reitera el hecho de que el semi-ángulo de la hilera y el rozamiento existente en la interfase son considerados como los principales y más importantes parámetros en cuanto a su influencia en los procesos de estirado.

A los parámetros citados anteriormente, que engloban las características geométricas de la herramienta de estirado así como los efectos del rozamiento en el proceso de conformado por deformación plástica mediante la técnica de estirado, se deberá añadir además el efecto de la denominada fuerza de retroceso o “backpull”. Esta tensión puede darse únicamente en los procesos continuos de estirado y no en el estirado convencional de barras. Algunos equipos de trefilado continuo disponen de un dispositivo que permite aplicar y regular la acción de una ligera tensión de tracción en el hilo o alambre a la entrada de la hilera, tensión que va contra dirección de desplazamiento del material en el proceso (véase Figura 3.7).

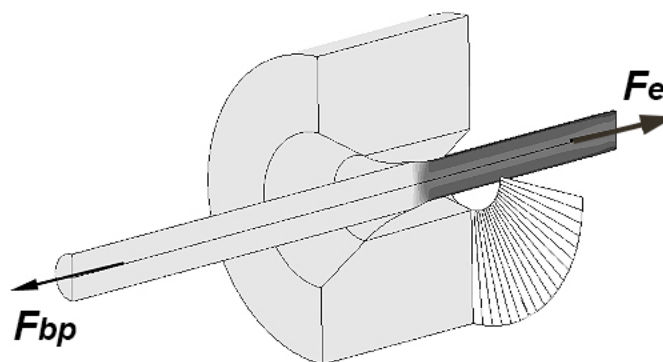


Figura 3.7 Tensión de retroceso o “back-pull” en el trefilado [Kut et al., 2013].

En el pasado se han realizado estudios con el objetivo de esclarecer si la aplicación de este parámetro beneficia o no en algún sentido al proceso [Thompson, 1933] [Dieter, 1961] [Camacho et al., 2005] [Rubio et al., 2005] [Thimont et al., 2011]. Parece evidente la conclusión de que la existencia de esta tensión de retroceso  $\sigma_{bp}$  va a incrementar el valor de la tensión de estirado  $\gamma$ , por tanto, debe considerarse en su caso para el cálculo final de la misma.

En 1949 se realizó el primer gran estudio sobre la instalación de una máquina de trefilado de acero, máquina que disponía de un sistema de regulación y control de la tensión de retroceso aplicada en cada estación de estirado [Lewis et al., 1949]

Está claro que, cuanto mayor sea la reducción de sección realizada, menor será la influencia para un mismo valor de la tensión de retroceso. Esta tensión de retroceso va a tener un efecto directo sobre la condición límite para la máxima reducción posible en el proceso de estirado, ya que la tensión de fluencia del metal se alcanzará antes al incrementarse la fuerza de estirado. La reducción máxima posible será menor con esta tensión de retroceso en el proceso. Sin embargo, las investigaciones referenciadas corroboran que el “*back-pull*” hace disminuir en sobremanera la presión en las superficie de contacto de la hilera, reduciendo el desgaste e incrementando la vida útil de la misma.

La producción de hilo metálico muy fino, realizada en máquinas de trefilado secuencial multi-etapa, no sería posible sin la aplicación de la tensión de retroceso apropiada. El valor óptimo de la tensión de retroceso en una etapa de la secuencia de estirado multi-etapa es aquel valor más cercano a la tensión de retroceso crítica, siendo el valor crítico función directa de las propiedades del material [Skotyszewski et al., 1998].

### **3.1.5 Variables de entrada**

Las propiedades mecánicas del material que se está procesando, además de ser un factor de influencia directa en el valor del coeficiente de rozamiento en la superficie de contacto, constituyen datos fundamentales y necesarios para poder aplicar cualquier tipo de procedimiento analítico al proceso de estirado.

El límite de fluencia  $Y$ , el factor de endurecimiento por deformación  $n$  y el coeficiente de resistencia  $C$  son variables del proceso conocidas al inicio del mismo, en tanto en cuanto se deberán conocer perfectamente las propiedades mecánicas del metal a conformar plásticamente mediante el estirado secuencial multi-etapa.

La geometría inicial del material, más concretamente la forma y dimensiones de su sección transversal, va a condicionar el diseño de la hilera de estirado en la primera etapa del proceso de estirado. En el caso del estirado de una barra o de hilo metálico cilíndrico, el área correspondiente a la sección transversal será función del diámetro y se denominará  $A_0$  al área o sección al inicio del proceso.

La velocidad de salida  $v_f$  al final del proceso debe ser un dato conocido y se corresponderá con la velocidad de producción deseada para el éste. Será posible calcular la velocidad del metal a su entrada en la hilera mediante la expresión 3.12:

$$v_o \cdot A_o = v_f \cdot A_f \quad (3.12)$$

Hay que diferenciar cuando se trata de un proceso de estirado o trefilado secuencial multi-etapa ya que, en este tipo de proceso continuo, la velocidad de entrada de una etapa intermedia cualquiera es la misma que la existente a la salida de la etapa inmediatamente anterior. En consecuencia, para calcular todas las velocidades de entrada y salida en una secuencia con un número determinado de  $i$  etapas, es necesario establecer el valor para la velocidad de producción final del proceso, es decir, a la salida de la última etapa de éste.

En caso de tratarse de una secuencia de etapas realizada en banco de estirado, como proceso discontinuo, es necesario establecer la velocidad de salida deseada en cada etapa para poder determinar las correspondientes velocidades de entrada.

El valor final de la tensión de estirado en cada etapa del proceso secuencial va a presentar una especial sensibilidad a la variación del semi-ángulo  $\alpha$  del cono de la hilera en el caso del estirado de barras o hilo metálico de sección circular.

En base a diversos estudios, se confirma que una reducción del valor de dicho semi-ángulo  $\alpha$  aumenta la energía que se pierde por acción del rozamiento pero, por otro lado, produce una reducción importante en el efecto de las tensiones cortantes opuestas a la dirección de estirado [Dieter, 1961] [Sadok et al., 1992] [Majzoobi et al., 2008] [Lorenzo, 2009]. Como consecuencia, se origina menor distorsión interna en la estructura del metal deformado durante el proceso de estirado cuando dicho semi-ángulo  $\alpha$  es pequeño.

Al aumentar el valor del semi-ángulo  $\alpha$ , la energía necesaria para superar la acción de la fricción va a ser menor, pero aumentará la distorsión interna debida a la deformación, ya que aumentará el valor de los esfuerzos cortantes en dirección opuesta a la tensión traccional de estirado.

Valores grandes del semi-ángulo  $\alpha$ , incrementan la deformación cortante en la zona cercana a la superficie de la barra o hilo [Dieter, 1961], mientras que únicamente es la zona del núcleo, zona cercana al eje del alambre estirado, la que se deforma de forma más homogénea. Este fenómeno provoca un estrés tensional a lo largo del núcleo, fenómeno que origina defectos en forma de huecos internos y que se conocen como "*central bursting*". El vacío central es uno de los defectos más comunes en el proceso de estirado alambre y su aspecto se aprecia en la fotografía de la Figura 3.8.

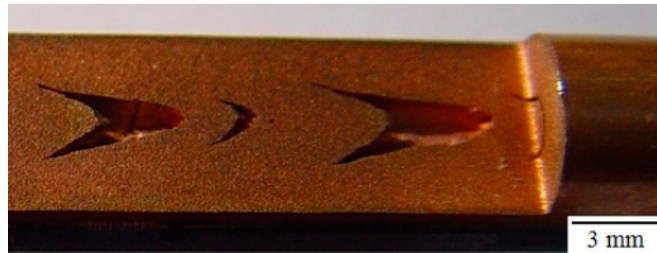


Figura 3.8 Defectos de vacío central en el cobre estirado [Norasethasopon, 2011].

Existen estudios que demuestran que los valores demasiado elevados de  $\alpha$ , junto con las inclusiones o impurezas en el material estirado, son la causa más común de rotura del alambre en el proceso secuencial de estirado multi-etapa. [Norasethasopon, 2011].

### **3.1.6 Variables de salida**

Conocidos todos y cada uno de los parámetros tecnológicos inherentes a la geometría de las hileras empleadas, las condiciones tribológicas en las que se realiza el proceso y las características técnicas de la maquinaria empleada para tal finalidad, será el momento de aplicar una metodología de análisis que posibilite el diseño y análisis de todas y cada una de las etapas del proceso secuencial de estirado multi-etapa. Este análisis va a generar unos valores para todas las variables de salida que definen tecnológicamente el proceso y que se enumeran y describen a continuación.

La variable de salida que completa la definición del diseño de la herramienta de estirado es el diámetro de salida o diámetro final  $d_f$  de la barra o hilo metálico a su salida de la hilera. Conociendo el valor de esa variable en cada una de las sucesivas etapas del proceso secuencial, va a ser posible definir completar el diseño geométrico de cada hilera a emplear en la secuencia de estirado del proceso multi-etapa, ya que el resto de parámetros geométricos son conocidos al iniciar el análisis.

La tensión de tracción mínima que será necesario aplicar en el extremo de la barra o hilo metálico, que hace posible que el metal pase a través de la herramienta y sea conformado plásticamente para transformar su sección y longitud, se denomina tensión de estirado  $\sigma_x$  o  $\sigma_e$ .

El valor de esta tensión de estirado necesaria  $\sigma_x$  o  $\sigma_e$  es la variable de salida cuyo valor va a condicionar el diseño de los sistemas y la maquinaria necesaria para poder realizar el proceso de estirado. Esta tensión de estirado es función de todos los parámetros geométricos del proceso, además de las propiedades del metal que se pretende procesar por estirado y de las condiciones tribológicas existentes.

Cabe recordar que la tensión de estirado va a ser consecuencia de la influencia de las distintas energías que intervienen en el proceso de estirado: la energía debida a la deformación ideal u homogénea del metal, la que se produce como consecuencia del

rozamiento en la interfase metal-herramienta y la debida a la distorsión interna de la estructura del metal deformado [Avitzur, 1983] [Peña, 2008].

A partir del valor de salida obtenido para la tensión de estirado  $\sigma_e$  será posible conocer la magnitud de la fuerza  $F$  de estirado. El valor de la potencia  $P$ , requerida para generar la fuerza de estirado, es función de la velocidad de salida del material en cada una de las etapas del proceso secuencial multi-etapa. De esta forma quedarán definidos todos los parámetros tecnológicos del proceso secuencial de estirado multi-etapa.

### **3.2 Implementación del método de análisis local de tensiones en la metodología propuesta**

Los métodos descritos en el capítulo segundo, aplicables al análisis del proceso de estirado, sean analíticos, numéricos o experimentales, se fundamentan en ciertas hipótesis simplificadoras del proceso, acotándose su validez a dichas condiciones.

Se trata de métodos que ofrecen resultados precisos, incluso algunos de ellos siguen aplicándose hoy en día para el diseño y análisis de algunos de los procesos de conformado por deformación plástica. No obstante, hay que tener muy presente que todos ellos implican la necesidad de conocer con gran exactitud los parámetros tecnológicos de entrada, las condiciones de contorno, además de las propiedades mecánicas del material a procesar y la evolución de éstas durante el proceso. En los procesos y máquinas utilizadas en la industria actual, en la que la tasa de producción es un objetivo fundamental, se pueden llegar a emplear altas velocidades que implicarán un incremento de temperatura en la zona de deformación tal que podría llegar a tener una influencia notable a la hora de diseñar del proceso secuencial multi-etapa.

Por todos estos motivos y como se ha expuesto anteriormente, ha de quedar muy claro que los resultados de este trabajo se enmarcan en unas condiciones tribológicas en las cuales se asume despreciable la influencia de velocidad y temperatura en el diseño de la secuencia de etapas e, acotándose la aplicabilidad de la metodología desarrollada en dicho marco.

El método de análisis local de tensiones (MALT), como método analítico que es, presenta en mayor o menor medida las mismas deficiencias que los otros métodos descritos anteriormente. Se trata de un método que, aunque ofrece resultados que se aproximan bastante a los valores reales, debe ser utilizado con cierta cautela.

Es el caso en el que, bajo determinadas condiciones (por ejemplo cuando se emplean fuerzas externas superiores a las estrictamente necesarias para conseguir el conformado plástico), se produce una distorsión interna en la estructura del metal conformado, lo que puede dar lugar a resultados erróneos utilizando un método que no considera la influencia de este factor.

Cuando se realizan grandes reducciones de sección, empleando hileras con semi-ángulo  $\alpha$  pequeño, el método de análisis local de tensiones ofrece buenos resultados, a diferencia cuando las reducciones de sección son más pequeñas y el semi-ángulo mayor, caso este último en el que se obtienen valores notablemente inferiores de la tensión de estirado  $\sigma_e$  a aquellos obtenidos en ensayos reales.

En esta tesis, se ha estudiado el proceso secuencial de estirado multi-etapa utilizando el método de análisis local de tensiones, revisando todos los antecedentes bibliográficos e investigadores encontrados al respecto, para poder complementarlo con el objetivo mejorar los resultados de su aplicación en el presente trabajo. Se han estudiado minuciosamente toda la documentación encontrada, tratando de precisar cuáles son exactamente los factores que provocan dichas limitaciones, determinando aquellos que tienen una mayor influencia en el proceso. El resultado de este meticuloso estudio documental ha sido la inclusión de todos los factores implicados en el estirado en el desarrollo de la aplicación de la metodología propuesta para el diseño y estudio del proceso secuencial de estirado multi-etapa.

En la metodología propuesta se desarrollan dos partes o fases diferenciadas: el objetivo en la primera fase es el diseño de la secuencia y en una segunda su análisis tecnológico.

En una primera fase, el procedimiento consiste en la determinación del diseño de todas y cada una de las etapas que constituyen la secuencia del proceso de estirado multi-etapa, mientras que en una segunda fase se ha establecido un procedimiento que permite el cálculo de los valores de cada uno de los parámetros tecnológicos. El conocimiento de la tensión de estirado, las tensiones límite, las velocidades, las fuerzas y las potencias, van a permitir el análisis y la evaluación del proceso. Una vez definido tecnológicamente el proceso, será posible conocer las necesidades de diseño y las especificaciones técnicas de las máquinas que se deben utilizar para poder realizar satisfactoriamente el proceso de estirado secuencial multi-etapa diseñado.

### **3.3 Metodología de análisis del proceso secuencial de estirado multi-etapa**

En este capítulo se presenta el desarrollo de la propuesta de una nueva metodología de análisis y diseño tecnológico de procesos secuenciales de estirado. Basada en el método de análisis local de tensiones aplicado al proceso secuencial de estirado multi-etapa e implementada como aplicación informática, esta metodología va a permitir el diseño y definición tecnológica del mismo.

La metodología es aplicable en cualquier caso representativo de un proceso secuencial de estirado constituido en varias etapas y, aunque se ha desarrollado únicamente para productos de sección circular, va a permitir el estudio de los parámetros y variables

que gobiernan este tipo de proceso industrial y determinan el diseño geométrico y tecnológico del mismo, de forma general.

### **3.3.1 Justificación de la aplicación de la metodología propuesta**

Existen diversos trabajos de investigación en los que se corrobora el grado de fiabilidad que ofrece el método de análisis local de tensiones aplicado al estudio del proceso de estirado, concretamente a la determinación de la tensión de estirado [Lima-Filho, 2003] [Rubio et al., 2005] [Hassan et al., 2015]. En los resultados de estos estudios se refleja la aplicabilidad de este método de análisis al proceso de estirado y su sensibilidad frente a los resultados obtenidos por otros métodos, tales como los numéricos o los experimentales. Por lo tanto, el método de análisis local de tensiones ha sido establecido como punto de partida en este trabajo, como idea fundamental, para el desarrollo de una metodología que permitirá el diseño y análisis de un proceso secuencial de estirado multi-etapa.

Existen múltiples de estudios en los cuales se estudia de proceso de estirado multi-etapa, pero es importante observar que existen objetivos muy diferentes en la consecución de cada trabajo de investigación.

Algunos pretenden determinar la influencia de determinados parámetros, como la tensión de retroceso [Thimont et al., 2011] o el semi-ángulo de la hilera [de Castro et al., 1996] a la hora de diseñar la secuencia del proceso. Es habitual estudiar la influencia de este tipo de parámetros en las características y propiedades mecánicas del producto estirado, el estudio del comportamiento mecánico del material tras cada etapa y en el producto final obtenido del proceso secuencial [Luksza et al., 1998]. Otros han dirigido sus trabajos a conseguir mejoras en el proceso, como minimizar los consumos de energía o disminuir el desgaste de las herramientas [Liang-Zhang et al., 2013].

En el presente se pretende presentar una metodología, implementarla en una sencilla aplicación informática, para el diseño del proceso secuencial de estirado multi-etapa y el análisis de la influencia de los principales parámetros que intervienen en él.

Se pretende abrir un nuevo camino, considerando la posibilidad de aplicar el método de análisis local de tensiones para diseñar y analizar un proceso secuencial de estirado realizado en una serie de etapas sucesivas de conformado. En el desarrollo de esta nueva metodología se establecen las bases para diseñar la secuencia de estirado, se estudia la sensibilidad de los resultados obtenidos en función de la variación en los valores de cada una de las variables más significativas del proceso y se analiza y valorar la sensibilidad de esta metodología aplicada a un caso real.

Este trabajo ofrece, una vez acotado el campo y las condiciones de aplicación de la propuesta y conocidas sus deficiencias y limitaciones, un nuevo reto investigador

dirigido al desarrollo y mejora de esta nueva metodología de diseño y análisis a otros materiales y procesos secuenciales de estirado.

Cabe reseñar, además, la aportación al ámbito docente que se realiza de manera indirecta con la consecución del presente trabajo de investigación. Como se explica más adelante, la aplicación de la metodología propuesta se lleva a cabo utilizando una aplicación informática, herramienta desarrollada para facilitar los cálculos para el diseño y análisis tecnológico del proceso secuencial de estirado. Dicho software, creado en base a los fundamentos de la teoría de la plasticidad y el método analítico aplicado al proceso de estirado, podrá ser utilizado por profesores y alumnos gracias a su sencillo manejo.

Se trata de una metodología de carácter general, implementada en una aplicación informática fácil de utilizar, que permite el análisis del proceso de estirado multi-etapa en función de cada una de sus variables iniciales y podría desarrollarse para otros procesos de conformado plástico multi-etapa. La citada aplicación informática ofrece la información y permite obtener conclusiones sobre la influencia de una variable o parámetro determinado, definir el diseño del proceso, realizar estudios comparativos de procesos similares, etc.

Los procesos de conformado por deformación plástica, en general, y en particular el proceso de estirado, es uno de los procesos de conformado por deformación plástica más utilizados en la industria actual y multitud de productos y subproductos metálicos se fabrican mediante este proceso.

En el presente trabajo se han considerado una serie de materiales representativos, empleados habitualmente como materia prima en este tipo de tecnología, con el fin de evaluar el funcionamiento correcto de la metodología y la aplicación informática.

Se han estudiado diferentes variables de entrada, geométricas y tecnológicas, tomando como referencia trabajos de otros autores y procesos reales. Este completo trabajo de aplicación ha ofrecido unas conclusiones mediante las que se ha acotado la aplicabilidad de la herramienta creada, para unos materiales y en un rango de valores de las diferentes variables estudiadas, en base a los resultados obtenidos.

El presente trabajo proporciona una nueva alternativa para el diseño, el estudio y la optimización de un proceso secuencial de estirado multi-etapa.

### **3.3.2 Introducción a la metodología propuesta**

En un proceso de conformado por deformación plástica como el estirado, el metal tiene unas características geométricas y unas propiedades mecánicas iniciales, conocidas como estado de suministro. Con el proceso se consigue un producto

conformado, con unas determinadas características geométricas al mismo tiempo que, generalmente, se mejoran las propiedades mecánicas para sus diferentes aplicaciones.

Que un proceso se pueda realizar o no en una sola etapa va a estar condicionado, fundamentalmente, por la conformabilidad o capacidad del metal para ser deformado plásticamente en frío. Esta característica depende, además de las propiedades mecánicas del metal, del efecto del rozamiento en la interfase y, por consiguiente, de la geometría de la hilera de estirado.

La metodología propuesta en este trabajo se fundamenta en algunos aspectos de la teoría de la plasticidad y se apoya en las conclusiones y resultados obtenidos en diversos estudios sobre el comportamiento de los metales cuando son conformados plásticamente en frío [Wistreich, 1955], como es el caso de la ley de endurecimiento por deformación plástica en frío de los metales [Hollomon, 1945].

En base a los trabajos realizados anteriormente por otros autores [Sebastián, 2010] [Rowe, 1972], se conoce un procedimiento que se ha implementado como una primera opción para la **primera fase** o fase de diseño del proceso de estirado multi-etapa de la metodología propuesta.

En esta primera opción se considera únicamente el efecto del trabajo producido por el efecto de la deformación homogénea del metal durante el estirado, omitiendo el efecto del rozamiento en la zona de contacto metal estirado-hilera y el de la deformación no homogénea debida al trabajo adicional existente en el proceso de estirado.

Una segunda opción se ha implementado con el objeto de condicionar el diseño del proceso secuencial de estirado a algún otro factor, alguna condición que considere el efecto del rozamiento en la zona de deformación y el efecto de la distorsión interna no homogénea. Esta segunda opción propone como condición límite geométrica el denominado factor  $\Delta$  delta. Para un valor óptimo de este parámetro el efecto del rozamiento y la deformación homogénea también lo son [Davis et al., 1944], [Wright, 1979], [Kristensen et al., 2004]. Conociendo  $\Delta$ , la geometría de la hilera puede ser completamente definida.

En una **segunda fase**, la metodología se complementa mediante la aplicación del método de análisis de las tensiones locales ampliado, según la ecuación 2.21, a cada una de las etapas en las que ha quedado constituido en diseño del proceso secuencial de estirado multi-etapa, cuyo diseño geométrico fue previamente determinado mediante la aplicación de una de las dos opciones disponibles en la fase primera de la metodología. En esta fase se determinan los valores de todos los parámetros que definen tecnológicamente todas y cada una de las etapas del proceso secuencial multi-etapa diseñado.

### **3.3.3 Descripción de la metodología propuesta**

La metodología propuesta se implementa en la aplicación informática *PullWorks* y está constituida en dos fases bien diferenciadas: la fase primera o fase para la definición del diseño del proceso secuencial de estirado multi-etapa y la segunda fase o fase para la determinación de los parámetros tecnológicos del mismo.

A continuación, se presentan en detalle las dos fases fundamentales en las que se estructura la metodología que se propone y es objeto de estudio en esta tesis.

#### **➤ Primera fase: Diseño de la secuencia de etapas.**

Cada una de las opciones de la fase inicial o fase de diseño se corresponde con la aplicación de una determinada condición límite al diseño del estirado que, en todos los casos será función de diversos factores de influencia en el proceso estirado.

Estas condiciones límite han sido implementadas en dos opciones diferentes, para determinar completamente el diseño de la secuencia de etapas que constituye el proceso de estirado multi-etapa, ofreciendo diferentes resultados en función de los factores de influencia considerados en cada opción. En la segunda fase se determinará el valor de todos y cada uno de los parámetros tecnológicos en todas las etapas del proceso, en función del diseño obtenido anteriormente.

#### **OPCIÓN 1ª: Diseño condicionado a la deformación máxima admisible, considerando deformación homogénea, para la determinación del diseño de la secuencia del proceso de estirado.**

El grado de deformación alcanzado por el material durante una etapa concreta del proceso de estirado viene dado por la expresión 3.13:

$$\varepsilon_i = \ln \left[ \frac{1}{(1-r_i)} \right] \quad , \quad \text{donde } r_i = 1 - \left( \frac{df_i}{d0_i} \right)^2 \quad (3.13)$$

De igual forma, se mencionó que la deformación en frío tiene como consecuencia un endurecimiento del material, que implica el incremento en el valor de la tensión de fluencia según la expresión 3.14:

$$Y_i = C \cdot \varepsilon_i^n \quad (3.14)$$

Además, se debe tener en cuenta que, cuando se aplique un tratamiento térmico de recocido en cualquier etapa intermedia del proceso secuencial, el material recuperará su deformabilidad y su tensión de fluencia disminuirá hasta un valor  $Y_0$  o tensión de fluencia del material recocido. Este tipo de tratamiento se aplicará generalmente, para restituir la deformabilidad del metal estirado, en el momento en el que se ha agotado prácticamente toda su capacidad de ser deformado en frío.

Esta opción se fundamenta en las condiciones de deformación homogénea y establece la condición límite para el proceso de estirado en frío cuando la tensión de estirado alcanza el valor del límite de fluencia del metal deformado, en base al estudio de deformaciones del proceso [Sebastián, 2010]. Para ello se aplican las expresiones 3.15 y 3.16, según se trate de una etapa en la que el metal posee una deformación acumulada  $\varepsilon_0$  o una etapa en la que este acaba de recocerse  $\varepsilon_0=0$ , entonces:

$$\frac{\varepsilon_f^{n+1} - \varepsilon_0^{n+1}}{\varepsilon_f^n} < (n + 1) \quad (3.15)$$

$$\frac{\varepsilon_f^{n+1}}{\varepsilon_f^n} < (n + 1) \rightarrow \varepsilon_f < n + 1 \quad (3.16)$$

Además, se puede considerar también que el incremento de deformación  $\Delta\varepsilon$  producido en una etapa cualquiera del proceso secuencial estirado multi-etapa viene dado por la expresión siguiente:

$$\Delta\varepsilon = Ln \frac{A_0}{A_f} = Ln \left( \frac{d_0^2}{d_f^2} \right) = 2Ln \left( \frac{d_0}{d_f} \right) \quad (3.17)$$

A partir de esta ecuación se obtiene la expresión para el cálculo del diámetro de la barra o alambre estirado, en el caso de estirado de productos de sección circular:

$$d_f = d_0 \cdot e^{\frac{-\Delta\varepsilon}{2}} \quad (3.18)$$

Una vez conocido el diámetro de salida  $d_f$ , es posible conocer la deformación aplicada  $\varepsilon$ , el valor del ratio de conformado  $r$  y del factor delta o factor de forma de la hilera  $\Delta$ , definiéndose completamente el diseño geométrico del proceso en cada etapa de la secuencia multi-etapa.

En esta opción se pasa por alto el efecto del rozamiento o el de la deformación adicional, como se ha puntualizado anteriormente. Por lo tanto, es aconsejable establecer un límite seguro para el valor del ratio de deformación a aplicar en cada etapa, aproximadamente un máximo de  $0,35 < r < 0,45$  como condición general [Dieter, 1961], [Rowe, 1972]. Se aconseja observar también un resultado para el factor delta  $\Delta$  tal que  $1 < \Delta < 3$  [Hosford et al., 2007], [Wright, 1979], lo que garantiza que el proceso se realiza bajo condiciones óptimas.

El procedimiento descrito ofrece resultados que no van a ser muy acordes con la realidad y, por lo tanto, se hace conveniente aplicar alguna otra condición límite adicional al diseño de la secuencia de etapas. Esta nueva condición debe considerar, además de la geometría de la herramienta y la deformación homogénea del metal, la influencia de la fricción que existe en la zona de contacto entre el material y la herramienta, además de los efectos de la deformación adicional no homogénea que produce la distorsión interna del metal que ha sido deformado plásticamente.

A continuación, se describe el procedimiento a seguir para la determinación del diseño de las etapas, en un proceso secuencial de estirado multi-etapa realizado en frío, que se fundamenta en los aspectos citados anteriormente:

- Del metal en estado de suministro, empleado como materia prima del proceso, se conocen sus propiedades mecánicas. Las constantes  $C$  y  $n$ , que definen su comportamiento frente al endurecimiento por deformación en frío, se obtienen a partir de los correspondientes ensayos de tracción del metal en diferentes grados de deformación.
- Se aplica la condición límite de estirado en frío [Sebastián, 2010] para el metal recocido, definida en la expresión 3.15, obteniendo la deformación máxima  $\varepsilon_{fmax1}$  que admite dicho metal sometido al proceso de estirado.
- Como  $\varepsilon_0=0$  para el metal recocido, una vez conocida la deformación máxima aplicable, es posible conocer el incremento de deformación máxima  $\Delta\varepsilon_{max1}$  que admitirá el material en esta primera etapa.
- La expresión 3.18 permite calcular el valor del diámetro de salida del producto estirado en esa primera etapa  $d_{f1}$ .
- Considerando un redondeo del valor de salida  $d_{f1}$  a la baja, generalmente en décimas de milímetro, se determina el diámetro mínimo de salida que define la máxima reducción de sección admisible en esta etapa.
- Una vez determinado el valor de salida  $d_{f1}$  en la etapa inicial, se recalculará el incremento de la deformación  $\Delta\varepsilon_{max1}$  y la propia deformación efectiva  $\varepsilon_{fmax1}$ .
- En este momento se debe determinar si es necesario un tratamiento de recocido antes de realizar la siguiente etapa. Para realizar esta comprobación se considerará el grado de deformación en frío máximo que admite el material.

En caso de haberse realizado un tratamiento de recocido se aplica nuevamente la condición límite para el estirado en frío, definida en la expresión 3.15, para conocer la deformación máxima en la siguiente etapa  $\varepsilon_{fmax2}$ . Sin embargo, si el material no fue tratado térmicamente y se continúa el estirado conservando las propiedades del metal tal y como sale de la etapa anterior, se aplicará la condición límite correspondiente al estirado de un metal deformado y endurecido por deformación plástica, según la expresión 3.16.

- Cuando se trata de una etapa intermedia cualquiera, en la cual el metal avanza sin recocer, el procedimiento para el cálculo de la deformación máxima  $\varepsilon_{fmax2}$  a la salida de dicha etapa intermedia se realiza utilizando un procedimiento de tanteo, procedimiento que consiste en asumir un valor estimado inicialmente para la deformación máxima en la etapa que se está estudiando  $\varepsilon_{max(i)}$ .

Como punto de partida para este valor, se estima el resultado de sumar el valor de la deformación acumulada al inicio de dicha etapa  $\Delta \epsilon_{(i)}$  y el incremento de deformación máxima obtenido en la etapa anterior  $\epsilon_{max (i-1)}$ .

De esta forma se obtiene un valor final para la igualdad de la expresión 3.16, que podrá ser mayor o menor que el valor límite. En caso de que sea mayor, se deberá realizar el tanteo nuevamente empleando un valor ligeramente inferior al estimado. En caso contrario, el valor obtenido para la deformación máxima  $\epsilon_{fmax2}$  es el límite para la deformación posible en dicha etapa.

Acto seguido es posible determinar el incremento máximo de deformación correspondiente a dicha etapa  $\Delta \epsilon_{max (i)}$ .

- Conociendo el diámetro de entrada en una etapa intermedia  $d_{0 (i)}$ , que es igual al diámetro de salida del material estirado en la anterior  $d_{f (i-1)}$ , es posible calcular el diámetro de salida de la etapa intermedia que se está estudiando  $d_{f (i)}$ . Al igual que en la primera etapa, en las etapas intermedias se considerará un redondeo del valor obtenido para el diámetro de salida a la baja, valor correspondiente al diámetro de salida mínimo posible y a la máxima reducción de sección posible bajo la condición límite establecida en esta teoría.
- El procedimiento se reitera hasta alcanzar el diámetro final deseado, aplicando las expresiones correspondientes y considerando si se ha realizado o no un tratamiento de recocido antes de la ejecución del estirado en cada una de las etapas de dicho proceso multi-etapa.

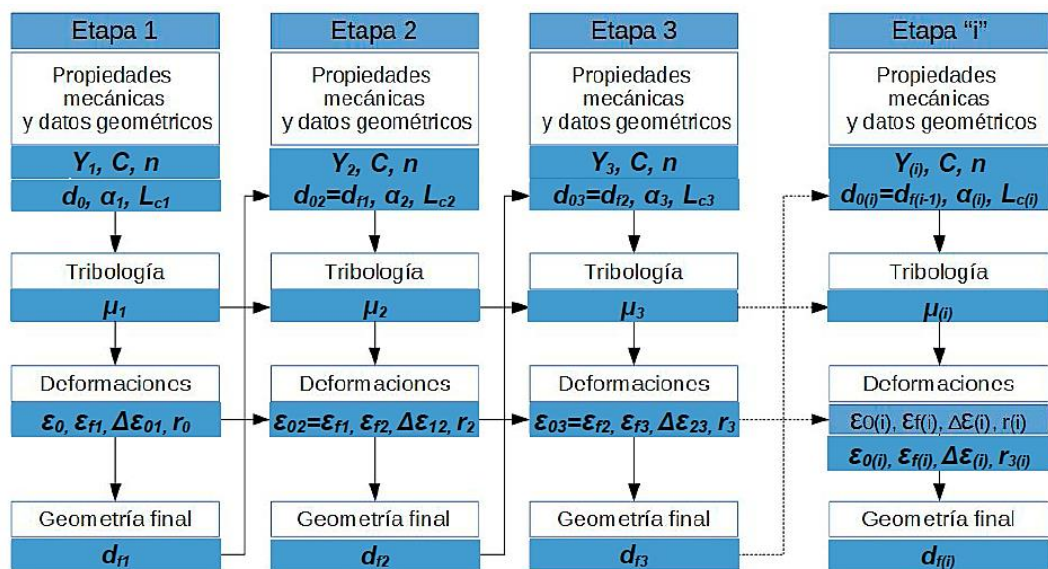


Figura 3.9 Diseño de la secuencia de etapas bajo deformación homogénea [Sebastián, 2010].

**OPCIÓN 2ª: Condición límite condicionada a la geometría óptima de la herramienta para la determinación del diseño de la secuencia del proceso de estirado.**

En este procedimiento se reconoce una primera fase, representada en el diagrama de la Figura 3.9, en la cual se obtienen el diseño geométrico y las deformaciones acumuladas y parciales del en todas las etapas del proceso secuencial multi-etapa.

Como se vio al inicio del capítulo segundo, el factor de forma de la hilera, denominado delta  $\Delta$ , determina el ratio entre el diámetro medio y la longitud de contacto material-hilera, en la zona correspondiente al cono de reducción [Hosford et al., 2007], [Wright, 1979] y se expresa mediante la expresión 3.19 ya conocida:

$$\Delta = \frac{d_0 + d_f}{d_0 - d_f} \cdot \operatorname{sen} \alpha \quad (3.19)$$

Despejando  $d_f$  se obtiene la expresión que permite determinar el valor del diámetro final  $d_f$  en función del diámetro inicial  $d_0$ , el semi-ángulo  $\alpha$  y un valor  $\Delta$  establecido:

$$d_f = \frac{d_0(\Delta - \operatorname{sen} \alpha)}{(\Delta + \operatorname{sen} \alpha)} \quad (3.20)$$

La ratio correspondiente a la reducción obtenida en una etapa de estirado se expresa mediante la expresión 3.21, presentada como ecuación 2.2 en el capítulo anterior:

$$r = 1 - \left(\frac{d_f}{d_0}\right)^2 \quad (3.21)$$

Además, como se vio en el capítulo segundo, el factor delta se expresa también como:

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} \left[1 + \sqrt{1 - r}\right]^2 \quad (3.22)$$

Según la bibliografía existente al respecto y los trabajos de diversos autores, valores bajos del factor delta  $\Delta$  implican mayor influencia de la fricción, mientras que valores altos en dicho factor implican un excesivo trabajo adicional. Se considera que el valor óptimo de delta  $\Delta$ , para la mayoría de diseños de hilera comercialmente conocidos, es cercano a  $\Delta=3$  en condiciones normales del proceso [Siebel, 1947] [Wright, 1979].

Para un diseño geométrico óptimo de la matriz o hilera de estirado, en un proceso realizado bajo condiciones tribológicas y dinámicas adecuadas que minimicen el efecto de fricción y velocidad, se pueden considerar los siguientes intervalos aconsejados para el valor del factor de forma o factor delta  $\Delta$ :

- ✓ Para disminuir los efectos de la fricción  $2 \leq \Delta \leq 3$ .
- ✓ Para minimizar el desgaste en la superficie de contacto  $1 \leq \Delta \leq 2$ .
- ✓ Por encima de 3 ( $\Delta > 3$ ) se acentúa el efecto del trabajo adicional y la distorsión interna del metal conformado.
- ✓ Por debajo de 1 ( $\Delta < 1$ ) se incrementa el efecto del rozamiento metal-hilera.

En esta opción se propone una nueva condición límite geométrica fundamentada en las conclusiones expuestas y en base a la experiencia. Un valor límite óptimo para el factor delta o  $\Delta_{\text{óptimo}}$ , generalmente  $1 \leq \Delta \leq 3$ , se establecerá como condición de entrada para el diseño de un proceso de estirado. Este valor se debe establecer, generalmente dentro del rango especificado y justificado según los razonamientos expuestos, en función del resultado que se quiere obtener para las propiedades del metal estirado.

La expresión 3.20 va a permitir determinar el valor de salida  $d_f$  para cada una de las etapas del proceso secuencial.

La metodología propuesta ofrece una primera opción, descrita anteriormente, que generalmente va a ofrecer valores del factor delta por encima de 3 ( $\Delta > 3$ ) en todas las etapas diseñadas, algo que no es aconsejable. En definitiva, esta segunda condición límite se debe aplicar teniendo en cuenta que:

- ✓  $n, d_0 \rightarrow 1^{\text{a}}$  opción de diseño  $\rightarrow d_f, r, \Delta \rightarrow$  Si  $1 \leq \Delta \leq 3 \rightarrow d_f, r, \Delta$
- ✓  $n, d_0 \rightarrow 1^{\text{a}}$  opción de diseño  $\rightarrow d_f, r, \Delta \rightarrow$  Si  $\Delta < 1$  ó  $\Delta > 3 \rightarrow 2^{\text{a}}$  opción de diseño
- ✓  $2^{\text{a}}$  opción de diseño  $\rightarrow n, d_0, \alpha, \Delta_{\text{óptimo}} \rightarrow d_f, \epsilon, r$

Esta condición límite para el diseño de la secuencia de etapas permite al usuario, a diferencia de la primera opción, interactuar con el sistema experto en el cual se ha implementado la metodología propuesta.

El usuario del sistema desarrollado puede realizar variaciones, generalmente dentro del rango óptimo de  $\Delta$ , de forma que es posible obtener diversas variantes de un mismo proceso. La metodología arroja el diseño óptimo para el proceso secuencial de estirado multi-etapa, pero será el usuario quien, con su criterio y experiencia, deberá alimentar al sistema para obtener los mejores resultados y la mejor solución.

El flujo de la información y datos que intervienen en esta segunda opción de diseño se muestra en el siguiente diagrama de la Figura 3.10:

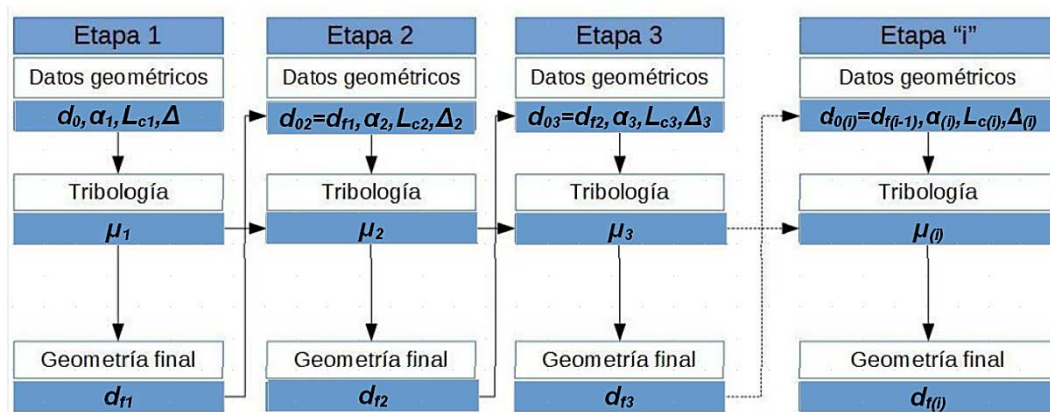


Figura 3.10 Diseño de la secuencia aplicando  $\Delta$  óptimo [Rowe, 1972], [Gur'yanov, 2008].

➤ **Segunda fase: Determinación de los parámetros tecnológicos del proceso secuencial de estirado multi-etapa.**

Una vez definido el diseño del proceso mediante una de las dos opciones presentadas para la primera fase de la metodología, el sistema facilita una segunda fase de análisis en la que se determinan los parámetros que definen tecnológicamente cada etapa del proceso secuencial de estirado multi-etapa que fue diseñado.

Esta segunda fase se basa fundamentalmente en la expresión de cálculo de la tensión de estirado  $\sigma_x$ , obtenida a partir del método de análisis local de tensiones y ampliada según la expresión 2.21, expresión desarrollada en el capítulo segundo.

Cabe señalar que, dentro de los procesos secuenciales de estirado multi-etapa se diferencian fundamentalmente dos variantes.

Las etapas de un proceso secuencial de estirado pueden ocurrir de forma simultánea, continua y consecutiva en el tiempo como ocurre en el estirado de hilo metálico o trefilado o pueden estar desacopladas y realizarse de manera discontinua, tal como sucede en el estirado secuencial de barras.

Estas dos variantes van a constituir dos posibilidades al inicio del procedimiento en esta segunda fase de la metodología, es decir, este procedimiento va a permitir elegir si el proceso que se quiere analizar es de una u otra tipología. Este aspecto se expone un poco más adelante.

El procedimiento se inicia, en esta segunda fase de análisis, con la determinación de la tensión de estirado  $\sigma_x$  mínima necesaria, para el caso del estirado de productos de sección circular. Dicha expresión ha sido desarrollada considerando los factores de influencia que se enumeran en la ecuación 3.23:

$$\sigma_x = \sigma_{dh} + \sigma_{roz} + \sigma_{bp} + \sigma_{di} + \sigma_{cal} \quad (3.23)$$

Tal y como se describe en la expresión 2.21 del capítulo segundo, la tensión final de estirado  $\sigma_{xi}$  para una etapa cualquiera del proceso multi-etapa sería entonces:

$$\sigma_{xi} = \bar{Y} \frac{(1+B)}{B} \left[ 1 - \left( \frac{d_{fi}}{d_{oi}} \right)^{2B} \right] + \sigma_{bp} \left( \frac{d_{fi}}{d_{oi}} \right)^{2B} + \frac{4\bar{Y}}{3\sqrt{3}} \tan \alpha + 0'1 \cdot \mu \cdot \frac{L_c}{d_{fi}} \bar{Y} \quad (3.24)$$

Cabe puntualizar que el valor de la tensión de fluencia a considerar en este cálculo debe ser el correspondiente a la tensión de fluencia media, valor medio de esta propiedad del metal antes y después de haber pasado por una determinada etapa, pues sólo si es así se estará considerando implícitamente el efecto del endurecimiento del metal en cada etapa concreta.

Una vez que el diámetro de salida  $d_f$  y la tensión de estirado  $\sigma_e$  han sido determinadas, es posible conocer el valor de la fuerza de estirado  $F$ , para todas las etapas del proceso secuencial de estirado multi-etapa diseñado, del mediante la siguiente expresión:

$$F_i = \sigma_i \cdot A_i \quad (3.25)$$

Antes de poder calcular la potencia requerida será necesario conocer el valor de la velocidad a la salida, en cada etapa del proceso secuencial de estirado. En este punto es necesario diferenciar entre el estirado de barras en banco de estirado y el trefilado continuo de hilo metálico.

Cuando se realiza un proceso secuencial de estirado multi-etapa de una barra en un banco de estirado la velocidad de salida puede ser cualquiera, siempre que la potencia de la máquina y las propiedades mecánicas del material a estirar y de las hileras lo permitan, en cada una de las etapas de la secuencia. La metodología desarrollada requiere que sean establecidas las velocidades de salida para cada una de las etapas del proceso diseñado, de manera que así es posible determinar las velocidades de entrada correspondientes mediante la expresión 3.26:

$$v_{oi} \cdot A_{oi} = v_{fi} \cdot A_{fi} \quad (3.26)$$

Cuando se trata de un trefilado, el sistema propuesto considera que la velocidad de entrada de una etapa intermedia cualquiera es la misma que la correspondiente a la salida de la etapa inmediatamente anterior. En consecuencia, el procedimiento de cálculo requiere que, al menos se, establezca la velocidad deseada a la salida del proceso. Es necesario indicar cuál es el valor deseado para la velocidad de producción del proceso diseñado. Se puede deducir que, para determinar las velocidades de entrada y salida en todas las etapas del proceso secuencial en este caso, se aplica la misma expresión 3.26, comenzando por la última etapa y calculando hacia atrás.

Una vez conocidas las fuerzas y velocidades es posible realizar el cálculo de la potencia requerida para cada etapa del proceso secuencial de estirado multi-etapa diseñado según la expresión 3.27:

$$P_i = F_i \cdot v_{fi} \quad (3.27)$$

El conocimiento tecnológico del proceso secuencial ayudará a diseñar todos los elementos mecánicos y sistemas electro-mecánicos, eléctricos y electrónicos que constituyen las máquinas utilizadas para el estirado de barras (bancos de estirado) y para el trefilado de hilo metálico (trefiladoras lineales y trefiladoras de poleas).

En el correspondiente diagrama de flujo de la Figura 3.11 se describe gráficamente el funcionamiento de la metodología propuesta en el presente trabajo.

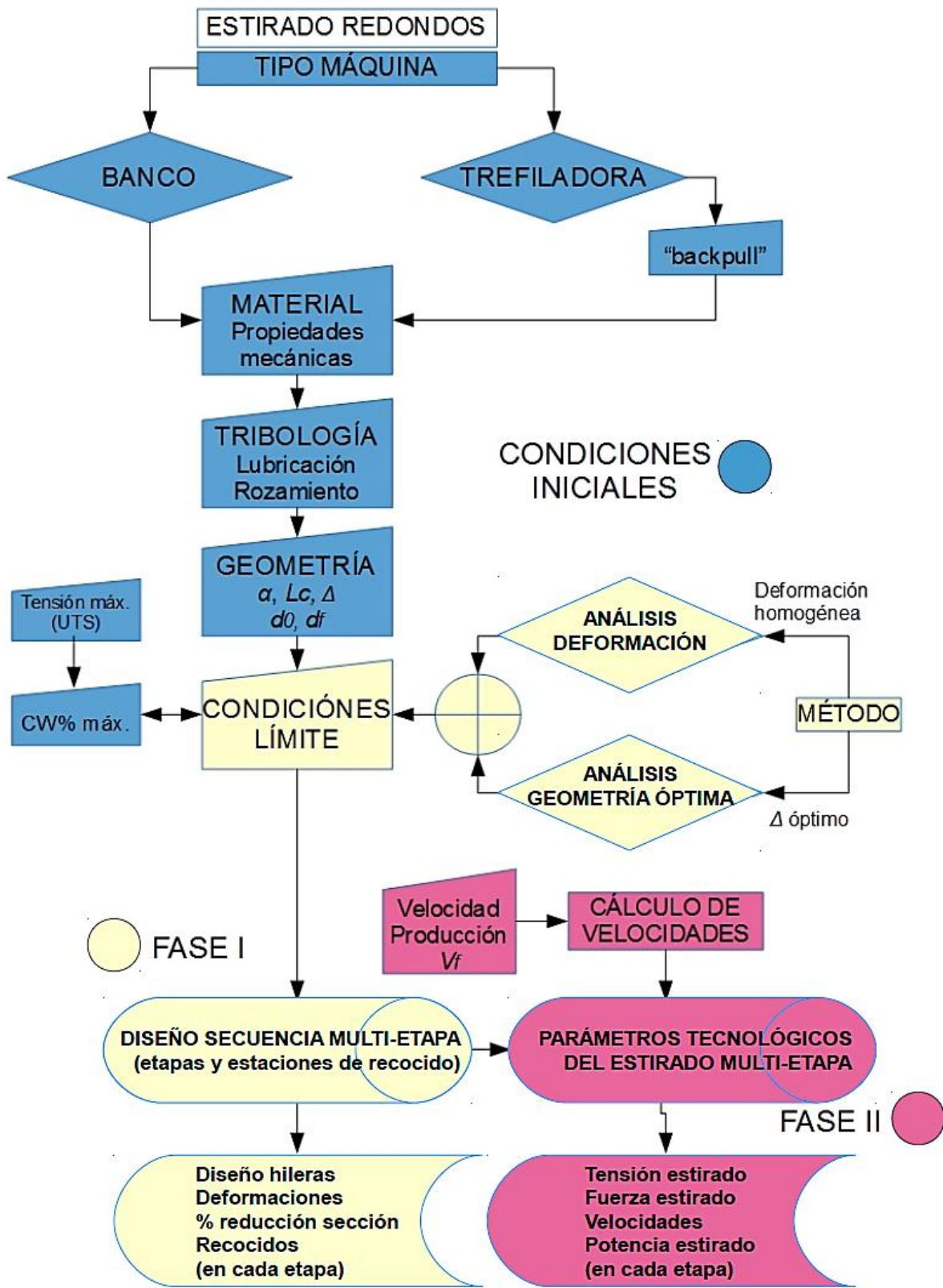


Figura 3.11 Diagrama descriptivo de la metodología propuesta.

### 3.4 La aplicación informática *PullWorks*: implementación de la propuesta

#### 3.4.1 Introducción

Para poder aplicar la metodología propuesta, de una manera rápida y sencilla, el presente trabajo se ha completado creando la aplicación informática *PullWorks*.



Figura 3.12 Logotipo de la herramienta informática *PullWorks*.

Aunque la denominación anglosajona del estirado de hilo o alambre metálico es “*wire drawing*” y “*rod drawing*” en el logotipo elegido (véase Figura 3.12) aparece la combinación de los términos “*Works*”, cuyo significado es “*trabajos*”, unido al infinitivo simple del verbo “tirar”, en inglés “*Pull*”, para dar nombre al programa desarrollado.

La aplicación consiste en una primera versión desarrollada mediante el conocido lenguaje de programación *Visual Basic*. Este lenguaje de programación fue ideado y desarrollado por Alan Cooper para Microsoft en el año 1991 a partir de *BASIC* (*Beginners All-purpose Symbolic Instruction Code*), idea original de 1964 [Trigo Aranda, 2004]. A mediados de los 70, el código fue mejorado por Bill Gates junto a Paul Allen [Allen, 2006], en el *Dartmouth College* de New Hampshire (Estados Unidos).

*Visual Basic* permite desarrollar el funcionamiento de aplicaciones informáticas de todo tipo mediante la utilización de variables y eventos [Rodríguez et al., 2008]. Se trata de un lenguaje relativamente sencillo, ya que sus creadores desarrollaron un código simple para la programación de aplicaciones informáticas, a la vez que ofrece un gran potencial.

La aplicación informática *PullWorks* ha sido programada en su totalidad utilizando el software *Microsoft Visual Studio* [Mayo, 2010], herramienta que ha permitido trabajar de forma ágil e intuitiva, a pesar de su relativa complejidad y de la falta de experiencia que el autor del presente trabajo de investigación tiene en estos menesteres.

Se trata de una herramienta o aplicación informática de carácter analítico, enfocada exclusivamente al diseño y estudio de los procesos secuenciales de estirado de barras y al trefilado de hilo o alambre metálico, en la cual se implementan de forma rigurosa los fundamentos y la metodología sobre los que se ha construido este trabajo de investigación. No obstante, en un futuro, sería posible añadir otro tipo de procesos de

conformado por deformación plástica que puedan ser analizados aplicando los mismos fundamentos y métodos empleados en el proceso de estirado.

**3.4.2 La interfaz del programa**

*PullWorks* presenta una sencilla interfaz que se divide en tres zonas: la barra de menús desplegables, la barra de botones y la ventana en la que se muestran los datos de entrada, la información acerca del proceso y los resultados o datos de salida obtenidos.

La ventana principal dispone de tres pestañas seleccionables, tal y como se puede ver en la Figura 3.13, la Figura 3.14 y la Figura 3.15:

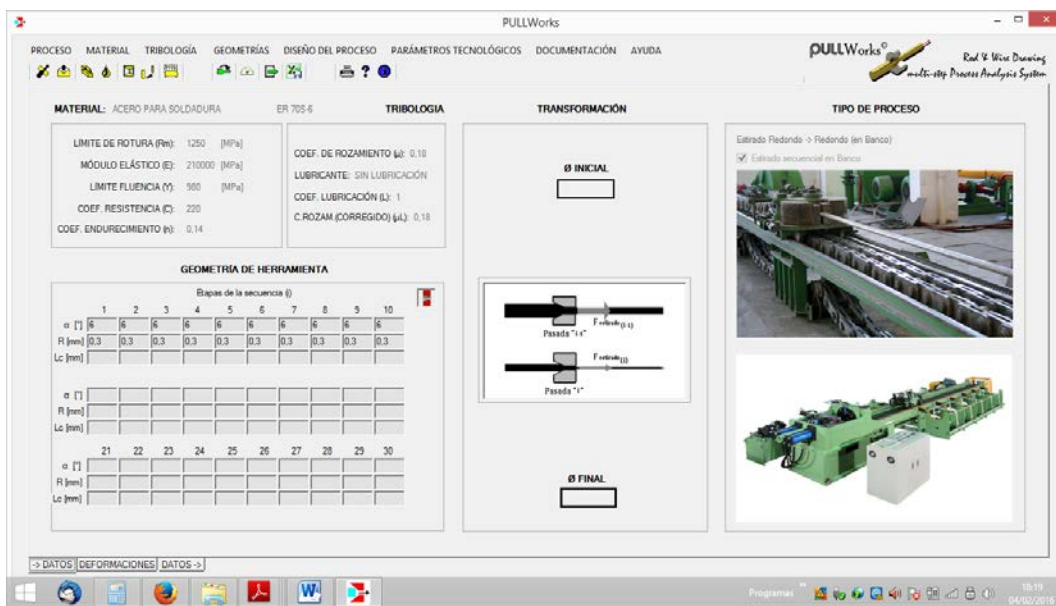


Figura 3.13 Interfaz principal de la herramienta informática *PullWorks*.

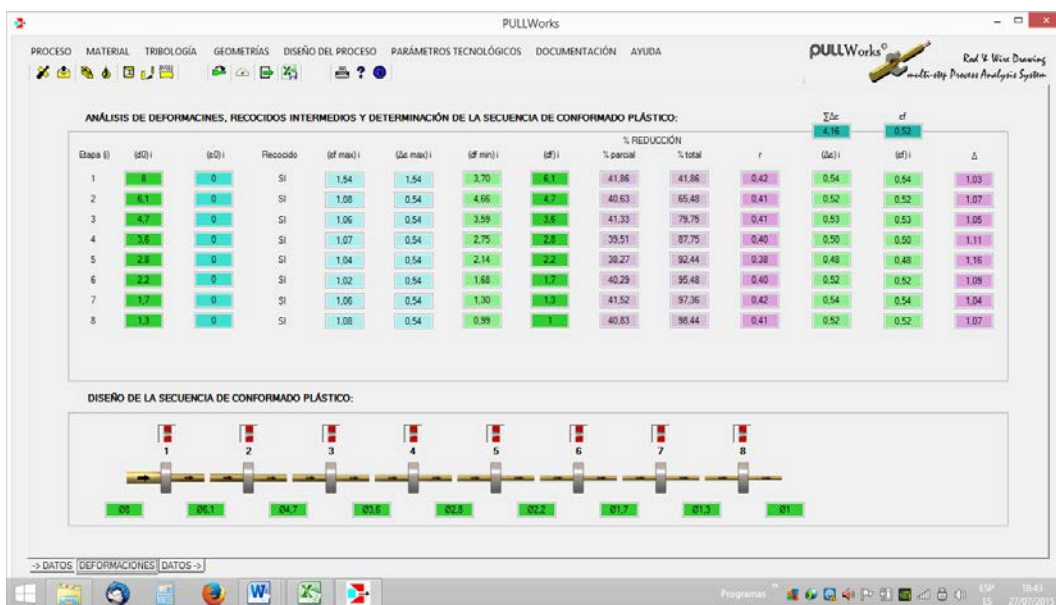


Figura 3.14 Pestaña de diseño del proceso en la aplicación *PullWorks*.

Etapas (i)	V <sub>e</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	σ (MPa)	F (N)	P (W)
1	0.581	1	114.2187	3338.01	3338.01
2	0.534	1	108.5524	1883.33	1883.33
3	0.587	1	111.6008	1135.96	1135.96
4	0.605	1	103.2852	635.98	635.98
5	0.617	1	97.85399	371.98	371.98
6	0.597	1	107.4383	244.45	244.45
7	0.585	1	113.2205	150.35	150.35
8	0.582	1	109.0622	85.67	85.67

Figura 3.15 Pestaña de parámetros tecnológicos de estirado en la aplicación *PullWorks*.

En cada una de las tres pestañas, seleccionables de izquierda a derecha en la parte inferior izquierda de la interfaz, se muestran los datos de entrada para el diseño y análisis del proceso secuencial multi-etapa, los parámetros que definen el diseño de la secuencia de etapas y los parámetros tecnológicos correspondientes a cada una de las etapas en las que se constituye la secuencia diseñada.

### 3.4.3 Los menús desplegables y la barra de botones

Los menús desplegables se encuentran en la parte superior de la interfaz, justo encima de la barra de botones. Estos menús despliegan todas y cada una de las opciones mediante las cuales el usuario define los valores de entrada y salida para la geometría a transformar en el proceso secuencial de estirado que se desea realizar, el tipo de proceso, el material, geometría de las hileras, condiciones tribológicas, etc.

A partir de todos los datos introducidos, *PullWorks* permite generar un diseño para la secuencia de etapas del proceso secuencial de estirado multi-etapa adecuado a la reducción total deseada, todo ello según las condiciones indicadas.

La barra de botones, mostrada en la Figura 3.16, ofrece al usuario un acceso más fácil y directo a todas las opciones que existen en los menús desplegables.

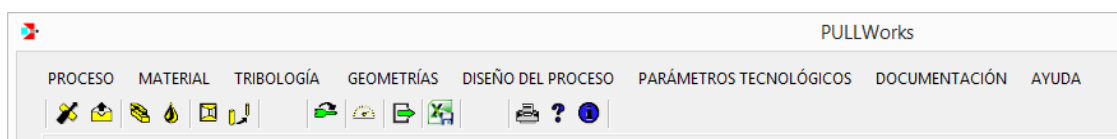















Figura 3.16 Menús desplegables y barra de botones en la aplicación *PullWorks*.

En la Tabla 3.1 se presentan los iconos correspondientes a cada una de las opciones accesibles desde la barra de botones, indicando además la acción tal y como se corresponde con cada una de las opciones de los menús desplegables del programa:





Tabla 3.1 Significado de los iconos de la barra de herramientas de *PullWorks*.

Icono	Acción
	Selección del tipo de Proceso
	Almacén de Materiales
	Rozamiento
	Lubricación
	Geometría de la Herramienta
	Secciones inicial y final
	Velocidades
	Diseño de la secuencia de etapas
	Cálculo de los Parámetros tecnológicos
	Guardar datos en formato Excel
	Ayuda del programa
	Impresión de la pestaña activa
	Información

#### 3.4.4 Flujo de trabajo del programa

Es conveniente seguir el orden de izquierda a derecha, para introducir la información conocida y los datos de entrada del proceso que se desea analizar, tanto si se accede a las opciones mediante los menús desplegables como si se hace utilizando los botones de la barra de botones. No obstante, la aplicación lanzará un mensaje de aviso en los casos en los que no sea posible generar un diseño viable, exista algún error de sintaxis o falte información imprescindible para realizar los cálculos.

Tabla 3.2 Código de colores empleado en los botones de *PullWorks*.

Color	Tipo de Acción
	Información y/o datos de entrada a aportar a la aplicación
	Cálculos e información de salida de la aplicación
	Documentación e Información
	Impresión de pestañas

Siguiendo el orden de izquierda a derecha, respetando el código de colores de la Tabla 3.2, a la hora de introducir la información y datos de entrada (amarillo) y generar resultados (en color verde), no deben de surgir avisos ni alarmas.

Es necesario indicar todos los datos y la información de entrada del proceso en las opciones de color amarillo. Entonces será posible realizar los cálculos para obtener el diseño del proceso, además de los correspondientes a la determinación de los parámetros tecnológicos del mismo, sin que se genere ningún tipo de aviso.

### 3.4.5 Selección del tipo de proceso

Es posible seleccionar entre dos tipos de estirado secuencial multi-etapa de perfiles de sección circular, como se ve en la Figura 3.17: el trefilado de alambre o hilo metálico, en trefiladora continua, y el estirado de barras discontinuo, en banco de estirado.

En la primera de las dos opciones puede considerarse una tensión de retroceso o “backpull”, aplicado para evitar las roturas causadas por oscilaciones en el hilo y reducir el desgaste de la hilera. Es indispensable indicar los parámetros indicados en la Figura 3.18, que condicionan la influencia de dicho fenómeno en el diseño del proceso y en el cálculo posterior de la tensión de estirado en cada etapa del mismo.

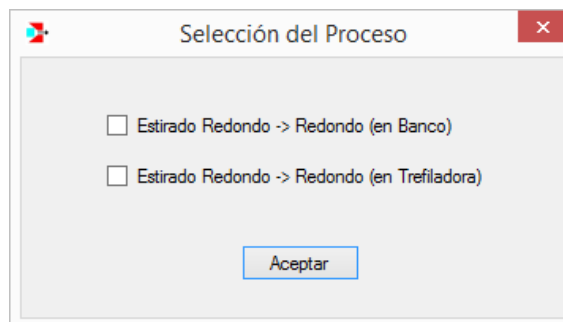


Figura 3.17 Ventana de selección del tipo de proceso de estirado.

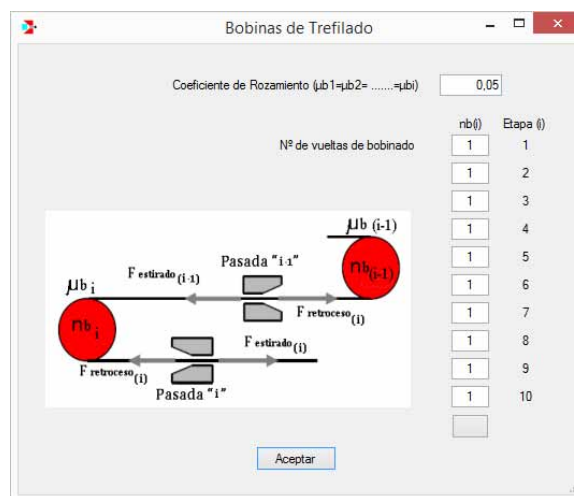


Figura 3.18 Ventana de parámetros asociados al “backpull” en el trefilado.

La aplicación requiere que el usuario indique el material procesado y sus propiedades mecánicas. Para ello, la ventana de selección de material, mostrada en la Figura 3.19, permite la selección en una lista de materiales. También permite introducir los datos y propiedades mecánicas de un material definido por el usuario, si esto fuese necesario.

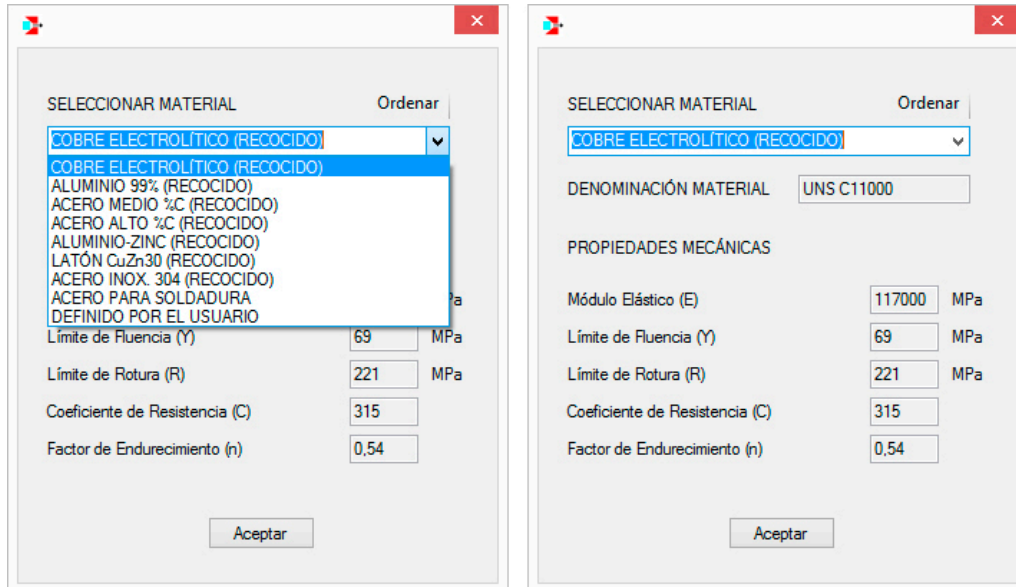


Figura 3.19 Ventana de selección del material procesado y sus propiedades mecánicas.

### 3.4.6 Definición de las condiciones tribológicas del proceso: rozamiento y lubricación

El usuario debe especificar un valor determinado para el coeficiente de rozamiento, del tipo rozamiento de Coulomb, existente en la zona de contacto metal-hilera. Un factor entre 0 y 1 indicará la eficiencia del tipo de lubricación empleada en el proceso, como se puede ver en la Figura 3.20.

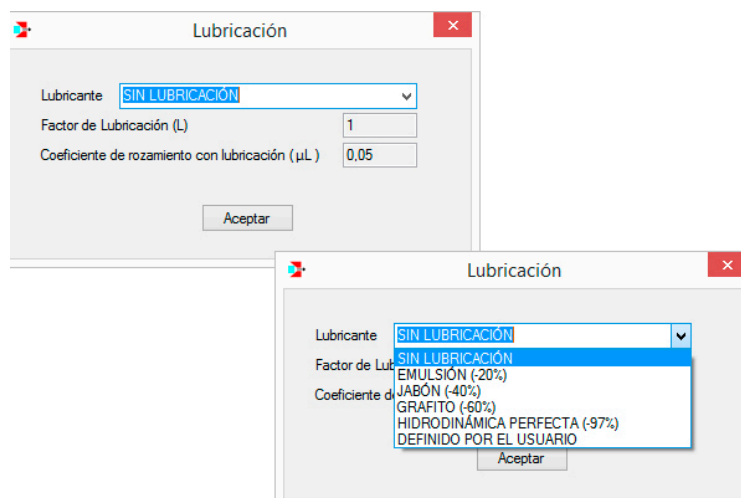


Figura 3.20 Ventana para indicar el tipo de lubricación aplicada.

El valor de este coeficiente para el rozamiento en la interfase del proceso debe ser conocido o determinado previamente. No obstante, la aplicación ofrece la posibilidad de consultar una tabla como la de la Figura 3.21, tabla en la cual se muestran los valores teóricos más habituales para dicho coeficiente de fricción por deslizamiento:



Figura 3.21 Ventana para indicar el coeficiente de rozamiento en la interfase.

El valor del factor de lubricación estará siempre entre 0 y 1 y va a repercutir, de forma directa, en un porcentaje sobre el coeficiente de rozamiento existente en la zona de contacto de la herramienta de estirado.

### 3.4.7 Definición de la geometría de la herramienta

La geometría de la hilera o herramienta de estirado debe ser definida con detalle en el apartado correspondiente de la aplicación informática. En dicho apartado se indicarán los valores para las diferentes dimensiones significativas, para todas y cada una de las etapas del proceso secuencial multi-etapa que se pretende analizar.

En este apartado, el usuario puede consultar una tabla con una serie de valores orientativos de cada uno de los diferentes parámetros geométricos que definen la hilera, para distintos materiales de herramienta y diversos metales a transformar,

pulsando en el botón del interrogante azul en la esquina inferior derecha de la ventana “Geometría de la Herramienta”, en la Figura 3.22.

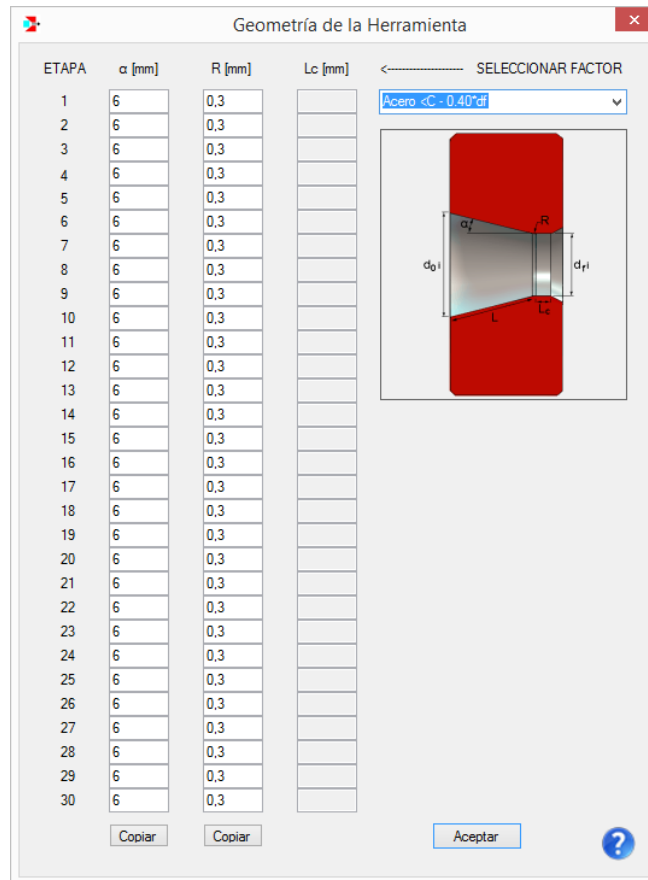


Figura 3.22 Parámetros para la definición de la geometría de la herramienta.

### 3.4.8 Introducción de datos de geometrías inicial y final

Como se aprecia en la Figura 3.23, es necesario introducir el valor inicial del diámetro de la barra o alambre, materia prima en el proceso, además del valor del diámetro final que se desea obtener al final del proceso secuencial de estirado multi-etapa.



Figura 3.23 Introducción de diámetro de inicio y diámetro a obtener.

Una vez que el usuario ha completado este apartado y todos los anteriores, es posible proceder al cálculo de la secuencia de etapas. Esta secuencia, que constituye el diseño

del proceso secuencial de estirado multi-etapa, es calculada en base a los datos y los criterios especificados en la descripción de la metodología propuesta.

### **3.4.9 Condiciones para la estimación de la secuencia de recocidos**

En la ventana, mostrada en la Figura 3.24, se indicará el estado del material al inicio del proceso secuencial estirado multi-etapa que se desea diseñar y analizar.

Si el estado inicial es un estado recocido del material a estirar, entonces el valor de la deformación inicial será nulo  $\varepsilon_0=0$ , en cuyo caso la casilla de verificación de recocido deberá permanecer marcada.

Cuando se inicia un proceso partir de un metal que acumula un grado de deformación previo determinado, producido en una transformación anterior al proceso a realizar, el proceso que se pretende diseñar y analizar emplea una materia prima que no está recocida. Por lo tanto, el usuario debe desmarcar la casilla de verificación de recocido de la etapa inicial e indicar el valor de la deformación unitaria  $\varepsilon_0 \neq 0$ , valor que acumula el material de partida o materia prima que se va a utilizar en el proceso secuencial de estirado multi-etapa.

ACTUAL					
Etapa	Recocido	$\Delta r$ inicial	$\varepsilon$ inicial	$\varnothing$ inicial	%Rs acumulada
1	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	0	0

Aceptar

Figura 3.24 Menú en el que se indica la existencia de recocido inicial.

Esta deformación acumulada es siempre consecuencia de un proceso previo de estirado aplicado sobre el alambre o la barra. Será necesario indicar en esta ventana, además del valor de dicha deformación acumulada en el proceso previo mencionado, el valor de partida del  $\varnothing$  del alambre o barra en bruto con el que se inició el proceso que produjo dicha deformación acumulada.

Mediante esta opción *PullWorks* ofrece la posibilidad de poder encadenar dos procesos secuenciales de estirado multi-etapa, con distinto diseño geométrico y tecnológico, siempre partiendo el primero (desbaste) de un metal recocido y ofreciendo la opción de seleccionar si antes del segundo proceso (acabado) se quiere o no recocer el producto semielaborado obtenido del primero.

**3.4.10 Cálculo y diseño de la secuencia de etapas del proceso**

En este apartado, el programa ofrece al usuario las diferentes opciones disponibles para determinar la secuencia de etapas que constituyen en diseño del proceso de estirado multi-etapa que se pretende analizar. Cabe recordar que estas opciones eran dos: la primera de ellas fundamentada en la condición de deformación homogénea y la segunda en base a la introducción de un valor óptimo para el factor de forma  $\Delta$ .

La de etapas es definida a partir de todas y cada una de las condiciones y datos de entrada, datos conocidos del proceso, debidamente indicados en los apartados descritos anteriormente. El programa permite realizar ningún cálculo si el usuario no ha completado todos y cada uno de los apartados necesarios.

Si algún dato de entrada es omitido por el usuario, la aplicación abrirá una ventana con el mensaje o aviso correspondiente, indicando que la carencia debe ser subsanada para que el sistema pueda continuar con el cálculo de la secuencia de etapas.



Figura 3.25 Apariencia de la ventana de diseño de la secuencia de etapas.



Figura 3.26 Apariencia inicial de la ventana de diseño de la secuencia de etapas.

La ventana (véase Figura 3.25 y Figura 3.26) muestra el diseño completo de la secuencia de etapas del proceso de estirado multi-etapa diseñado, ofrece toda la información y los datos que describen el diseño técnico y geométrico de todas y cada una de las etapas calculadas: diámetros inicial y final en cada etapa, deformaciones, ratios de deformación parcial, porcentajes de reducción de área, valor de delta, etc.

Como se puede apreciar, en la zona derecha de la ventana de este comando aparecen los botones correspondientes a las dos opciones de cálculo diferentes que se pueden utilizar para determinar la secuencia de etapas.

Una primera y más simple opción ofrece la posibilidad de realizar los cálculos considerando únicamente las condiciones inherentes a la deformación homogénea del material [Sebastián, 2010], opción que se presenta en la aplicación con una finalidad fundamentalmente didáctica. Esta se basa en un método analítico que no considera factores determinantes en un proceso de estas características.

El sistema ofrece como opción principal, para el diseño de la secuencia de etapas del proceso de estirado multi-etapa, la implicación de un valor óptimo del factor delta o factor de forma  $\Delta$  de la herramienta o hilera de estirado. Este valor debe ser indicado por el usuario y permite a este interactuar con el sistema para obtener diferentes variantes de un mismo proceso.

Reiterando, existen diversos estudios empíricos que justifican un valor óptimo para delta tal que  $1 \leq \Delta \leq 3$  [Wright, 1979][Kristensen et al., 2004][Cunningham et al., 2011].

Tanto en estirado en banco como en trefilado, el proceso multi-etapa se constituye normalmente en un número de etapas no superior a treinta. Por ello, para las dos opciones o métodos de cálculo, el comando está limitado al cálculo de treinta etapas.

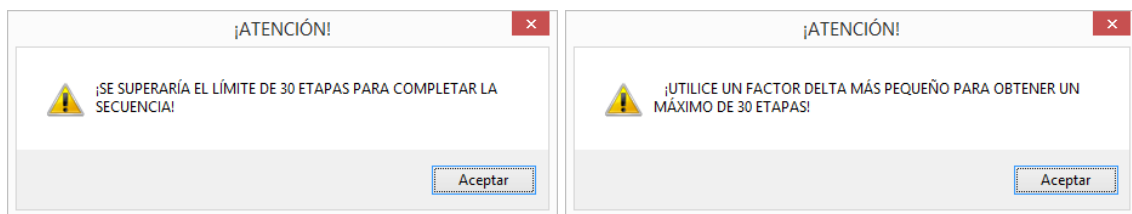


Figura 3.27 Mensajes de aviso al alcanzar el límite de 30 etapas en *PullWorks*.

Puede darse el caso en el que el proceso de estirado analizado necesite más de diez etapas en su diseño. La aplicación, como se puede ver en la Figura 3.27, indicará la necesidad de continuar el cálculo a partir de los datos obtenidos en la décima etapa, determinando así el diseño de la undécima y sucesivas etapas, hasta un límite máximo de 30 etapas.

### **3.4.11 Determinación de las velocidades del proceso**

Una vez determinado y definido el diseño de la secuencia de etapas, en la cual se constituye el proceso secuencial de estirado multi-etapa, será preciso establecer las condiciones tecnológicas para cada una de las etapas del mismo.

A la hora de establecer la productividad del proceso secuencial, es imprescindible fijar el valor de la velocidad de producción del proceso. Esta velocidad vendrá dada por la velocidad del proceso, en metros por segundo, a la salida de la última de las hileras en

el caso del trefilado continuo de hilo metálico. La velocidad debe ser conocida, a la salida en cada etapa/hilera en el caso del estirado discontinuo de barras en banco de estirado. Se da por supuesto que el valor de esta velocidad de salida es adecuado para realizar el proceso y es conocido en base a la experiencia y los estudios previos a la aplicación de esta metodología.

Etapa i	V entrada [m/s]	V salida [m/s]	Etapa i	V entrada [m/s]	V salida [m/s]	Etapa i	V entrada [m/s]	V salida [m/s]
1	1,629	1,943	11	9,072	10,821			
2	1,943	2,323	12	10,821	12,939			
3	2,323	2,783	13	12,939	15,500			
4	2,783	3,336	14	15,500	18,579			
5	3,336	3,995	15	18,579	22,250			
6	3,995	4,489	16	22,250	25			
7	4,489	5,358						
8	5,358	6,377						
9	6,377	7,631						
10	7,631	9,072						

25  
V producción

CALCULAR    RESET

Estirado secuencial en Trefiladora

Aceptar

Figura 3.28 Cálculo de velocidades en las etapas de la secuencia de estirado.

La aplicación ofrece un apartado en el cual el usuario debe especificar el valor de la velocidad a la salida en cada una de las etapas o en la última, en función del tipo de proceso que se está estudiando. Este comando, pulsando el botón de cálculo que se puede ver en las ventanas que se presentan en la Figura 3.28, determina los valores de todas y cada una de las velocidades de entrada en el estirado discontinuo o de las velocidades de entrada y salida en el caso del proceso continuo de trefilado.

### 3.4.12 Determinación de los parámetros tecnológicos del proceso

Una vez conocidos los parámetros geométricos y las velocidades, la aplicación es capaz de determinar el valor de los diferentes parámetros tecnológicos del proceso en todas y cada una de las etapas que lo constituyen. Los resultados se muestran en la ventana correspondiente, tal y como se puede ver en la Figura 3.29.

Etapa (i)	COMPONENTES TENSIONALES				Tensión Estirado $\sigma$ (MPa)	DEFORMACIÓN Fluencia media $Y_m$ (MPa)	LÍMITE Fluencia salida $Y_f$ (MPa)	PARÁMETROS TECNOLÓGICOS	
	Análisis Local $\sigma_{z+odh}$ (MPa)	Retroceso $\sigma_{bp}$ (MPa)	W redundante $\sigma_{di}$ (MPa)	Calibración local (MPa)				Fuerza Estirado F (N)	Potencia Estirado P (W)
1	206	0	33,30908	0,769699	239,94662	307,8797	360,2192	7012,38	565,36
2	197	0,187532	33,09606	0,764776	231,44197	305,9107	357,9155	4015,40	545,32
3	202	0,190182	33,20341	0,767257	236,26628	306,9029	359,0764	2404,90	556,69
4	190	0,188690	32,87613	0,759694	223,44275	303,8778	355,5370	1375,86	526,48
5	181	0,192356	32,64876	0,754440	214,93014	301,7763	353,0782	817,02	506,42
6	195	0,195311	33,09606	0,989711	229,67638	305,9107	357,9155	521,32	541,16
7	204	0,190793	33,30908	0,769699	238,14689	307,8797	360,2192	316,10	561,12
8	199	0,188107	33,09606	0,764776	232,57053	305,9107	357,9155	155,92	467,76

Figura 3.29 Cálculo de los parámetros tecnológicos.

Esta información tecnológica del proceso va a ser útil para conocer los requerimientos y la viabilidad técnica del mismo. Es posible analizar la evolución y los efectos que el fenómeno de endurecimiento por deformación plástica en frío ha provocado en el metal procesado, en función del valor de la tensión de fluencia de este en cada etapa y analizando el estado de deformación del producto en cada momento del proceso secuencial multi-etapa.

Todos estos aspectos, considerando las condiciones iniciales, junto con el posterior análisis de los resultados obtenidos en las fases de diseño geométrico y definición tecnológica, ofrecen al usuario la posibilidad de realizar diferentes cambios en los parámetros de entrada del proceso para poder obtener un resultado final satisfactorio.

La interacción entre usuario experimentado y permiten jugar con las diferentes posibilidades que ofrece el proceso, fijando un número de condiciones irrefutables, lo cual ofrece una gran flexibilidad a la hora de conseguir el diseño de proceso deseado que le facilite un producto estirado que tenga las características deseadas.

### 3.4.13 Exportar datos a una hoja de cálculo tipo Excel

La aplicación *PullWorks* permite al usuario guardar todos los datos del proceso secuencial, así como los resultados obtenidos tras el análisis del mismo, en un archivo en el formato de la conocida hoja de cálculo de *Microsoft*.

Esta característica, cuyo resultado se muestra en la Figura 3.30, va a permitir al usuario poder realizar cómodamente el posterior estudio de los resultados obtenidos con la hoja de cálculo y sus herramientas para la creación de gráficas, fácilmente y sin tener que trasladar datos de forma manual.

La evolución del valor de una determinada variable tecnológico en función de los diferentes valores de uno de los parámetros de entrada del proceso o, simplemente, el

comportamiento de esa misma variable a medida que la secuencia se realiza, pueden ser estudiados y analizados muy cómodamente mediante este tipo de gráficas.

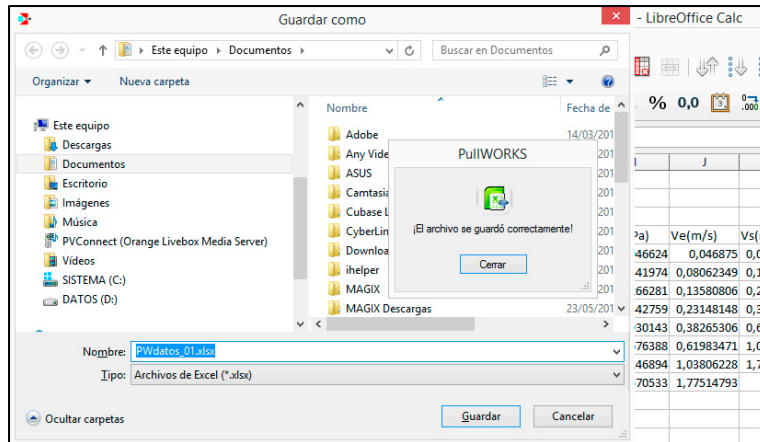


Figura 3.30 Comando para exportar datos y resultados a hoja de cálculo.

Como lo que se pretende es estudiar la metodología propuesta, en la que se implementa el método de análisis local de tensiones aplicado al diseño de procesos secuenciales de estirado multi-etapa, es muy práctica la representación y el análisis mediante gráficas comparativas como las de la Figura 3.31 y la Figura 3.32.

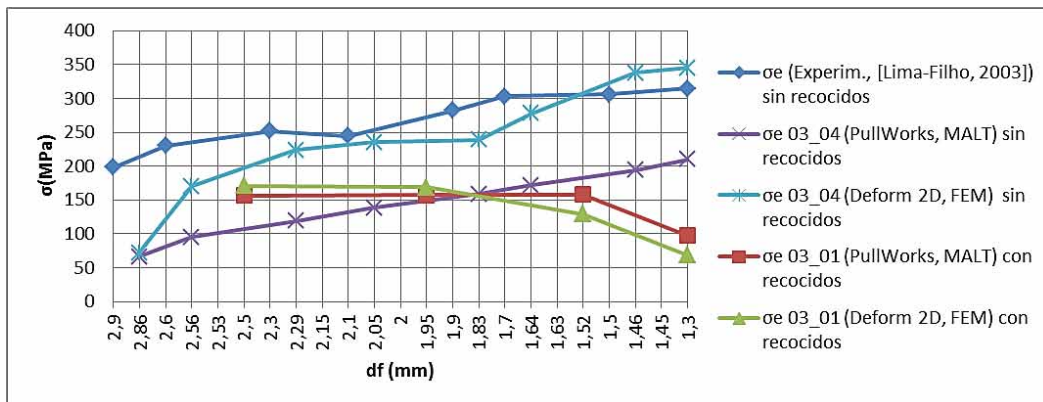


Figura 3.31 Ejemplo de gráfica comparativa de resultados obtenidos por diferentes métodos.

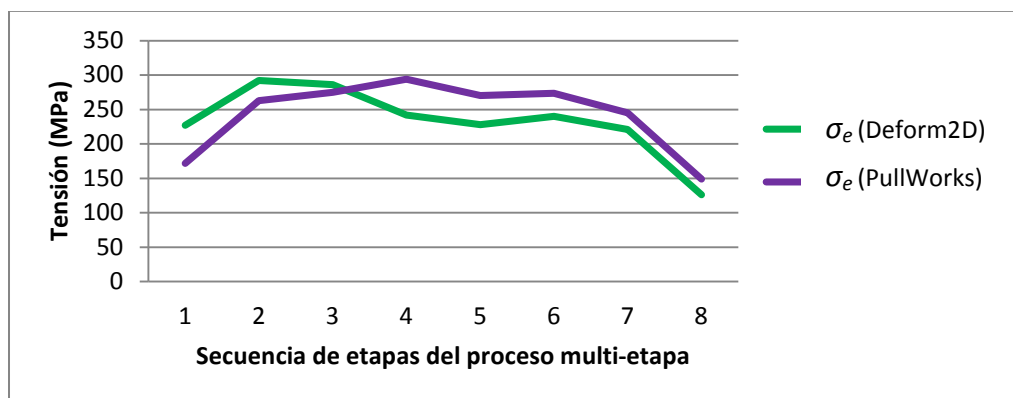


Figura 3.32 Evolución la fuerza de trefilado en un proceso de estirado secuencial.

Existen estudios en los cuales se aplican gráficas comparativas para conocer la influencia de la variación de un determinado parámetro geométrico. Uno de los parámetros geométricos más estudiados es el semi-ángulo  $\alpha$  del cono de la hilera de estirado, que influye significativamente en el valor de la tensión y la fuerza en el proceso de estirado [de Castro et al., 1996] y, consecuentemente, en la vida de la herramienta [Tittel et al., 2012].

### **3.4.14 Impresión de las pestañas de la ventana principal**

La aplicación ofrece un comando de impresión en la barra de herramientas y el menú desplegable. Este comando permite imprimir, en cualquier momento, la pestaña activa de la ventana principal o interface, en formato “pdf” o en papel (véase Figura 3.33).

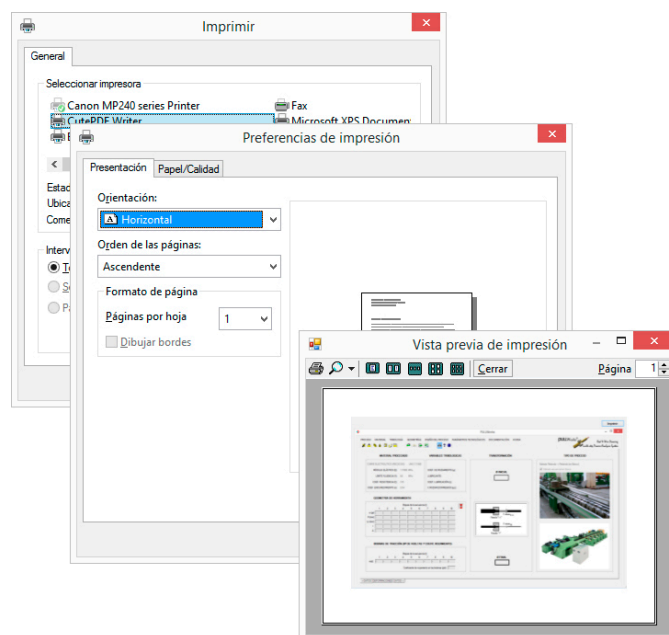


Figura 3.33 Ventanas para la configuración de impresión en PullWorks.

La opción complementa al comando de exportación de datos a una hoja de cálculo vista en el punto anterior. Estas funciones facilitan la salvaguarda de los resultados obtenidos con el programa y exportar las imágenes en formato convencional para poder presentarlas o trabajar en el estudio posterior de los datos obtenidos.

El primer menú de impresión permite seleccionar el medio de salida y configurar las preferencias de impresión. Finalmente, aparece una vista previa de la impresión en la cual podremos comprobar la correcta posición del documento para confirmar finalmente la impresión del documento.

### **3.4.15 Menú de ayuda e instrucciones de uso del programa**

La aplicación ofrece un documento de ayuda al usuario. En este documento se explica detalladamente el flujo de trabajo que hay que seguir para utilizar el programa.

## Metodología para el análisis de procesos secuenciales de estirado multi-etapa

Se explica de qué forma el programa ofrece la información y cómo se organiza dicha información en su interface principal, todo ello en función de si se trata de condiciones iniciales y datos de entrada o datos correspondientes a los resultados obtenidos.

Más adelante, se detalla cómo se debe utilizar cada comando para la introducción de las condiciones y los datos conocidos en el proceso, así como el funcionamiento de los comandos utilizados para realizar los cálculos necesarios. Se describen las funciones que definen el diseño del proceso y los apartados que ofrecen todos los resultados.

Con este simple texto de ayuda, el usuario podrá aclarar cualquier tipo de duda respecto al uso de la aplicación informática.

### 3.4.16 Información sobre la versión, año y autor

Esta ventana, en la Figura 3.34, muestra la versión y número de revisión del programa *PullWorks*. En ella se puede ver el año de la última revisión y el nombre del autor.



Figura 3.34 Presentación inicial y ventana de información acerca de *PullWorks*.

### 3.5 El método de los elementos finitos (MEF)

Los procesos de fabricación que se fundamentan en el conformado por deformación plástica son procesos generalmente complejos en los que intervienen múltiples variables y factores.

La mejora y el desarrollo tecnológico de este tipo de procesos desde un enfoque puramente experimental es sencillamente inviable debido a los costes que ello implicaría en cuanto a los medios y el tiempo necesarios considerando las infinitas variantes posibles que un mismo proceso puede llegar a presentar en su estudio y análisis. Es por este motivo por el cual se justifica el desarrollo de herramientas analíticas y/o numéricas que faciliten este tipo de estudios.

La presente tesis pretende el desarrollo de una aplicación informática fundamentada en el método analítico, que ofrece unos resultados bajo condición de límite inferior al dejar de lado factores tales como velocidad, temperatura, distribución de deformación, etc.

Los métodos numéricos, y más concretamente en método de los elementos finitos, se han postulado como una metodología muy fiable, versátil y eficaz en el análisis de los procesos de conformado por deformación plástica en las últimas décadas [Sebastián, 1980], ya que permiten al usuario incluir los efectos de la práctica totalidad de factores que intervienen en un proceso de estas características. Este es el motivo por el cual se ha tomado la decisión de utilizar este método numérico como método de referencia para contrastar los resultados obtenidos con la metodología analítica desarrollada y así poder validar su aplicabilidad y sensibilidad.

El método de los elementos finitos se puede describir como un método numérico utilizado para resolver el comportamiento físico de un cuerpo o estructura, denominada medio continuo, mediante la resolución del conjunto de ecuaciones diferenciales que gobiernan su comportamiento frente a unas condiciones de contorno definidas. Este método se basa fundamentalmente en estos tres pasos [Dixit, 2014]:

- Inicialmente se obtiene una forma integral mediante la cual se consideran las ecuaciones diferenciales que gobiernan la estructura o estructuras a analizar además de las condiciones de contorno.
- El dominio del problema se subdivide o discretiza en un número de elementos infinitesimales denominados *elementos finitos* dentro de los cuales se definen una serie de puntos denominados *nodos*. Dos o más *nodos* pueden pertenecer a un elemento mientras que si alguno se sitúa sobre la frontera del elemento podrá pertenecer a dos o más elementos. El conjunto de elementos interconectados mediante sus nodos comunes se denomina *malla*.

- Una vez se obtiene una primera aproximación de la solución, se sustituye en la ecuación integral para obtener una serie de ecuaciones algebraicas que permitirán solucionar el comportamiento del sistema bajo las condiciones de contorno establecidas.

Una primera tentativa de emplear este método para el análisis numérico de procesos de conformado por deformación plástica se realizó en 1974 [Zienkiewicz et al., 1974] y desde entonces este método ha evolucionado de forma que actualmente permite realizar análisis de procesos de laminación, extrusión o estirado para determinar la distribución de tensiones en la zona de deformación, estimar la carga necesaria para el conformado o predecir los posibles defectos que ocurren, en la herramienta o en la pieza, durante el conformado plástico.

Un factor importante en el modelado mediante la aplicación de elementos finitos a los procesos de conformado por deformación plástica es la modelización del fenómeno de fricción. Algunas investigaciones aplican un factor de fricción para así simplificar el problema mientras otros modelos más complejos resuelven este punto empleando diversos parámetros para implementar la influencia del rozamiento.

Un estado del arte completo sobre la descripción de la formulación del método de los elementos finitos se puede consultar en diferentes documentos [Kobayashi, 1989].

La obtención de un producto estirado de buena calidad requiere de un diseño óptimo de la hilera, del empleo del material de partida en un estado de suministro apropiado y del adecuado control de todos y cada uno de los parámetros de trabajo que rigen el proceso [Atienza, 2001]. Para poder verificar todas estas condiciones será necesario conocer cómo se comporta el material frente a las deformaciones aplicadas en cada etapa y la distribución de tensiones correspondientes así como controlar el estado tribológico para que el proceso se mantenga bajo condiciones isotérmicas en el caso de los procesos de conformado por deformación plástica en frío.

### **3.5.1 Elección del programa o herramienta de aplicación del MEF**

La necesidad de realizar análisis de elementos finitos en la presente tesis surge a partir del hecho de que el fin que se pretende conseguir es el de desarrollar una metodología aplicable para la resolución de problemas de estirado secuencial multi-etapa fundamentada en el método analítico basado en el análisis local de las tensiones en la zona de deformación.

Como se mencionó anteriormente, dada la complejidad de los procesos de conformado por deformación plástica tales como el estirado, es complicado plantear la resolución de este tipo de problemas únicamente mediante métodos experimentales ya que para ello es necesario un costoso equipamiento técnico y mucho tiempo. Mientras, los métodos analíticos solamente son válidos para resolver problemas con

geometrías y condiciones de contorno sencillas como es el caso del proceso de estirado. Es por ello que se ha optado por el MEF como método más apropiado para el análisis final de los procesos de estirado secuencial multi-etapa que se proponen en el correspondiente capítulo.

Tabla 3.3 Diversos software CAD y CAE existentes en el mercado.

CAD	CAE
Solid Edge	ANSYS
SolidWorks	Cosmos
Catia	Abaqus
ProEngineer	Deform2D
Unigraphics	Deform3D

No por ser más potente un programa va a ser mejor que otro. Se debe encontrar una solución ajustada a las necesidades que implique nuestro problema y cuyo aprendizaje y uso sea lo más sencillo e intuitivo.

En el mercado existen multitud de herramientas informáticas CAD-CAE (*Computer Aided Drawing-Computer Aided Engineering*) mediante las cuales es posible realizar un análisis mediante el método de los elementos finitos (véase Tabla 3.3). La diferencia fundamental entre unos y otros está en su “generalidad” o “especificidad” a la hora de realizar el análisis numérico y en su potencial en cuanto al módulo de diseño de las geometrías que intervendrán en el proceso a analizar [Morales, 2007].

A la hora de decidir cuál es el programa más apropiado para nuestro análisis se deben considerar las condiciones geométricas del proceso, materiales implicados así como las condiciones de contorno asociadas para elegir una herramienta que nos permita realizar el diseño geométrico de una forma sencilla, considere el tipo de comportamiento elasto-plástico de los materiales utilizados tanto en la herramienta cómo en la pieza y nos permita imponer todas las condiciones de contorno cuya influencia deseamos que se considere.

En el presente trabajo, considerando todo lo mencionado, los análisis mediante el MEF se han realizado con el programa *Deform2D* [Fluhrer, 2004]. Se trata de un sistema de simulación de procesos mediante el análisis de elementos finitos que ha sido diseñado para poder analizar diversos procesos de conformado por deformación plástica y tratamientos térmicos empleados habitualmente en la industria.

Esta potente herramienta es capaz de simular, entre otros, diversos procesos de conformado por deformación plástica, asumiendo condiciones de deformación plana y axisimetría, mediante un modelo simple bidimensional que consiste en tres módulos diferenciados que se describirán con mayor detenimiento más adelante: el módulo de definición del proceso o pre-procesado, el módulo de simulación o cálculo y el módulo de análisis de resultados o post-procesador.

### **3.5.2 Flujo de trabajo en *Deform2D***

*Deform2D* consiste en tres módulos, tal y como se mencionó anteriormente:

- El pre-procesador, en el cual se crea, ensambla y se realizan las modificaciones sobre la información geométrica y se indican las características físico-mecánicas del sistema para poder generar la base de datos del mismo.
- El motor de simulación, mediante el cual se realizan los cálculos matemáticos que el análisis del proceso requiere y cuyos resultados son incluidos en la base de datos. El motor de simulación lee la información inicial de la base de datos, calcula la solución y regenera el modelo si es necesario para volver a calcular la solución a medida que el proceso va progresando y así hasta la finalización del mismo, trasladando los resultados a la base de datos del proceso. Este módulo trabaja simultáneamente con el generador de malla que genera la nueva malla de elementos finitos en cada uno de los pasos del proceso de simulación.
- El post-procesador, va a partir de la lectura de los resultados de la base de datos generada por el motor de simulación para ofrecer los valores numéricos de diferentes variables que caracterizan el proceso analizado y mostrando además gráficamente dichos resultados.

### **3.5.3 Definición del modelo y pre-procesado**

Este módulo emplea una interfaz gráfica (véase Figura 3.35) que permite incluir toda la información necesaria para poder llevar a cabo la simulación del proceso.

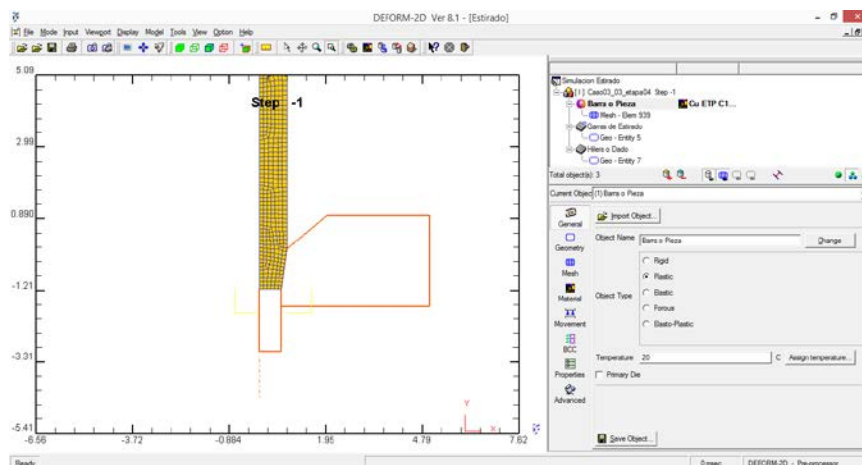


Figura 3.35 Interfaz del Pre-procesador en *Deform2D*.

Inicialmente se debe crear o importar el diseño de la hilera y la barra, completando la descripción de los objetos de todo el sistema, geometría, densidad de malla y material, definición del este último que incluye, además de todas sus propiedades mecánicas, la ley que define su comportamiento frente al endurecimiento por deformación.

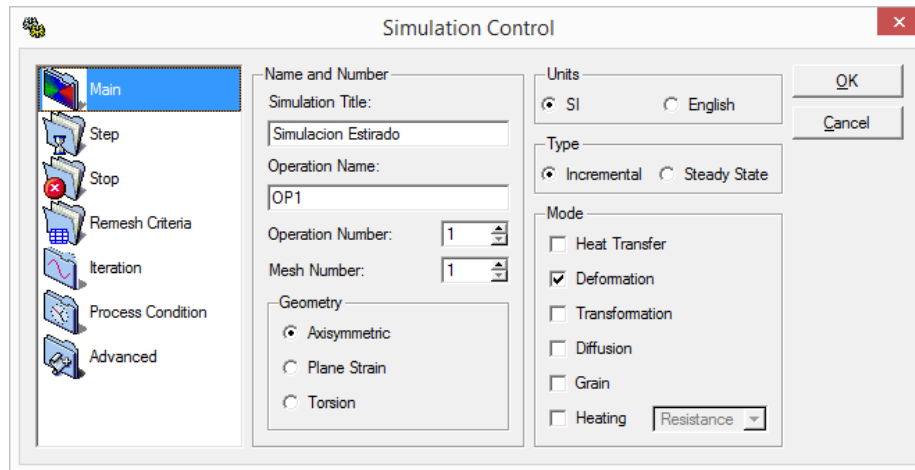


Figura 3.36 Opciones de control de la simulación en *Deform2D*.

Además, se deben definir las condiciones que establecen la interacción entre cada uno de los objetos que componen el sistema a analizar, de qué forma interactúa cada uno de los objetos sobre el resto, sus condiciones de contacto, fricción e incluso transferencia de calor en el caso de análisis de procesos exotérmicos.

En el apartado de controles de simulación (véase Figura 3.36) hay que definir el modo de resolución del problema incluyendo las condiciones del entorno del mismo, tipo de proceso físico a resolver, intervalo discreto de pasos de tiempo a emplear para realizar la simulación, criterios de regeneración del mallado, tolerancias de error para los cálculos de la simulación, etc.

### 3.5.4 Simulación del proceso

El simulador o motor de simulación de *Deform2D* es una macro o procesador de datos que va a realizar los cálculos numéricos a partir de la base de datos generada por el pre-procesador y en la cual se incluye toda la información del pre-procesado del sistema que se pretende resolver.

El motor de simulación lee la información de la base de datos y reescribe esta base de datos con la información de la solución del problema. Este tiene además una zona gráfica en la cual se muestra el progreso de la simulación en cada instante, tal y como se muestra en la Figura 3.37.

Al terminar los cálculos de la simulación, este módulo genera dos ficheros legibles para el usuario: el fichero de información general de la simulación (LOG), que informa al usuario sobre la hora de comienzo y finalización de la simulación, regeneración de la malla si ha sido necesaria o también puede indicar los mensajes de error si el proceso de simulación se ha detenido inesperadamente y el fichero de mensajes (MSG), el cual informa sobre el comportamiento de la simulación y que también puede informar sobre los motivos por los cuales la simulación se ha detenido.

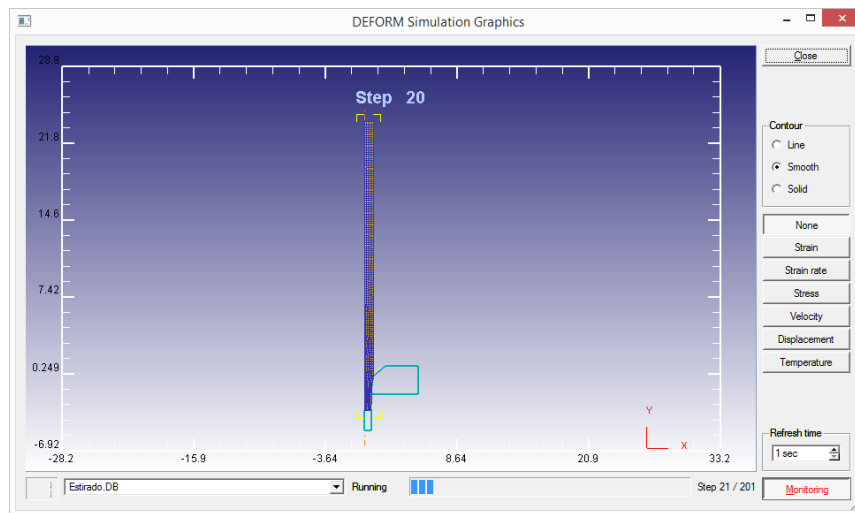


Figura 3.37 Ventana del motor de simulación de *Deform2D*.

### 3.5.5 Análisis del proceso y post-procesado

Este módulo se utiliza para ver y extraer la información y los datos de la base de datos que contiene todos los resultados de la simulación. Toda la información referente a la evolución de las diferentes variables de salida se almacena, para todos y cada uno de los pasos de tiempo en los cuales se ha generado el resultado de la simulación. Esta información se puede recuperar gráficamente en la interfaz del post-procesador, tal y como se muestra en la imagen de la Figura 3.38.

A continuación, se muestra toda la información que es posible conocer mediante el post-procesador de la aplicación:

- Geometría deformada incluyendo los movimientos de la herramienta en cada uno de los pasos en los cuales se ha generado la simulación.
- Resultados gráficos, sombreados y con escala de colores, en los cuales se muestran la distribución de cualquiera de las variables de estado del sistema tales como tensiones efectivas, deformaciones efectivas, velocidad, etc.
- Resultados vectoriales que muestran la magnitud y dirección del desplazamiento o la tensión efectiva de cualquier nodo de la malla de elementos finitos, en cualquier paso de la progresión del proceso simulado.
- Gráficos de las variables fundamentales del proceso como pueden ser la carga del proceso, velocidades, etc.
- Seguimiento de un punto para mostrar cómo se desplaza el material o cómo evoluciona el estado de una u otra variable en ese punto a medida que se avanza en la progresión paso a paso establecida para la simulación.
- La red o malla de flujo, mediante la cual se puede observar el patrón de flujo del material.

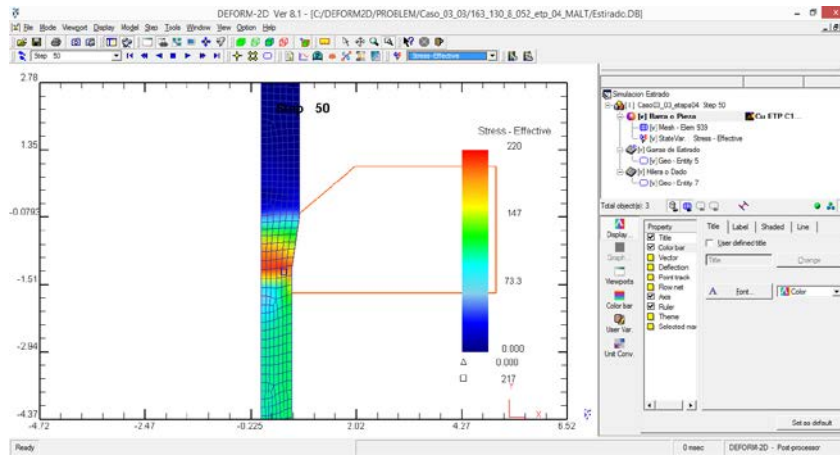


Figura 3.38 Interfaz del Post-procesador en *Deform2D*.

En definitiva, se ha comprobado que *Deform2D* es una herramienta de ingeniería que permite analizar el proceso de estirado de una forma rápida, sencilla e intuitiva ofreciendo los resultados para cada una de las variables y caracterizando el proceso de estirado de forma completa. Esto ha permitido poder comparar y contrastar los resultados obtenidos en los estudios realizados en esta tesis con relativa precisión y fiabilidad para así poder obtener unas conclusiones que han permitido desarrollar la metodología propuesta y proponer líneas para una futura evolución de la misma.

*Deform2D* ofrece una gran flexibilidad a la hora de simular y analizar de manera sencilla los procesos de conformado por deformación plástica en los que la geometría es cilíndrica y a lo largo de una dirección como la forja [Sun et al., 2013], la laminación [Skripalenko et al., 2013], la extrusión [Yang et al., 2012], el trefilado [Yang et al., 2010] o la embutición [Gowtham et al., 2012]. Cualquiera de los distintos parámetros de entrada en el proceso de estirado [Hassan et al., 2015], o incluso analizar los cambios en la calidad y las cualidades del producto final pueden analizarse [Gifford, 2001].

### 3.6 Recapitulación

Los fundamentos metodológicos para el trabajo desarrollado en esta tesis han sido expuestos, ya que éstos son los que determinan el cómo y en base a qué teorías y técnicas se desarrolló la metodología en cuestión.

Se definió detalladamente la metodología propuesta para este trabajo, desarrollada para el diseño y el análisis tecnológico del proceso de estirado secuencial multi-etapa aplicado a productos de sección circular. Esta metodología se implementó en la aplicación informática desarrollada, cuyas características se expusieron.

Al final de este capítulo se presentó la alternativa numérica, materializada en el método de los elementos finitos aplicado mediante el software *Deform2D*, utilizada con objeto de poder contrastar los resultados con los obtenidos previamente mediante la metodología propuesta, en los mismos casos estudiados con ésta última.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## CAPÍTULO 4

### Aplicación de la metodología al estudio del estirado secuencial multi-etapa

---



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## **4.1 Estudio y análisis del proceso de trefilado de hilo de acero para soldadura**

En este caso se pretende realizar un estudio del proceso de trefilado secuencial multi-etapa de un hilo de acero con bajo contenido en carbono, empleado en soldadura y denominado ER70S-6 según la norma AWS [AWS A5.18/A5.18M:2005], que regula este tipo de productos (*American Welding Society*). El procedimiento metodológico desarrollado en la presente tesis permitirá determinar el diseño geométrico del proceso secuencial y caracterizar tecnológicamente todas las etapas en las que se constituye.

Se trata de un acero al carbono con manganeso y silicio, cubierto de una fina película de cobre que previene la oxidación y facilita la transferencia eléctrica en el material, que es comúnmente empleado para la producción de hilo de aportación para la soldadura de láminas, placas, perfiles delgados y con buenos resultados en aquellos materiales oxidados, con residuos de pintura, grasa, etc. Se aplica para la unión mediante soldadura de cualquier tipo de acero al carbono comercial.

### **4.1.1 Caracterización de las condiciones de las variables de entrada del proceso**

En la Tabla 4.1 y en la Tabla 4.2, respectivamente, se presentan las propiedades mecánicas y la composición química del acero ER 70S-6 empleado en el proceso:

- Tipo de proceso: Estirado discontinuo.
- Material: Acero con bajo contenido en carbono ER 70S-6.
- Geometrías inicial-final:  $d_0 = 2,02 \text{ mm} \rightarrow d_f = 0,90 \text{ mm}$ .
- Geometría de las hileras:  $\alpha = 6^\circ$ ,  $R = 1 \text{ mm}$ ,  $L_c = 0,40 \cdot d_f \text{ mm}$  (todas las etapas).
- Lubricación a base de grafito ( $-60\% \mu$ ).

Tabla 4.1 Propiedades mecánicas del acero para soldadura ER 70S-6, [Celentano et al., 2009].

Propiedad	Denominación	Valor
$E$	Módulo de Young	210000 [Mpa]
$Y$	Límite de fluencia	980 [Mpa]
$R_m$	Tensión de rotura	1250 [Mpa]
$C$	Coficiente de resistencia a la deformación	220 [Mpa]
$n$	Coficiente de endurecimiento por deformación	0,14
$\mu$	Coficiente de rozamiento en la interfase	0,18

Tabla 4.2 Composición química del acero para soldadura ER 70S-6, [Celentano et al., 2009].

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Fe
%	0,064	0,968	1,45	0,011	0,014	0,034	0,016	0,022	0,026	0,001	Resto

Se trata de una aleación comúnmente empleada en soldadura, para la fabricación de equipos, estructuras, ensambles y reparación en materiales delgados. Es generalmente utilizada cuando se requiere alta calidad de la soldadura, rapidez, limpieza y bajo costo de producción. La adición de manganeso y silicio a su aleación en proporciones adecuadas le confieren un alto poder desoxidante y lo hace adecuado para aplicaciones donde los procedimientos convencionales de limpieza no son posibles, además de proporcionar propiedades mecánicas notables. Su bobinado uniforme permite una alimentación continua. También es empleado para realizar puntos, tramos cortos y largos de soldadura y en toda posición. Ofrece una soldabilidad sobresaliente, una apariencia suave del cordón, dando como resultado una superficie tersa y un mínimo de limpieza posterior en la unión soldada.

#### **4.1.2 Justificación del estudio y análisis del trefilado de acero para soldadura**

Se trata de acometer un estudio del proceso de trefilado de este tipo de acero tan peculiar, considerando el trabajo realizado por E.L. Rojas [Rojas et al., 2008] y revisado más tarde por D.J. Celentano [Celentano et al., 2009], con el objeto de poder hacer un análisis comparativo de los resultados y las conclusiones obtenidas. Se pretende validar la metodología propuesta para el estudio de un caso representativo del proceso secuencial de estirado multi-etapa de hilo de acero, haciendo además un análisis de la influencia de ciertos parámetros de entrada del mismo.

Para un análisis simplificado, se han tomado las diez primeras etapas del proceso de estirado multi-etapa del acero ER 70S-6 revisado, etapas reflejadas en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Trefilado multi-etapa del acero ER 70S-6 [Rojas et al., 2008] [Celentano et al., 2009].

<b>Etapas</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b><math>d_f</math> [mm]</b>	2,02	1,89	1,75	1,60	1,47	1,35	1,24	1,13	1,05	0,97	0,90
<b>% parcial</b>	-	12,46	14,26	16,40	15,59	15,66	15,63	16,95	13,65	14,65	13,91
<b>% total</b>	-	12,46	24,95	37,26	47,04	55,34	62,32	68,71	72,98	76,94	80,15
<b><math>r</math></b>	-	0,124	0,142	0,164	0,156	0,156	0,156	0,169	0,136	0,146	0,139
<b><math>\Delta</math></b>	-	3,16	2,73	2,34	2,47	2,47	2,47	2,26	2,86	2,65	2,80

Al tratarse de un proceso equiparable al estirado multi-etapa, pero realizado en un banco de estirado y aplicando una velocidad de estirado de 1 mm/s aproximadamente en todas las etapas, se ha considerado la ausencia de tensión de retroceso. No obstante, se realizará además un análisis del proceso secuencial con el propósito de conocer la influencia de las diferentes velocidades, que son consecuencia de la continuidad en el caso del proceso secuencial continuo.

El acero ER70S-6 presentará un determinado comportamiento frente al endurecimiento por la deformación plástica aplicada en el proceso secuencial. La evolución del valor de su tensión de fluencia podría definirse por la función que

relaciona el valor dicho esfuerzo frente al % de reducción de área, aplicado en cada una de las muestras sometidas al ensayo. Estas muestras se corresponden a cada una de las etapas del proceso multi-etapa estudiado y la evolución de la propiedad mencionada se representa en la gráfica de la Figura 4.1 [Rojas et al., 2008].

Se ha revisado un trabajo complementario [Celentano et al., 2009] que presenta cómo evolucionan otras propiedades mecánicas, fundamentales para el estudio del trefilado secuencial realizado en esta tesis. El coeficiente y el exponente de endurecimiento por deformación son términos que actúan en la ecuación de *Ludwik-Hollomon*, mientras la tensión de rotura constituye el límite del proceso secuencial de estirado.

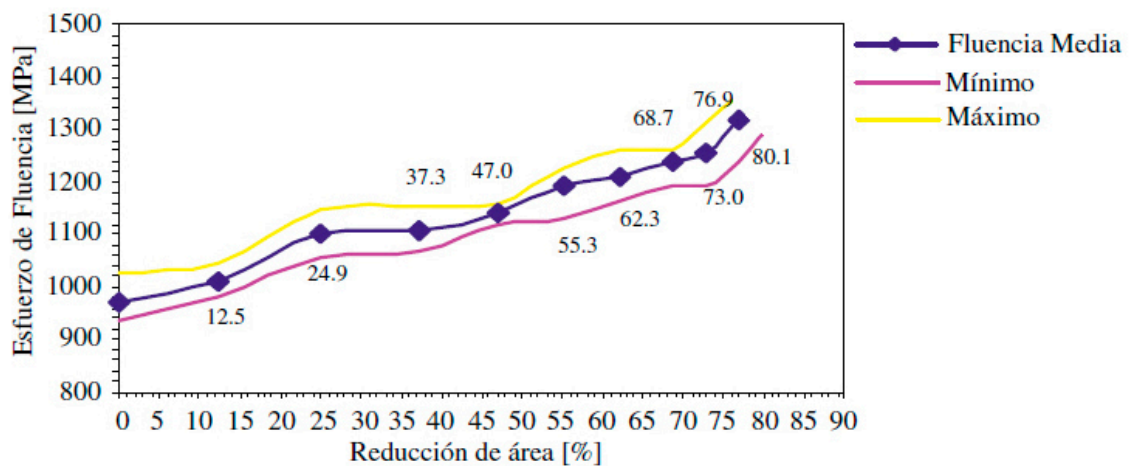


Figura 4.1 Evolución del límite de fluencia vs. % de reducción, [Rojas et al., 2006].

En la Figura 4.2 se puede observar cómo evoluciona el valor de la fuerza de estirado durante el proceso multi-etapa. Esta representación gráfica corresponde al los resultados del análisis numérico realizado mediante software de simulación por el método de los elementos finitos *Vulcan* [Anchaluza et al., 2012] y se presentan en la Tabla 4.4 [Rojas et al., 2008].

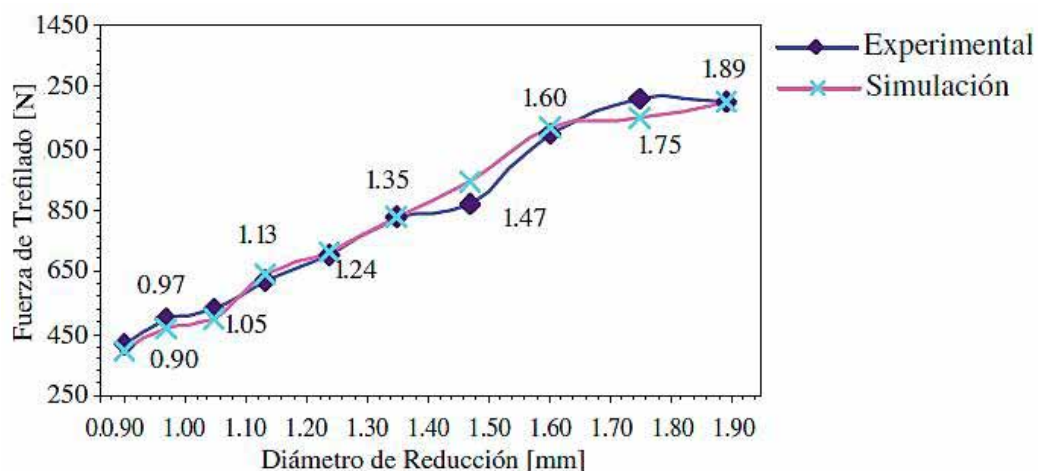


Figura 4.2 Evolución la fuerza de trefilado en función del % deformado, [Rojas et al., 2006].

Tabla 4.4 Resultados en el trefilado del acero ER 70S-6, [Rojas et al., 2006].

Etapa	0	1	2	3	4	6	6	7	8	9	10
$d_f$ [mm]	2,02	1,89	1,75	1,60	1,47	1,35	1,24	1,13	1,05	0,97	0,90
$A$ [mm <sup>2</sup> ]	-	2,80	2,40	2,01	1,69	1,43	1,20	1,00	0,86	0,73	0,63
$F$ [N]	-	1200	1230	1100	880	830	700	620	530	500	410
$\sigma$ [MPa]	-	428	512	547	520	580	583	620	616	684	650
$v_f$ [m/s]	-	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013
$P$ [W]	-	1,56	1,60	1,43	1,14	1,08	0,91	0,806	0,69	0,65	0,53

En esta investigación [Rojas et al., 2008] se realizaron los correspondientes ensayos de tracción a una serie de muestras de cada uno de los diámetros de salida, en las 10 etapas de la secuencia de trefilado húmedo objeto del estudio. El trefilado del alambre de acero se realizó en una trefiladora compacta de poleas cónicas y el proceso secuencial fue simulado posteriormente mediante el software de elementos finitos *Vulcan* para determinar los valores de la tensión de estirado en cada etapa.

#### 4.1.3 Resultados del análisis mediante la metodología propuesta

Una vez hecho el estudio de las condiciones y los resultados obtenidos en el proceso de trefilado del estudio realizado por Rojas y su equipo de investigación, se ha procedido a aplicar la metodología propuesta en el presente trabajo. Para ello se ha empleado la aplicación informática *PullWorks*, herramienta desarrollada a tal efecto.

En el análisis realizado se han aplicado diferentes valores, dentro del rango óptimo, del factor delta  $\Delta$ , obteniendo los siguientes resultados para el diseño de la secuencia de etapas en el proceso de estirado multi-etapa. Se han elegido valores de  $\Delta$  por debajo del valor medio que este parámetro alcanza ( $\Delta=2,20\div3,20$ ) en la secuencia de etapas del estudio consultado [Rojas et al., 2008], de esta forma se pretende comprobar si las propiedades del material y las características del proceso permiten una reducción en el número de etapas de la secuencia del proceso original.

➤ **Supuesto nº1: Proceso de estirado secuencial discontinuo para  $\alpha=6^\circ$ ,  $L_c=0,4 \cdot d_f$ ,  $\Delta=1,20$ ,  $\mu=0,18$ , lubricación de base grafito y velocidad  $v_f=0,0013$  m/s.**

Los resultados obtenidos con *PullWorks* para el diseño del proceso multi-etapa, en base a un valor del factor delta  $\Delta$  fijado por el usuario, se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Secuencia de estirado del acero para soldadura ER 70S-6 en 5 etapas ( $\Delta=1,20$ ).

Etapa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_f$ [mm]	2,02	1,70	1,43	1,20	1,01	0,90	-	-	-	-	-
$\epsilon_{\text{efectiva}}$	-	0,34	0,69	1,04	1,38	1,61	-	-	-	-	-
$r$	-	0,29	0,29	0,30	0,29	0,21	-	-	-	-	-
$\Delta$	-	1,20	1,20	1,20	1,20	1,82	-	-	-	-	-
<b>Recocido</b>	-	SI	NO	NO	NO	NO	-	-	-	-	-

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

La aplicación informática desarrollada en esta tesis permite determinar el valor de cada uno de los parámetros tecnológicos que definen el diseño del proceso secuencial de trefilado multi-etapa, además del valor de las diferentes componentes de la tensión de estirado  $\sigma_e$  en cada una de las etapas de éste. Los resultados obtenidos mediante dicha aplicación se presentan en la Tabla 4.6 y la Tabla 4.7.

Tabla 4.6 Valores tecnológicos del estirado del acero ER 70S-6, para  $\Delta=1,20$  (*PullWorks*).

Etapa	$d_o$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$F$ [N]	$P$ [W]
1	2,02	1,70	0,0010	0,0013	1017,40	1054,80	616,31	1398,92	0,00
2	1,70	1,43	0,0010	0,0013	1055,45	1130,90	640,72	1029,05	1,03
3	1,43	1,20	0,0010	0,0013	1094,48	1208,96	671,38	759,32	0,76
4	1,20	1,01	0,0010	0,0013	1132,32	1284,64	685,63	549,32	0,55
5	1,01	0,90	0,0010	0,0013	1169,74	1359,49	523,54	333,07	0,33

Tabla 4.7 Componentes de  $\sigma_e$  en el estirado del acero ER 70S-6, para  $\Delta=1,20$  en *PullWorks*.

Etapa	$\sigma_{dh+roz}$ [MPa]	$\sigma_{bp}$ [MPa]	$\sigma_{di}$ [MPa]	$\sigma_{cal}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
1	526,67	0,00	82,32	7,33	616,31
2	547,73	0,00	85,40	7,60	640,72
3	574,95	0,00	88,55	7,88	671,38
4	585,87	0,00	91,62	8,15	685,63
5	420,48	0,00	94,64	8,42	523,54

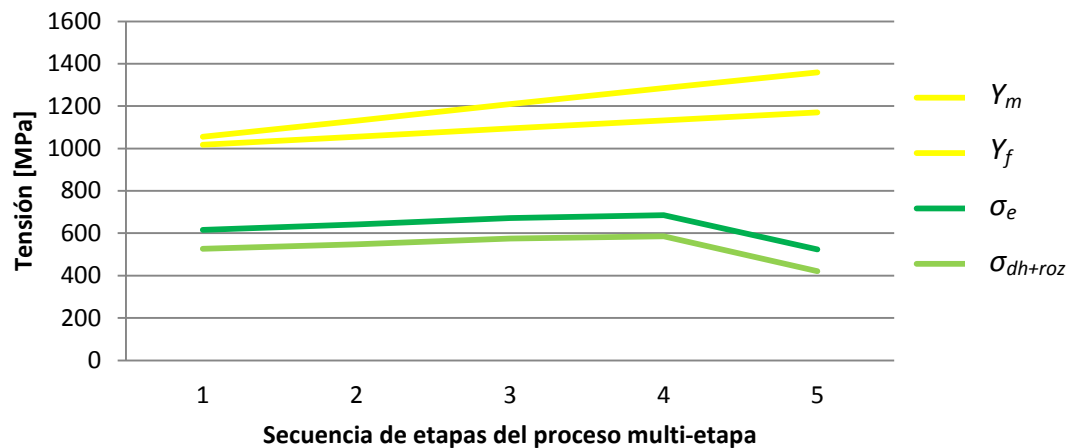


Figura 4.3 Tensiones del estirado secuencial del acero ER 70S-6, para  $\Delta=1,20$  en *PullWorks*.

Se deduce, a partir de los resultados obtenidos para la evolución del valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$ , representados en la gráfica de la Figura 4.3, que todas las etapas tienen un amplio margen de viabilidad práctica.

En la gráfica de la Figura 4.3, se observa que el valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$  se mantiene muy por debajo de los límites de fluencia del material conformado, en todas y cada una de las etapas de este diseño secuencial.

➤ **Supuesto nº2: Proceso de estirado secuencial discontinuo para  $\alpha=6^\circ$ ,  $L_c=0,4 \cdot d_f$ ,  $\Delta=1,80$ ,  $\mu=0,18$ , lubricación de base grafito y a velocidad  $v_f=0,0013$  m/s.**

En los resultados obtenidos con la aplicación *PullWorks*, el valor del factor delta  $\Delta$  se mantiene constante según un valor especificado para el diseño de la secuencia, tal y como se aprecia en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Secuencia de estirado del acero para soldadura ER 70S-6 en 7 etapas ( $\Delta=1,80$ ).

<b>Etapa</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b><math>d_f</math> [mm]</b>	2,02	1,80	1,60	1,42	1,26	1,12	1,00	0,90	-	-	-
<b><math>\epsilon_{efectiva}</math></b>	-	0,23	0,47	0,71	0,95	1,19	1,42	1,63	-	-	-
<b><math>r</math></b>	-	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,19	-	-	-
<b><math>\Delta</math></b>	-	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,99	-	-	-
<b>Recocido</b>	-	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	-	-	-

Cabe recordar que los valores del factor delta  $\Delta$  comprendidos entre 1,5 y 3 mejoran, generalmente y en la mayoría de los casos, las condiciones del proceso cuando se emplean valores del semiángulo  $\alpha$  [Davis et al., 1944] [Wright, 1979].

En la Tabla 4.9 y en la Tabla 4.10 se presentan los valores de los diferentes parámetros que definen tecnológicamente las etapas de la secuencia diseñada.

Tabla 4.9 Parámetros tecnológicos del estirado del acero ER 70S-6, para  $\Delta=1,80$  en *PullWorks*.

<b>Etapa</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>d_f</math> [mm]</b>	<b><math>V_e</math> [m/s]</b>	<b><math>V_s</math> [m/s]</b>	<b><math>\bar{Y}</math> [MPa]</b>	<b><math>Y_f</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_e</math> [MPa]</b>	<b><math>F</math> [N]</b>	<b><math>P</math> [W]</b>
<b>1</b>	2,02	1,80	0,0010	0,0013	1005,30	1030,60	449,94	1144,97	3,43
<b>2</b>	1,80	1,60	0,0010	0,0013	1031,21	1082,42	468,87	942,71	3,77
<b>3</b>	1,60	1,42	0,0010	0,0013	1057,96	1135,91	485,77	769,30	3,85
<b>4</b>	1,42	1,26	0,0010	0,0013	1084,40	1188,80	498,52	621,61	4,35
<b>5</b>	1,26	1,12	0,0010	0,0013	1110,41	1240,82	504,88	497,41	3,98
<b>6</b>	1,12	1,00	0,0010	0,0013	1135,83	1291,66	501,88	394,18	4,34
<b>7</b>	1,00	0,90	0,0010	0,0013	1161,84	1343,67	486,51	309,51	4,02

Tabla 4.10 Componentes de  $\sigma_e$  en el estirado del acero ER 70S-6, para  $\Delta=1,80$  en *PullWorks*.

<b>Etapa</b>	<b><math>\sigma_{dh+roz}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{bp}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{di}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{cal}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_e</math> [MPa]</b>
<b>1</b>	361,37	0,00	81,34	7,24	449,94
<b>2</b>	378,01	0,00	83,43	7,42	468,87
<b>3</b>	392,55	0,00	85,60	7,62	485,77
<b>4</b>	402,98	0,00	87,74	7,81	498,52
<b>5</b>	407,04	0,00	89,84	7,99	504,88
<b>6</b>	401,80	0,00	91,90	8,18	501,88
<b>7</b>	384,14	0,00	94,00	8,37	486,51

Viendo la gráfica de la Figura 4.4, se puede afirmar que las etapas de la secuencia diseñada son técnicamente viables. En ninguna de las etapas de la secuencia diseñada se alcanzan los límites de fluencia.

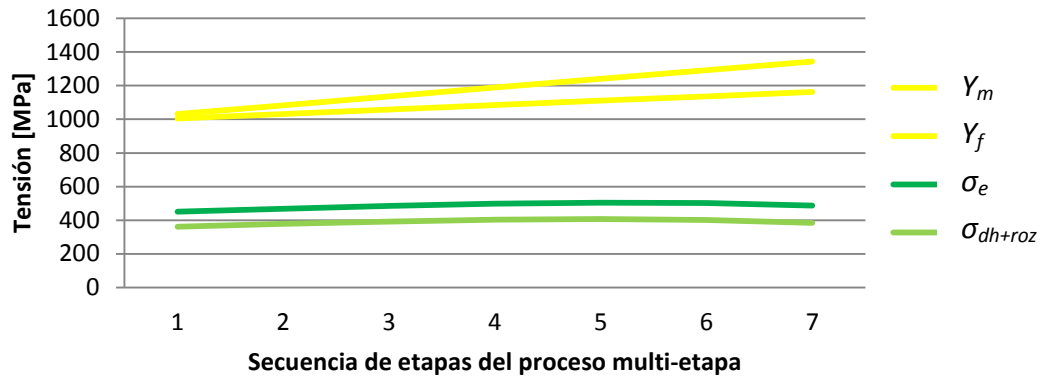


Figura 4.4 Tensiones del estirado secuencial del acero ER 70S-6, para  $\Delta=1,80$  en *PullWorks*.

Podemos observar que las tensiones de estirado obtenidas son inferiores en todos los casos a las del supuesto primero, estudiado anteriormente. Esta característica es consecuencia directa del aumento en el valor impuesto para el factor delta o factor de forma de la herramienta. A mayor valor del factor delta menor será el ratio de deformación implicado y con ello la reducción de sección por etapa.

#### **4.1.4 Resultados del análisis mediante la herramienta MEF, *Deform2D***

Se ha realizado un análisis numérico basado en simulaciones mediante el método de los elementos finitos, para cada una de las etapas en los dos supuestos estudiados anteriormente, con objeto de obtener un estudio de tensiones paralelo al conseguido mediante la aplicación de la metodología propuesta en esta tesis.

Para este análisis se ha empleado el software *Deform2D*, bajo las mismas condiciones y valores para variables geométricas, propiedades mecánicas del material y rozamiento en la interfase en todas las etapas de las secuencias definidas en los casos estudiados.

Dado que las velocidades adoptadas para realizar el análisis de los casos presentados anteriormente mediante la metodología propuesta son significativamente bajas, se ha aplicado una velocidad de 500 mm/s (0,5 m/s) para las simulaciones de estas mismas secuencias con el software *Deform2D*, con el objeto de que el programa realice los cálculos más rápido.

El valor de la velocidad del proceso repercute directamente en el valor de la potencia final necesaria para poder hacer pasar el material a través de la hilera. Cabe destacar que, bajo las premisas adoptadas en la metodología desarrollada, no se aprecia de ninguna manera la influencia que dicha velocidad puede tener a la hora de diseñar la secuencia del proceso de estirado multi-etapa ni en el valor de la tensión de estirado

asociada a cada una de las etapas del mismo. Este hecho se corrobora también en los resultados de los ensayos de tracción realizados por Rojas y Celentano, de manera que en éstos se demuestra que la velocidad tiene una influencia mínima en las propiedades finales del material trefilado [Rojas et al., 2008] [Celentano et al., 2009].

➤ **Supuesto nº1: Proceso de estirado secuencial discontinuo para  $\alpha=6^\circ$ ,  $L_c=0,4.d_f$ ,  $\Delta=1,20$ ,  $\mu=0,18$ , lubricación de base grafito y a velocidad  $v_f=0,5$  m/s.**

Simulando todas y cada una de las etapas, con la ayuda del software de análisis por el método de los elementos finitos *Deform2D*, se han obtenido los resultados presentados en la Tabla 4.11 para los valores de los parámetros tecnológicos tensión, deformaciones y carga necesaria para el estirado, en cada una de las etapas del proceso secuencial diseñado.

Tabla 4.11 Resultados para el estirado del acero ER 70S-6,  $\Delta=1,20$  en *Deform2D*.

<b>Etap</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>d_f</math> [mm]</b>	<b>Rec.</b>	<b><math>\epsilon_{efect.m\acute{a}x.}</math></b>	<b><math>\epsilon_{efect.P1}</math></b>	<b><math>\sigma_{efect.P1}</math>[MPa]</b>	<b><math>\sigma_{efect.m\acute{a}x.}</math>[MPa]</b>	<b>F [N]</b>
<b>1</b>	2,02	1,70	SI	0,40	0,36	548	1070	1300
<b>2</b>	1,70	1,42	NO	0,79	0,72	619	1150	1030
<b>3</b>	1,42	1,21	NO	1,18	1,05	627	1230	728
<b>4</b>	1,21	1,01	NO	1,47	1,40	694	1300	580
<b>5</b>	1,01	0,90	NO	1,78	1,64	550	1330	356

En los resultados del análisis se puede observar cómo, al no realizarse recocido en ninguna de las cinco etapas, existe una deformación acumulada en el producto estirado, al finalizar el proceso multi-etapa de estirado.

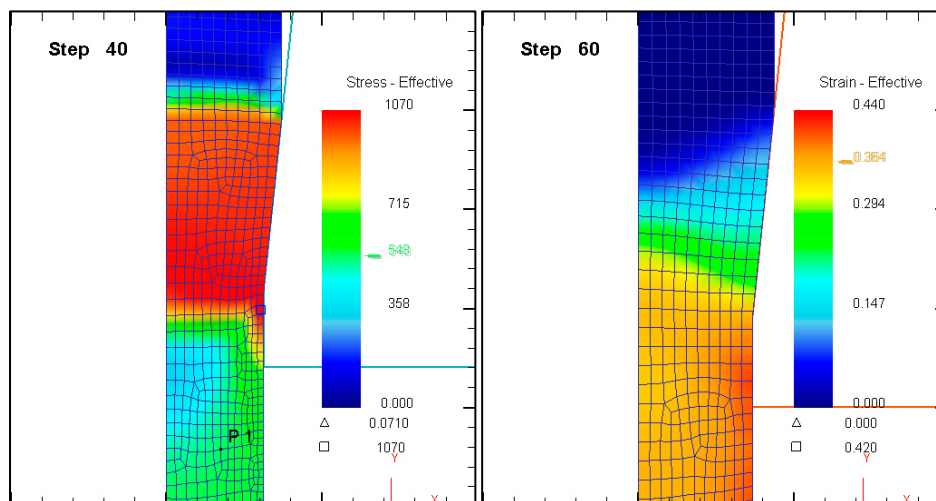


Figura 4.5 Tensiones y deformaciones en la etapa 1ª del proceso secuencial de estirado del acero ER 70S-6,  $\Delta=1,20$  en *Deform2D*.

El valor que alcanza la deformación efectiva  $\epsilon_f$  a la salida de la hilera se puede apreciar en la Figura 4.5, en la que representan los resultados de la simulación.

Se puede observar cómo, en la zona de deformación en el interior de la hilera, se supera el límite de fluencia del metal a su paso a través de ésta sin llegar a alcanzar la tensión de rotura del material  $R_m$ , en todas las etapas de la secuencia, lo que se traduce en la deformación plástica del metal en el interior de la hilera de estirado.

La tensión efectiva máxima en el material durante el estirado se produce dentro de la zona de reducción, en el cono de la hilera. La distribución de deformación en la sección del hilo estirado no es uniforme, dándose el valor máximo de esta deformación efectiva  $\epsilon_f$  en la zona más cercana a la superficie del alambre y a la salida de la hilera.

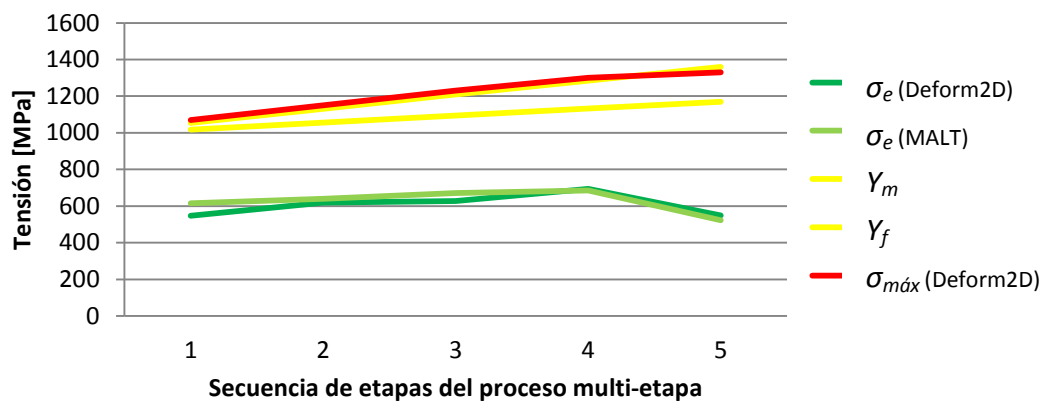


Figura 4.6 Tensiones para el estirado del acero ER 70S-6,  $\Delta=1,20$  en *Deform2D*.

En la Figura 4.6, la tensión de estirado obtenida en *Deform2D* no alcanza los límites de fluencia del material estirado y, por tanto, el alambre o hilo estirado no corre el riesgo de romperse a su salida de la hilera.

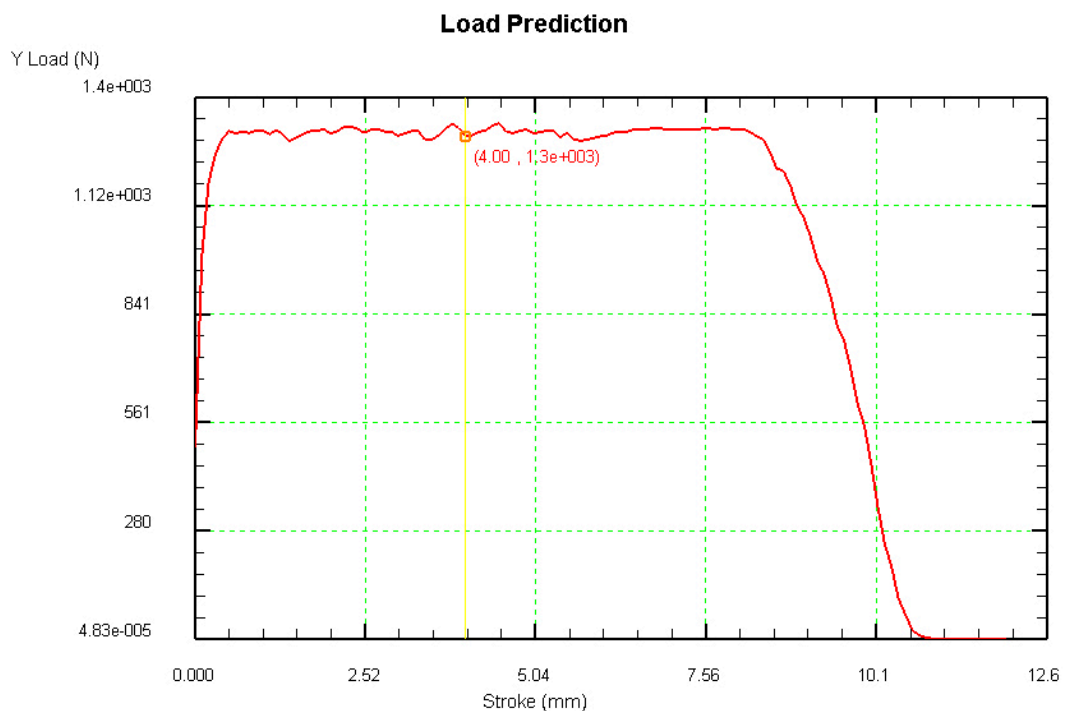


Figura 4.7 Carga de estirado vs desplazamiento, 1ª etapa de estirado (ER 70S-6,  $\Delta=1,20$ ).

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

En la Figura 4.7 se observa cómo la carga de estirado alcanza su valor máximo y se estabiliza durante el proceso estacionario correspondiente al estirado del material a su paso por la hilera a velocidad constante.

➤ **Supuesto nº2: Proceso de estirado secuencial discontinuo para  $\alpha=6^\circ$ ,  $L_c=0,4 \cdot d_f$ ,  $\Delta=1,80$ ,  $\mu=0,18$ , lubricación de base grafito y a velocidad  $v_f=0,5$  m/s.**

Utilizando el software *Deform2D* se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 4.12, para cada una de las etapas que conforman la secuencia de estirado multi-etapa en este supuesto:

Tabla 4.12 Resultados para el estirado del acero ER 70S-6,  $\Delta=1,80$  en *Deform2D*.

Etapa	$d_0$ [mm]	$d_f$ [mm]	Rec.	$\epsilon_{\text{efect.máx.}}$	$\epsilon_{\text{efect. P1}}$	$\sigma_{\text{efect.P1}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{efect.máx.}}$ [MPa]	F [N]
1	2,02	1,80	SI	0,31	0,25	390	1050	1050
2	1,80	1,60	NO	0,57	0,50	414	1080	900
3	1,60	1,42	NO	0,86	0,76	420	1140	760
4	1,42	1,26	NO	1,14	1,02	465	1210	622
5	1,26	1,12	NO	1,44	1,28	521	1250	504
6	1,12	1,00	NO	1,69	1,53	510	1330	400
7	1,00	0,90	NO	1,73	1,89	411	1360	300

El valor observado para la tensión efectiva en las simulaciones es muy estable. La fuerza de estirado  $\sigma_e$  disminuye progresivamente conforme la sección se ve reducida y no alcanza el límite de fluencia del material estirado, tal y como se aprecia en la representación gráfica de la Figura 4.8.

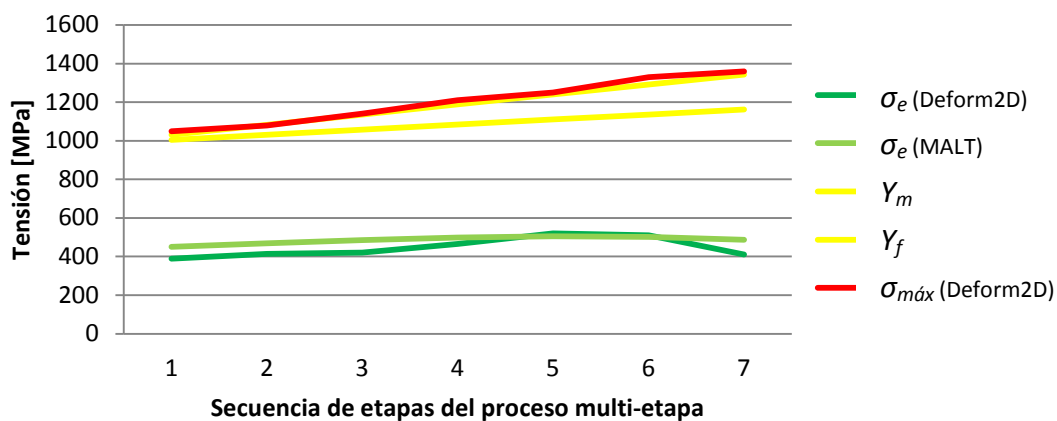


Figura 4.8 Tensiones para el estirado del acero ER 70S-6,  $\Delta=1,80$  en *Deform2D*.

En la Figura 4.9 se representan los resultados correspondientes a las simulaciones realizadas con el software *Deform2D* para la quinta etapa de la secuencia diseñada. En la simulación de tensiones y deformaciones correspondiente a la 5ª etapa del proceso secuencial diseñado, se puede ver cómo la tensión efectiva máxima  $\sigma_{\text{máx}}$  se localiza en la zona en la cual se produce reducción en el interior de la hilera.

Para esa quinta etapa, el valor de la deformación acumulada a la salida de la hilera  $\epsilon$  se mantiene bastante homogéneo en toda la sección del alambre estirado, aunque es algo mayor en la superficie, tal y como se aprecia en la Figura 4.9. En dicha simulación se puede observar también la distribución de tensión en el alambre ya transformado, en el punto P1 a la salida de la hilera de estirado.

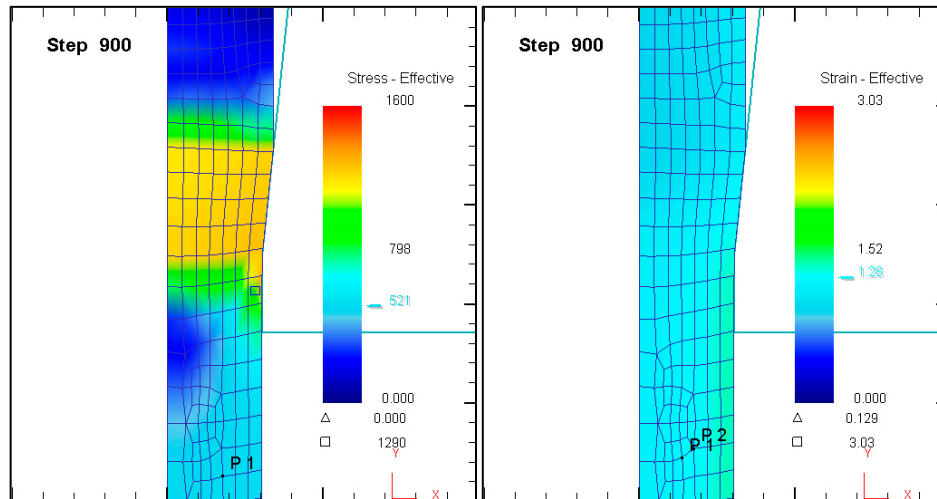


Figura 4.9 Tensiones y deformaciones en la etapa 5ª del proceso secuencial de estirado del acero ER 70S-6,  $\Delta=1,80$  en *Deform2D*.

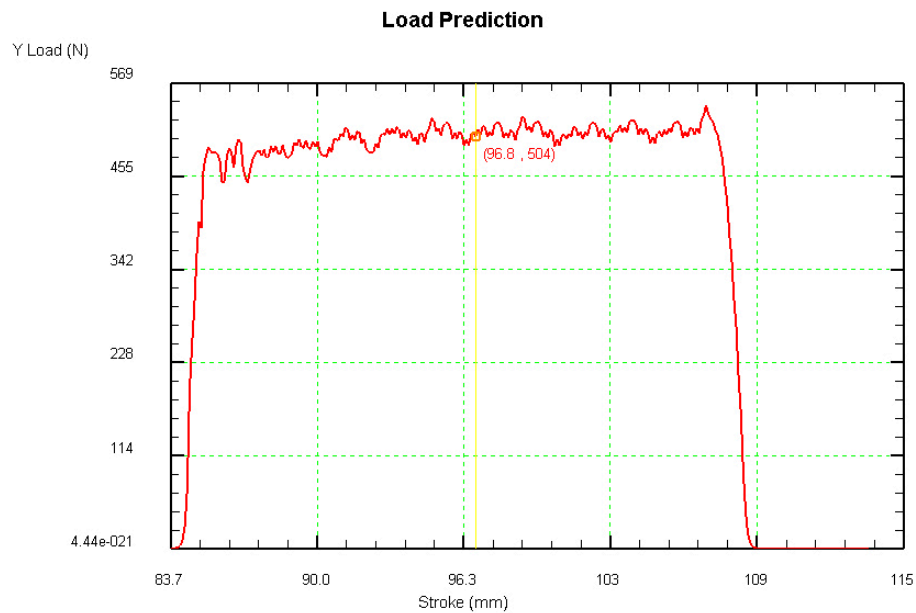


Figura 4.10 Carga de estirado vs tiempo, 5ª etapa de estirado (ER 70S-6,  $\Delta=1,80$ ).

Se observa, en la Figura 4.10, cierta inestabilidad del valor de carga al inicio del estirado, correspondiente a la etapa representada en la gráfica anterior, aspecto que es debido a la entrada de la punta o extremo inicial y a su paso a través de la hilera correspondiente a la 5ª etapa. Se puede ver cómo el proceso de estirado, como proceso estacionario que es, mantiene un valor de carga prácticamente constante a partir del momento en el que se alcanza una velocidad lineal constante del paso del alambre a través de dicha matriz de estirado.

#### **4.1.5 Discusión de los resultados obtenidos**

A continuación se presentan las observaciones y conclusiones particulares observadas en los supuestos a los que se han aplicado los métodos propuestos:

- La investigación tomada como referencia en este caso se fundamenta en un análisis experimental, pero se ha de tener en cuenta que los valores geométricos correspondientes al diseño de las etapas de la secuencia obtenida en dicho estudio dan como resultado, en todas y cada una de las etapas que la constituyen, un valor muy cercano a  $\Delta=3$  para el factor de forma de la hilera de estirado.
- Un valor alto de  $\Delta$  implica mayor diferencia de secciones, mayor ángulo en la zona de reducción y menor longitud del cono de reducción, lo cual tendrá como consecuencia una menor superficie de contacto y una reducción en la fricción y el calentamiento en la zona de contacto aumentando la presión en dicha superficie [Tittel et al., 2012].
- Los supuestos analizados mediante la metodología desarrollada en esta tesis tienen como objetivo conocer la influencia del valor de dicho factor de forma  $\Delta$ , para un valor determinado del semi-ángulo de las hileras empleadas en toda la secuencia del proceso multi-etapa, dentro del rango de valores comúnmente aconsejable en el proceso de estirado [Campos et al., 2005].
- Se pretende diseñar otras variantes del diseño de referencia y analizar su viabilidad mediante los métodos analítico y numérico, contrastando los resultados obtenidos y evaluando la viabilidad de estas.
- En la Figura 4.11, se representa la comparativa de evolución de la tensión de estirado en la secuencia realizada, para cada uno de los supuestos correspondientes a los procesos diseñados. Se representan los procesos de estirado multi-etapa diseñados con *PullWorks* y analizados con *Deform2D*, además de los resultados obtenidos experimentalmente en el estudio tomado como referencia en este caso.
- Todos estos diseños, calculados para el proceso secuencial de estirado del acero ER 70S-6, se han definido bajo un abanico de valores representativos en el rango de valores óptimos del factor de forma  $\Delta$ , con el fin de conocer la influencia que este factor tiene en el diseño geométrico y tecnológico de este tipo de PCDP.
- Se puede apreciar cómo, cuanto menor es el valor del factor de forma  $\Delta$  aplicado para el diseño de la secuencia de etapas del proceso de estirado multi-etapa, más corta es la secuencia de etapas resultante y, en consecuencia, mayores son las tensiones de estirado que se llegan a alcanzar durante el proceso.

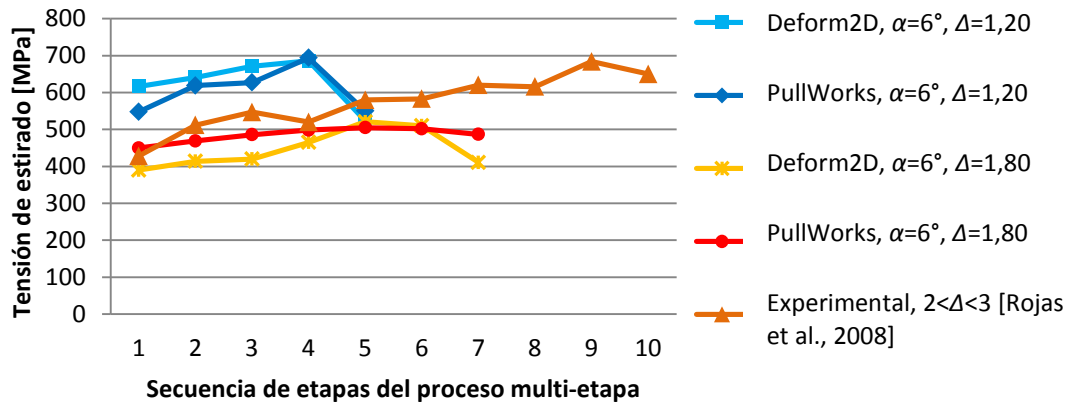


Figura 4.11 Comparativa de resultados obtenidos para el trefilado del acero ER 70S-6.

- El experimento referencia presenta una escalada progresiva del valor de la tensión de estirado, consecuencia de la ausencia de recocidos y del consiguiente endurecimiento del acero al ser estirado sucesivamente, una y otra vez.
- En ambos procesos estudiados por la metodología propuesta se aprecia que los valores de la tensión de estirado  $\sigma_e$ , obtenidos como resultado en el programa *PullWorks*, son muy similares a los obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con *Deform2D*. Los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología propuesta son satisfactorios y se corresponden bien con los obtenidos a partir de las mencionadas simulaciones mediante el método de los elementos finitos.
- Hay que tener en cuenta que en los análisis realizados con el software *Deform2D* se ha aplicado una velocidad de 0,5 m/s, velocidad notablemente superior a la aplicada en los ensayos realizados en el estudio tomado del documento de referencia [Rojas et al, 2008] que es de 0,0013 m/s.
- Cabe reseñar que la temperatura, que depende de la velocidad del proceso de estirado, influye en el valor final de la tensión de estirado [Haddi et al., 2011]. La metodología propuesta en esta tesis no considera esta influencia, ni a la hora de calcular el diseño geométrico ni tampoco para el cálculo de la tensión de estirado en las etapas del proceso secuencial multi-etapa. Ambos aspectos señalan que la metodología desarrollada se fundamenta en un método de límite inferior para la determinación de la fuerza de estirado.
- En la Figura 4.12 se muestra la gráfica comparativa entre las siete primeras etapas, realizadas en el experimento del estirado secuencial multi-etapa del acero ER 70S-6 presentado en el documento de referencia, y las siete etapas constituyentes del supuesto segundo, diseñado y analizado mediante la herramienta informática *PullWorks* para  $\Delta = 1,80$ .

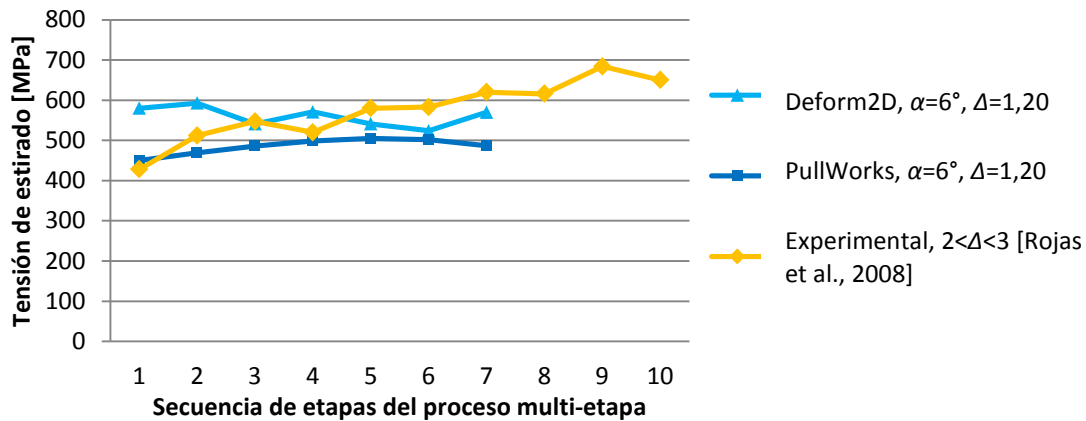


Figura 4.12 Comparación de resultados obtenidos para el trefilado del acero ER 70S-6.

- Se aprecia que los valores obtenidos mediante la aplicación de la metodología propuesta se mantienen ligeramente por debajo de los obtenidos con *Deform2D*, ya que la metodología se fundamenta en un método de límite inferior para la determinación de la tensión de estirado, como se ha mencionado anteriormente.
- El valor de la tensión de estirado en la etapa inicial de la secuencia experimental propuesta en el documento de referencia es muy similar al valor obtenido en dicha etapa, mediante la metodología propuesta e implementada en *PullWorks*, para un valor delta  $\Delta=1,80$ .
- El valor de la tensión se mantiene bastante estable en todas las etapas de la secuencia de estirado, tanto en los resultados obtenidos con *PullWorks* como en los obtenidos con *Deform2D*, a pesar de que en la etapa inicial se inicia el proceso con material recocido a diferencia del resto de etapas de la secuencia de estirado diseñada. Este aspecto indica que, en este rango de secciones y ratios de reducción, el factor debido al endurecimiento por deformación en frío no tiene una gran influencia en el valor de la tensión de estirado para este tipo de acero.
- Observando las condiciones consideradas en los dos supuestos estudiados y comparándolas con las de la secuencia experimental presentada en el documento de referencia para este caso de estudio, hay una diferencia notable en el valor del factor de forma de la herramienta aplicado y el valor que este factor adopta en cada una de las etapas de la secuencia ensayada. En este último caso se alcanzan valores superiores a  $\Delta=2$ , e incluso se llega a  $\Delta=3$  en la etapa inicial ensayada, siendo además valores diferentes para este factor de forma y que oscilan entre 2 y 3.
- Otra gran diferencia se encuentra en las velocidades aplicadas. Es un hecho conocido que la que la velocidad de deformación no afecta mayormente al endurecimiento de los aceros en deformaciones aplicadas a temperaturas cercanas a la del ambiente [Gálvez et al., 2002].

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

- El objeto del ensayo experimental, tomado como referencia, es el caracterizar el acero estudiado tras cada una de las etapas de un proceso secuencial de estirado multi-etapa sin recocidos intermedios, estudiando de esta forma la influencia que tiene el endurecimiento acumulado durante el proceso en las propiedades mecánicas del acero empleado en los ensayos.
- La finalidad de la metodología que se ha desarrollado en el presente trabajo de investigación es el diseño de los procesos secuenciales de estirado multi-etapa, fundamentado en la optimización de cada una de las etapas que lo constituyen, desde el punto de vista de la tensión de estirado. Esta metodología permite al usuario diseñar un proceso multi-etapa, con el que será posible obtener un producto estirado libre de defectos en toda su sección y con unas propiedades mecánicas que van a depender del grado de deformación aplicado en las últimas etapas de la secuencia.

Es posible que el producto final obtenido en el experimento realizado en la investigación citada como referencia de este caso presente algún tipo de defecto superficial o interno. Si lo que se pretendiese fuese obtener un producto de buena calidad geométrica, estructural y superficial, sin perseguir la consecución de unas propiedades mecánicas que impliquen un estado de pre-tensión excesivo del mismo, sería conveniente diseñar un proceso estable desde el punto de vista de la tensión de estirado e incluyendo algún que otro recocido intermedio en su secuencia de etapas.

*PullWorks* permite diseñar y validar tecnológicamente un proceso de estirado secuencial multi-etapa análogo al presentado en la investigación de referencia, pero mucho más fiable frente a roturas o posibles defectos producidos por un excesivo endurecimiento.

Es posible diseñar un proceso secuencial de estirado multi-etapa más estable, en base al valor de la tensión de estirado en cada etapa de la secuencia de etapas. Este diseño va a ofrecer una menor exigencia desde el punto de vista de la fuerza y la potencia requeridas para el estirado en dichas etapas del proceso multi-etapa.

Diseño de la secuencia de etapas del Proceso de Estirado Multi-etapa

Etapas	d0i [mm]	e0i	Recocido	LIMITE DEFORMACIÓN HOMOGÉNEA				REDUCCIÓN ÁREA		REDUCCIÓN RATIO		DEFORMACIONES			Δ
				εf máx i	Δ ε máx i	d f min i [mm]	d f i [mm]	% parcial	% total	r i	Δ r i	Δ ε i	ε f i		
1	2,92	0	SI	1,14	1,14	1,14	1,96	15,21	15,21	0,15	0,15	0,17	0,17	2,60	
2	1,86	0,17	NO	1,26	1,09	1,08	1,72	14,49	27,50	0,14	0,30	0,16	0,33	2,60	
3	1,72	0,33	NO	1,40	1,07	1,01	1,59	14,55	38,04	0,15	0,44	0,16	0,49	2,60	
4	1,49	0,49	NO	1,55	1,06	0,94	1,47	14,52	47,04	0,15	0,59	0,16	0,65	2,60	
5	1,47	0,65	NO	1,70	1,05	0,87	1,36	14,41	54,67	0,14	0,73	0,16	0,81	2,60	
6	1,36	0,81	NO	1,86	1,05	0,80	1,25	15,52	61,71	0,16	0,89	0,17	0,98	2,60	
7	1,25	0,98	NO	2,02	1,04	0,74	1,15	15,36	67,59	0,15	1,04	0,17	1,15	2,60	
8	1,15	1,15	NO	2,19	1,04	0,68	1,06	15,04	72,46	0,15	1,19	0,16	1,31	2,60	
9	1,06	1,31	NO	2,34	1,03	0,63	1,03	14,52	76,46	0,15	1,34	0,15	1,47	2,00	
10	0,98	1,47	NO	2,50	1,03	0,59	0,90	15,66	80,15	0,16	1,49	0,17	1,64	2,46	
												Σ Δ ε	ε f		
												1,82	1,64		

OPCIÓN 1  
Δ min (Óptimo)  
2,60  
OPCIÓN 2  
RESET

Aceptar

Figura 4.13 Diseño del estirado del acero ER 70S-6 en 10 etapas ( $\Delta = 2,60$ ).

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

Considerando un valor para el factor de forma  $\Delta = 2,60$  en todas las etapas del proceso y bajo las mismas condiciones aplicadas en los apartados anteriores, *PullWorks* permite diseñar un proceso secuencial de estirado multi-etapa mejorando los aspectos señalados anteriormente, tal y como se aprecia en los resultados obtenidos que se muestran en las imágenes de *PullWorks*, de la Figura 4.13 y de la Figura 4.14.

Etapa	Tratamiento Recocido	Análisis Local $\sigma_{z-cdh}$ [MPa]	Retroceso $\sigma_{cbp}$ [MPa]	W redundante $\sigma_{odi}$ [MPa]	Calibración local [MPa]	Tensión Estirado $\sigma$ [MPa]	Fluencia media $Y_m$ [MPa]	Fluencia salida $Y_f$ [MPa]	Fuerza Estirado $F$ [N]	Potencia Estirado $P$ [W]
1	SI	297,2944	0	91,47500	8,140209	396,90965	1130,5846	1151,6664	1078,47	1,40
2	NO	286,3285	0	92,64067	8,243940	387,21319	1144,9917	1168,0906	899,70	1,17
3	NO	289,8875	0	93,40994	8,312397	391,60992	1154,4995	1178,9295	777,57	1,01
4	NO	291,2452	0	93,98184	8,363288	393,59040	1161,5679	1186,9874	667,99	0,87
5	NO	290,2119	0	94,43981	8,404042	393,05581	1167,2281	1193,4401	570,98	0,74
6	NO	314,7050	0	94,85835	8,441288	418,00465	1172,4011	1199,3373	512,97	0,67
7	NO	312,4716	0	95,20763	8,472369	416,15163	1176,7180	1204,2585	432,25	0,56
8	NO	306,7601	0	95,51212	8,499466	410,77165	1180,4814	1208,5488	362,50	0,47
9	NO	296,7739	0	95,76588	8,522047	401,06186	1183,6177	1212,1242	302,52	0,39
10	NO	321,4856	0	96,02555	8,545155	426,05638	1186,8272	1215,7830	271,05	0,35

Figura 4.14 Parámetros tecnológicos, estirado de acero ER 70S-6 ( $\alpha=6^\circ$ ,  $\Delta = 2,75$ ).

Todos los resultados, obtenidos a partir del estudio y análisis realizado con ayuda del programa *PullWorks*, se presentan en la Tabla 4.13 y en la Tabla 4.14:

Tabla 4.13 Diseño del estirado del acero ER 70S-6 con *PullWorks* ( $\Delta = 2,60$ ).

Etapa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_f$ [mm]	2,02	1,86	1,72	1,59	1,47	1,36	1,25	1,15	1,06	0,98	0,90
% parcial	-	15,21	14,49	14,55	14,52	14,41	15,52	15,36	15,04	14,52	15,66
% total	-	15,21	27,50	38,04	47,04	54,67	61,71	67,59	72,46	76,46	80,15
$r$	-	0,15	0,14	0,15	0,15	0,14	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16
$\Delta$	-	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,46
Recocido	-	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Tabla 4.14 Parámetros tecnológicos del estirado del acero ER 70S-6, *PullWorks* ( $\alpha=6^\circ$ ,  $\Delta=2,75$ ).

Etapa	$d_0$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$F$ [N]	$P$ [W]
1	2,02	1,86	0,001	0,0013	1130,58	1151,66	396,90	1078,47	1,40
2	1,86	1,72	0,001	0,0013	1144,99	1168,09	387,21	899,70	1,17
3	1,72	1,59	0,001	0,0013	1154,49	1178,93	391,60	777,57	1,01
4	1,59	1,47	0,001	0,0013	1161,56	1186,98	393,59	667,99	0,87
5	1,47	1,36	0,001	0,0013	1167,22	1193,44	393,05	570,98	0,74
6	1,36	1,25	0,001	0,0013	1172,40	1199,33	418,00	512,97	0,67
7	1,25	1,15	0,001	0,0013	1176,71	1204,25	416,15	432,25	0,56
8	1,15	1,06	0,001	0,0013	1180,48	1208,54	410,77	362,50	0,47
9	1,06	0,98	0,001	0,0013	1183,61	1212,12	401,06	302,52	0,39
10	0,98	0,90	0,001	0,0013	1186,82	1215,78	426,05	271,05	0,35

Se puede afirmar, observando los resultados obtenidos, que el proceso multi-etapa optimizado mediante la metodología propuesta en este trabajo va a ser un proceso más fiable frente a posibles roturas y defectos en el producto trefilado gracias a esta mayor estabilidad en la tensión aplicada.

En la Figura 4.15 se presenta una comparación de la evolución de los valores de  $\sigma_e$ , etapa por etapa, a partir de los resultados obtenidos del análisis del proceso diseñado realizado mediante la herramienta informática desarrollada en esta tesis y los resultados presentados en los estudios revisados en los documentos de referencia:

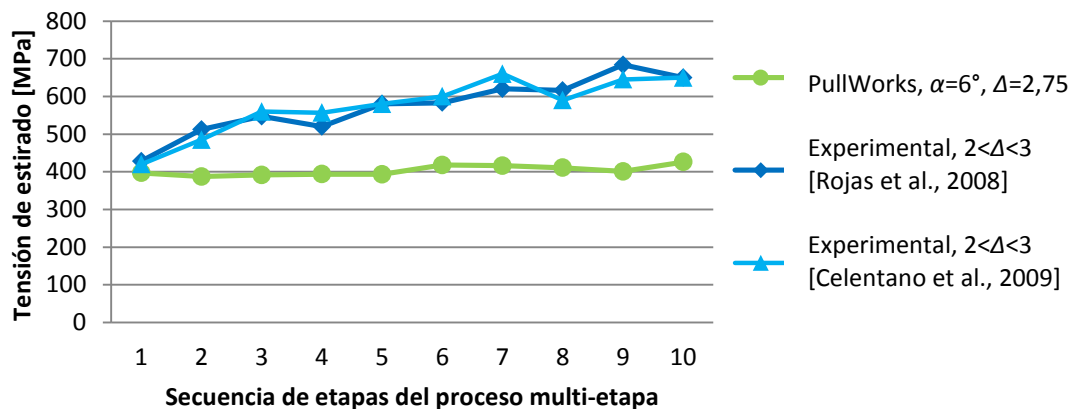


Figura 4.15 Comparativa de tensiones de estirado multi-etapa del acero ER 70S-6 en 10 etapas.

Como se puede apreciar en la gráfica, la evolución del valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$  en cada una de las etapas del proceso secuencial, optimizado mediante el programa *PullWorks*, presenta mayor estabilidad a lo largo de toda la secuencia.

Se puede observar que los valores de tensiones de estirado, fuerzas de estirado y potencia requerida por el nuevo proceso, en cada una de sus etapas, son ligeramente inferiores a los que se han obtenido en las secuencias experimentales presentadas en los documentos tomados como referencia en este caso y que han sido objeto del estudio realizado. Este hecho confirma que el método de análisis local de tensiones aplicado al cálculo de la tensión de estirado ofrece resultados que responden a un límite inferior.

## **4.2 Estudio y análisis del trefilado de cobre para conductores eléctricos**

A continuación se describe el estudio y análisis del proceso de trefilado para obtener un hilo de cobre a partir de una barra cilíndrica laminada de cobre electrolítico Cu-ETP recocido. Este cobre electrolítico, empleado en la fabricación de conductores, se designa Cu-ETP/CW004A, según la norma UNE [UNE EN 1412:1996], C11000 según ASTM [ASTM B846-11a].

Para este análisis se aplica el procedimiento metodológico desarrollado en la presente tesis, determinando el diseño del proceso secuencial de estirado y definiendo tecnológicamente las etapas del mismo.

### **4.2.1 Caracterización de las condiciones de inicio del proceso**

Las condiciones iniciales, establecidas para el proceso de trefilado secuencial multi-etapa de hilo de cobre para conductores son las que siguen:

- Tipo de proceso: Estirado.
- Material: Cobre electrolítico Cu-ETP recocido, C11000-O.
- Geometrías inicial-final del proceso de estirado:  $d_0 = 3,2 \text{ mm} \rightarrow d_f = 1,3 \text{ mm}$ .
- Geometría de las hileras:  $\alpha = 8^\circ$ ,  $R = 1 \text{ mm}$ ,  $L_c = 0,50 \cdot d_f \text{ mm}$ ,  $\Delta = 2,40$  (todas las etapas).
- Velocidad del proceso:  $v_f = 7,8 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  en todas las etapas de estirado.

Se trata de un proceso de estirado etapa a etapa, discontinuo, por lo tanto se considera una velocidad determinada a la salida de la hilera en todas las etapas.

En la Tabla 4.15 y en la Tabla 4.16, se presentan las propiedades mecánicas y composición química del cobre Cu-ETP:

Tabla 4.15 Propiedades mecánicas Cu-ETP, [ASM International Handbook Committee, 1990].

Propiedad	Denominación	Valor
$E$	Módulo de Young	117000 [Mpa]
$Y$	Límite de fluencia	69 [Mpa]
$Rm$	Tensión de rotura	221 [Mpa]
$C$	Coeficiente de resistencia a la deformación	315 [Mpa]
$n$	Coeficiente de endurecimiento por deformación	0,54
$\mu$	Coeficiente de rozamiento en la interfase	0,36-0,53

Tabla 4.16 Composición química Cu-ETP, [ASM International Handbook Committee, 1990].

	Cu	O
%	99,9	0,04

#### **4.2.2 Justificación del estudio y análisis del trefilado del cobre**

Se conocen diversos trabajos en los que se investiga a cerca de la influencia de parámetros tales como el semiángulo de la hilera [Vega et al., 2009] [de Castro et al., 1996] o el coeficiente de rozamiento entre herramienta e hilo [Vega et al., 2009], parámetros involucrados en el proceso de estirado del cobre.

Se han consultado otros trabajos de investigación en los que se estudia la influencia del % de reducción aplicada a cada etapa de un proceso secuencial en cada una de las diferentes propiedades mecánicas del producto estirado [Singh et al., 2012].

Se presenta un estudio paralelo al trabajo de investigación tomado como referencia [Lima-Filho, 2003], trabajo cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.17.

Se han estudiado diversos supuestos de este proceso, aplicando la metodología propuesta, con el apoyo del método numérico para evaluar la validez y la fiabilidad de la metodología desarrollada, supuestos en los cuales se aplican diferentes condiciones de lubricación.

Tabla 4.17 Resultados del estudio de A. de P. Lima-Filho, [Lima-Filho, 2003].

<i>d<sub>o</sub></i>	<i>d<sub>f</sub></i>	Datos experimentales (1-sin lubricante, 2-aceite oliva, 3-grafito en spray)						Deformación homogénea + rozamiento	
		<i>F</i> [N]			<i>σ</i> [MPa]			<i>F</i> [N]	<i>σ</i> [MPa]
		1	2	3	1	2	3		
3,2	2,9	1309,2	1273,9	1119,0	198,2	192,9	169,4	1056,8	160,0
2,9	2,6	1222,0	1164,1	1030,7	230,2	219,3	194,1	953,4	179,6
2,6	2,3	1045,4	1018,9	912,3	251,6	245,2	219,6	837,6	201,6
2,3	2,1	847,3	815,9	723,8	244,6	235,6	209,0	524,0	151,3
2,1	1,9	800,3	770,8	679,9	282,3	271,9	239,8	477,2	168,3
1,9	1,7	687,4	678,6	591,4	302,8	299,0	260,6	424,5	187,0
1,7	1,5	541,3	539,3	485,4	306,3	305,2	274,7	371,8	210,4
1,5	1,3	417,7	409,0	363,8	314,7	308,1	274,1	322,8	243,2

En el presente caso se pretende evaluar la influencia de la fricción producida en la interfase o zona de contacto.

#### **4.2.3 Resultados del análisis mediante la metodología propuesta**

En el estudio de este caso se pretende analizar el proceso de estirado de hilo de cobre según las condiciones geométricas especificadas partiendo del proceso presentado en el documento tomado como referencia [Lima-Filho, 2003].

El principal objetivo de este estudio se centra en la consecución de una serie de resultados, utilizando el programa *PullWorks*, para diseñar y definir tecnológicamente la secuencia de etapas que constituye el proceso secuencial de estirado multi-etapa.

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

Se ha realizado un análisis del proceso en diversos supuestos, según diferentes condiciones de rozamiento en la interfase o zona de deformación, con el fin de conocer de la influencia que este determinante factor tiene en el diseño tecnológico de la secuencia de etapas del proceso de estirado multi-etapa.

Para el diseño del proceso de estirado multi-etapa se ha considerado un factor de forma  $\Delta=2,40$ , de manera que el número de etapas obtenido sea equiparable al correspondiente al proceso presentado en el documento de referencia.

➤ **Supuesto nº1: Proceso de estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $\mu=0,36$  en seco y a velocidad  $v_f=0,078$  m/s para un factor de forma  $\Delta=2,40$ .**

La secuencia de etapas, obtenida bajo estas condiciones de fricción, se presenta a continuación. Se puede observar, en los resultados presentados en la Tabla 4.18, que la aplicación ha indicado la necesidad de realizar un recocido de reestructuración tras la quinta etapa de la secuencia, con el fin de posibilitar las etapas siguientes sin que se produzca rotura del material en el estirado.

Tabla 4.18 Diseño del estirado secuencial del cobre,  $\mu=0,36$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  (*PullWorks*).

<b>Etapas</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$d_f$ [mm]	3,20	2,85	2,54	2,26	2,01	1,79	1,59	1,42	1,30	-	-
$\epsilon_{\text{efectiva}}$	-	0,23	0,46	0,69	0,92	1,15	0,24	0,47	0,65	-	-
$r$	-	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,16	-	-
$\Delta$	-	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	3,16	-	-
<b>Recocido</b>	-	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	-	-

Tras obtener el diseño de la secuencia del proceso y calcular las velocidades de salida en cada etapa, en la Tabla 4.19 se muestran los valores correspondientes a cada uno de los parámetros tecnológicos que definen cada etapa del proceso.

Tabla 4.19 Parámetros tecnológicos del estirado del cobre ETP para  $\mu=0,36$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en *PullWorks*.

<b>Etapas</b>	$d_0$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$F$ [N]	$P$ [W]
<b>1</b>	3,20	2,85	0,062	0,078	161,50	211,44	120,88	771,12	60,15
<b>2</b>	2,85	2,54	0,062	0,078	203,54	276,18	151,80	769,17	60,00
<b>3</b>	2,54	2,26	0,062	0,078	236,88	327,53	178,20	714,83	55,76
<b>4</b>	2,26	2,01	0,062	0,078	265,05	370,92	199,84	634,10	49,46
<b>5</b>	2,01	1,79	0,062	0,078	289,77	408,99	216,99	546,04	42,59
<b>6</b>	1,79	1,59	0,062	0,078	163,65	214,76	124,18	246,57	19,23
<b>7</b>	1,59	1,42	0,062	0,078	204,46	277,60	150,80	238,82	18,63
<b>8</b>	1,42	1,30	0,065	0,078	238,89	330,63	151,00	200,43	15,63

En la Tabla 4.20, se desglosan los valores de las diferentes componentes de la tensión de estirado efectiva, para todas y cada una de las 8 etapas del proceso diseñado.

Tabla 4.20 Componentes de  $\sigma_e$  en el estirado del cobre ETP para  $\mu=0,36$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en *PullWorks*.

Etapa	$\sigma_{dh+roz}$ [MPa]	$\sigma_{bp}$ [MPa]	$\sigma_{di}$ [MPa]	$\sigma_{cal}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
1	100,50	0,00	17,47	2,91	120,88
2	126,11	0,00	22,02	3,66	151,80
3	148,30	0,00	25,63	4,26	178,20
4	166,39	0,00	28,68	4,77	199,84
5	180,42	0,00	31,35	5,22	216,99
6	103,53	0,00	17,70	2,95	124,18
7	125,00	0,00	22,12	3,68	150,80
8	120,85	0,00	25,85	4,30	151,00

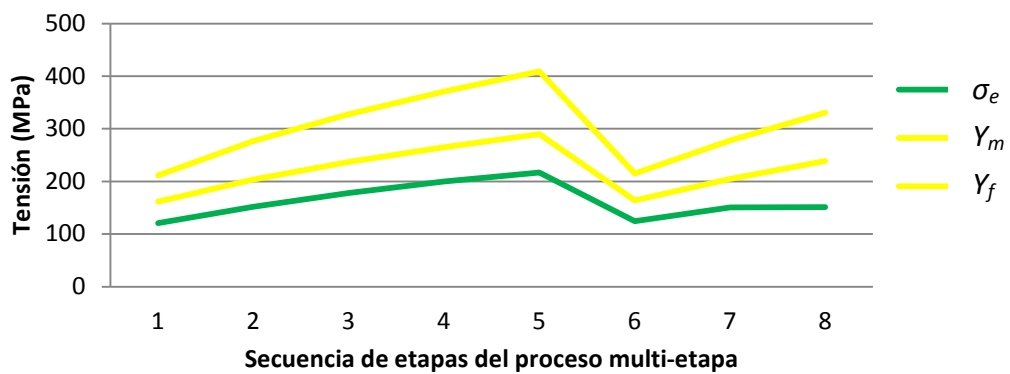


Figura 4.16 Tensiones de estirado del Cu-ETP, para  $\mu=0,36$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en *PullWorks*.

En la gráfica de la Figura 4.16, se observa cómo el valor de  $\sigma_e$  se ve incrementado progresivamente a medida que se avanza en las etapas del proceso secuencial de estirado multi-etapa, hasta que se realiza el recocado:

*PullWorks* ha permitido diseñar un proceso secuencial de estirado multi-etapa perfectamente viable. En ninguna de las etapas se superan los límites de fluencia del metal deformado.

➤ **Supuesto nº2: Estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $\mu=0,36$ , lubricación con jabón ( $\mu=0,21$ ), velocidad  $v_f=0,078$  m/s y para un factor de forma  $\Delta=2,40$ .**

Para las condiciones especificadas, se obtiene la siguiente secuencia de etapas:

Tabla 4.21 Datos del diseño de la secuencia de estirado del cobre ETP para  $\mu=0,21$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en *PullWorks*.

Etapa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_f$ [mm]	3,20	2,85	2,54	2,26	2,01	1,79	1,59	1,42	1,30	-	-
$\epsilon_{efectiva}$	-	0,23	0,46	0,69	0,92	1,15	1,39	1,62	1,80	-	-
$r$	-	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,16	-	-
$\Delta$	-	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	3,16	-	-
<b>Recocado</b>	-	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	-	-

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

En este segundo supuesto se han mejorado las condiciones de fricción en la interfase herramienta-pieza, aplicando jabón como lubricante en el proceso. Esta mejora ha permitido evitar el recocido que se realizaba en el anterior supuesto, en el cual se trabajaba en seco.

Observando el diseño presentado en la Tabla 4.21, se puede ver que se obtiene un grado de deformación efectiva acumulada más elevado y, por lo tanto, las propiedades mecánicas y cualidades del producto final obtenido serán distintas a las obtenidas en el supuesto primero del estirado de cobre.

Una vez determinado el diseño tecnológico se puede observar, en la Tabla 4.22, que la fuerza de estirado es cada vez menor a medida que se avanza en la secuencia del proceso de estirado multi-etapa. En la Tabla 4.23 se aprecia que, gracias a una mejor lubricación, el valor máximo alcanzado por  $\sigma_e$  disminuye.

Tabla 4.22 Parámetros del trefilado del cobre ETP para  $\mu=0,21$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en *PullWorks*.

Etapa	$d_o$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$F$ [N]	$P$ [W]
1	3,20	2,85	0,062	0,078	161,50	211,44	100,23	639,43	49,88
2	2,85	2,54	0,062	0,078	203,54	276,18	125,84	637,62	49,73
3	2,54	2,26	0,062	0,078	236,88	327,53	147,83	593,03	46,26
4	2,26	2,01	0,062	0,078	265,05	370,92	165,82	526,17	41,04
5	2,01	1,79	0,062	0,078	289,77	408,99	179,94	452,82	35,32
6	1,79	1,59	0,062	0,078	313,06	444,86	197,24	391,64	30,55
7	1,59	1,42	0,062	0,078	334,08	477,22	204,06	323,17	25,21
8	1,42	1,30	0,065	0,078	354,90	509,28	184,02	244,26	19,05

Tabla 4.23 Componentes de  $\sigma_e$  en el estirado del cobre ETP para  $\mu=0,21$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en *PullWorks*.

Etapa	$\sigma_{dh+roz}$ [MPa]	$\sigma_{bp}$ [MPa]	$\sigma_{di}$ [MPa]	$\sigma_{cal}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
1	79,86	0,00	17,47	2,91	100,23
2	100,15	0,00	22,02	3,66	125,84
3	117,94	0,00	25,63	4,26	147,83
4	132,37	0,00	28,68	4,77	165,82
5	143,37	0,00	31,35	5,22	179,94
6	157,74	0,00	33,87	5,64	197,24
7	161,91	0,00	36,14	6,01	204,06
8	139,24	0,00	38,40	6,39	184,02

En la gráfica de la Figura 4.17 se ve que proceso secuencial multi-etapa diseñado presenta un margen amplio frente al límite de fluencia, habiéndose eliminado la necesidad de recocido intermedio alguno gracias a la mejora de las condiciones de lubricación, siendo un proceso perfectamente viable.

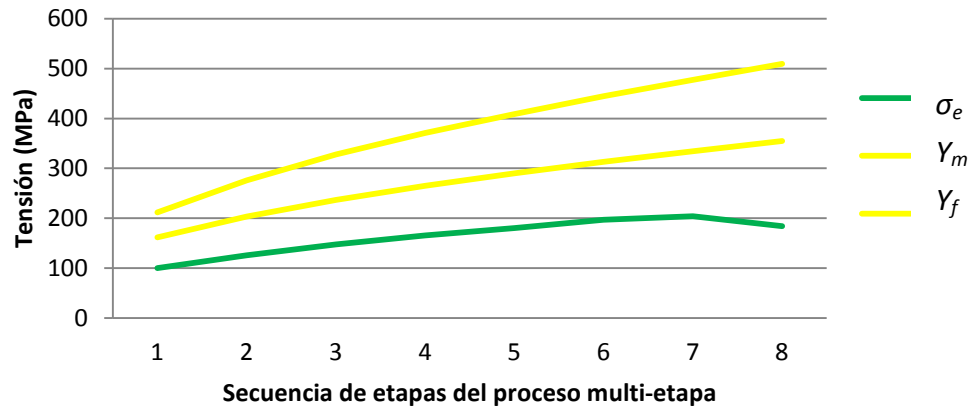


Figura 4.17 Tensiones de estirado del Cu- ETP para  $\mu=0,21$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en *PullWorks*.

➤ **Supuesto nº3: Proceso de estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5 \cdot d_f$ , considerando  $\mu=0,36$  y lubricado con grafito ( $\mu=0,14$ ),  $v_f= 0,078$  m/s para  $\Delta=2,40$ .**

Tabla 4.24 Secuencia de estirado del Cu-ETP para  $\mu=0,14$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en *PullWorks*.

Etapa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_f$ [mm]	3,20	2,85	2,54	2,26	2,01	1,79	1,59	1,42	1,30	-	-
$\epsilon_{\text{efectiva}}$	-	0,23	0,46	0,69	0,92	1,15	1,39	1,62	1,80	-	-
$r$	-	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,16	-	-
$\Delta$	-	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	3,16	-	-
<b>Recocido</b>	-	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	-	-

En la Tabla 4.24, se puede observar cómo la secuencia diseñada es exactamente la misma que la obtenida en el supuesto anterior, pese a haber mejorado la lubricación de las hileras aplicando un tipo de lubricante más eficiente. Este aspecto se debe a que la metodología de diseño de la secuencia no considera de manera directa la influencia del factor fricción que interviene en el proceso de estirado.

Tabla 4.25 Diseño tecnológico del trefilado Cu-ETP ( $\mu=0,14$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$ , *PullWorks*).

Etapa	$d_0$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$F$ [N]	$P$ [W]
<b>1</b>	3,20	2,85	0,062	0,078	161,50	211,44	87,81	560,15	43,69
<b>2</b>	2,85	2,54	0,062	0,078	203,54	276,18	110,22	558,51	43,56
<b>3</b>	2,54	2,26	0,062	0,078	236,88	327,53	129,52	519,58	40,53
<b>4</b>	2,26	2,01	0,062	0,078	265,05	370,92	145,29	461,03	35,96
<b>5</b>	2,01	1,79	0,062	0,078	289,77	408,99	157,63	396,68	30,94
<b>6</b>	1,79	1,59	0,062	0,078	313,06	444,86	172,86	343,22	26,77
<b>7</b>	1,59	1,42	0,062	0,078	334,08	477,22	178,69	282,99	22,07
<b>8</b>	1,42	1,30	0,065	0,078	354,90	509,28	160,85	213,50	16,65

Tabla 4.26 Componentes de  $\sigma_e$ , estirado de Cu-ETP ( $\mu=0,14$ ,  $v_f=0,078$  m/s,  $\Delta=2,40$ , PullWorks).

Etapa	$\sigma$ [MPa]	$\sigma_{bp}$ [MPa]	$\sigma_{di}$ [MPa]	$\sigma_{cal}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
1	67,43	0,00	17,47	2,91	87,81
2	84,54	0,00	22,02	3,66	110,22
3	99,63	0,00	25,63	4,26	129,52
4	111,85	0,00	28,68	4,77	145,29
5	121,07	0,00	31,35	5,22	157,63
6	133,35	0,00	33,87	5,64	172,86
7	136,54	0,00	36,14	6,01	178,69
8	116,07	0,00	38,40	6,39	160,85

La metodología desarrollada considera la influencia de la fricción existente en las superficies de contacto entre hilera y metal estirado, para el análisis de las condiciones tecnológicas inherentes al proceso diseñado. Este factor repercute indirectamente en cuanto al diseño de la secuencia de estaciones de recocido intermedio que se integran en la secuencia del proceso multi-etapa diseñado.

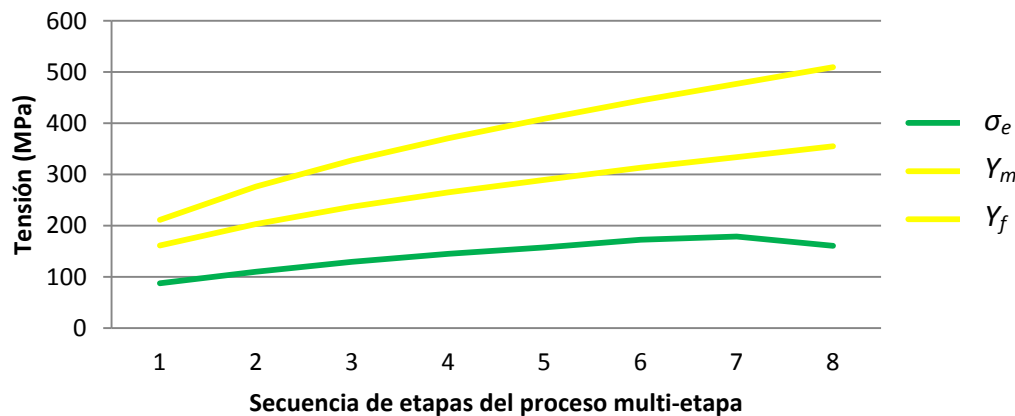


Figura 4.18 Tensiones de estirado del Cu-ETP,  $v_f=0,078$  m/s,  $\Delta=2,40$  y  $\mu=0,14$ .

En la Figura 4.18 se observa que el proceso de estirado multi-etapa diseñado va a trabajar de manera eficiente y sin riesgo de rotura del material. Esto es posible gracias a un diseño de la secuencia de etapas, en las que el valor de la fuerza aplicada para el estirado  $\sigma_e$  nunca alcanza los límites establecidos por la tensión de fluencia del material deformado, en ninguna de las ocho etapas que lo constituyen.

#### 4.2.4 Resultados de los análisis mediante la herramienta MEF, *Deform2D*

Para este análisis se ha empleado la herramienta *Deform2D* y se han supuesto las mismas condiciones y valores para las variables geométricas, las propiedades mecánicas del material y las condiciones de rozamiento consideradas en los tres procesos secuenciales diseñados en el apartado anterior.

➤ **Supuesto nº1: Proceso de estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $\mu=0,36$  en seco y a velocidad  $v_f=0,078$  m/s para un factor de forma  $\Delta=2,40$ .**

La Tabla 4.27 presenta los resultados obtenidos del análisis numérico realizado, etapa por etapa, para el proceso diseñado previamente en cada supuesto. Con este análisis se pretende conocer la distribución de deformaciones y tensiones en el metal durante el estirado en fase estacionaria, en todas las etapas del proceso multi-etapa diseñado.

Tabla 4.27 Resultados para el estirado del cobre C11000-O para  $\mu=0,36$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  con *Deform2D*.

Etapa	$d_o$ [mm]	$d_f$ [mm]	Rec.	$\epsilon_{\text{efect.máx.}}$	$\epsilon_{\text{efect. P1}}$	$\sigma_{\text{efect.P1}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{efect.máx.}}$ [MPa]	F [N]
1	3,20	2,85	SI	0,34	0,29	136	242	840
2	2,85	2,54	NO	0,62	0,52	177	313	870
3	2,54	2,26	NO	0,90	0,78	217	366	825
4	2,26	2,01	NO	1,20	1,06	285	417	880
5	2,01	1,79	NO	1,47	1,24	337	456	570
6	1,79	1,59	SI	0,33	0,29	160	242	250
7	1,59	1,42	NO	0,65	0,53	191	309	300
8	1,42	1,30	NO	0,87	0,72	207	355	325

Se ha seleccionado un punto cualquiera *P1* en la zona intermedia de la sección del hilo estirado, para monitorizar el valor medio aproximado de la deformación efectiva que presenta el metal una vez conformado plásticamente.

En la Figura 4.19 se puede ver una diferencia que presenta el valor de la deformación efectiva, en los diferentes puntos de la sección del producto estirado. Este aspecto es más acusado en la última de las etapas del proceso secuencial objeto de estudio, apreciándose un mayor grado de deformación en la zona superficial del hilo estirado y un menor grado de deformación cerca el eje o núcleo central del hilo.

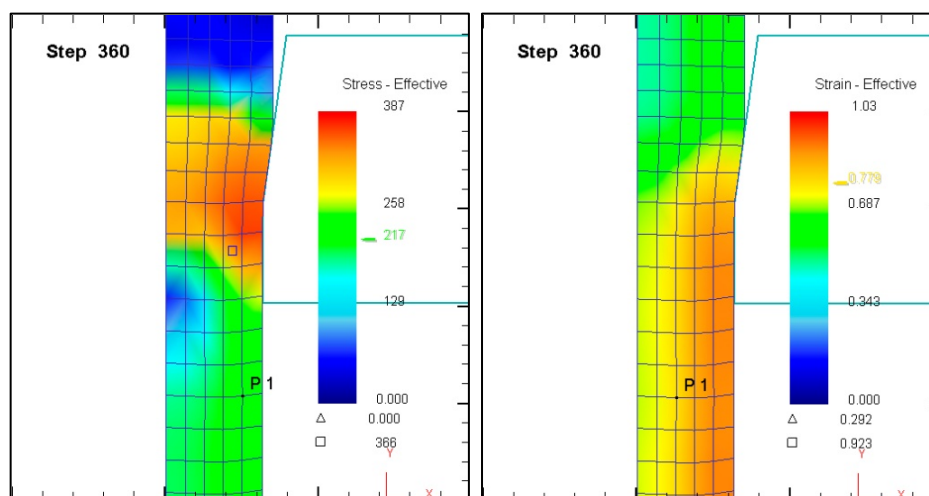


Figura 4.19 Tensiones y deformaciones obtenidas en *Deform2D* para la etapa 3ª del proceso secuencial de trefilado del cobre C11000-O para  $\mu=0,36$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$ .

Se observa un valor máximo de la tensión efectiva en la zona en la cual se produce la reducción de la sección, en el interior de la herramienta de estirado. Es en esta zona en la que se debe superar el valor de la tensión de fluencia media del metal procesado, siempre sin llegar a alcanzar el valor de la tensión límite de rotura de éste, para conseguir que el estirado sea posible sin producir la rotura del material.

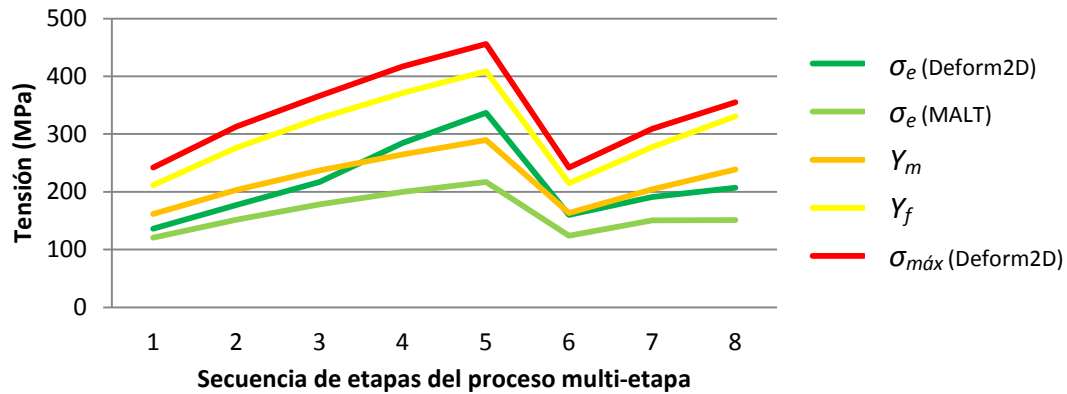


Figura 4.20 Tensiones obtenidas en *Deform2D*, estirado del cobre C11000-O para  $\mu=0,36$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$ .

El valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$ , en cada una de las etapas de la secuencia, se mantiene siempre por debajo del límite de fluencia  $Y_f$  del material estirado. En la gráfica de la Figura 4.20 se observa que, en las etapas cuarta y quinta, la tensión de estirado supera ligeramente el valor de la tensión límite de fluencia media  $Y_m$ .

Si observamos la evolución del valor de la carga  $F$  necesaria para el estirado, representada en la Figura 4.21 en función del desplazamiento lineal del material en la dirección del estirado, se puede afirmar que el valor de dicha carga alcanza su máximo cuando el proceso de estirado adquiere su velocidad de trabajo constante.

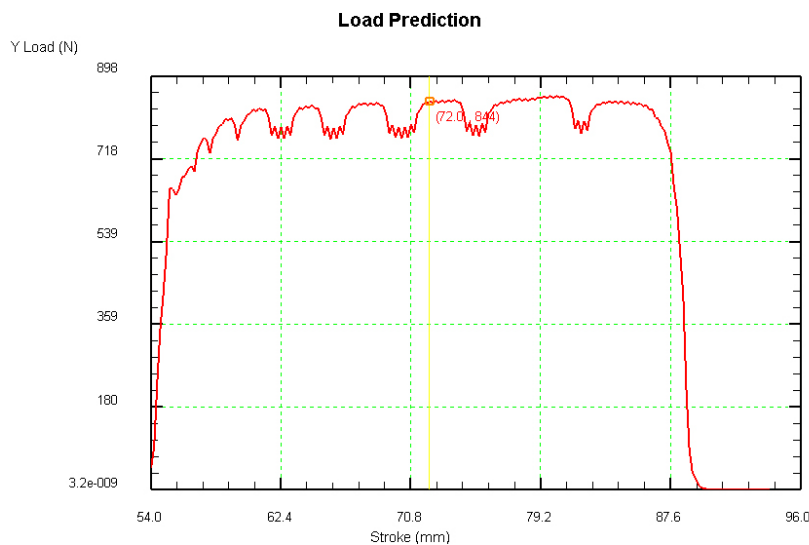


Figura 4.21 Carga de estirado vs desplazamiento, 3ª etapa estirado C11000-O para  $\mu=0,36$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  con *Deform2D*.

➤ **Supuesto nº2: Estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $\mu=0,36$  en la zona de contacto, lubricada con jabón ( $\mu=0,21$ ), velocidad  $v_f=0,078$  m/s para un factor de forma  $\Delta=2,40$ .**

Tabla 4.28 Resultados para el estirado del cobre C11000-O para  $\mu=0,21$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  con *Deform2D*.

Etapa	$d_0$ [mm]	$d_f$ [mm]	Rec.	$\epsilon_{\text{efect.máx.}}$	$\epsilon_{\text{efect.P1}}$	$\sigma_{\text{efect.P1}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{efect.máx.}}$ [MPa]	F [N]
1	3,20	2,85	SI	0,31	0,25	114	236	715
2	2,85	2,54	NO	0,62	0,54	170	310	827
3	2,54	2,26	NO	0,90	0,78	159	367	754
4	2,26	2,01	NO	1,19	1,07	214	415	687
5	2,01	1,79	NO	1,48	1,22	278	457	530
6	1,79	1,59	NO	1,79	1,46	181	501	386
7	1,59	1,42	NO	2,13	1,73	299	542	320
8	1,42	1,30	NO	2,33	1,94	409	569	250

Para este supuesto del estirado multi-etapa del cobre han sido modificadas las condiciones de rozamiento y lubricación, manteniendo el resto de variables y condiciones dinámicas del proceso de forma que, una vez consideradas las nuevas condiciones tribológicas y dinámicas en todas y cada una de las etapas de la secuencia, se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 4.28, obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con el software *Deform2D*.

La Figura 4.22 muestra que la última etapa de la secuencia de estirado diseñada presenta una diferencia significativa, tanto en el valor de la tensión efectiva de estirado necesaria como en el grado de deformación efectiva que adquiere el material del hilo de cobre estirado, desde el eje hasta la superficie del mismo.

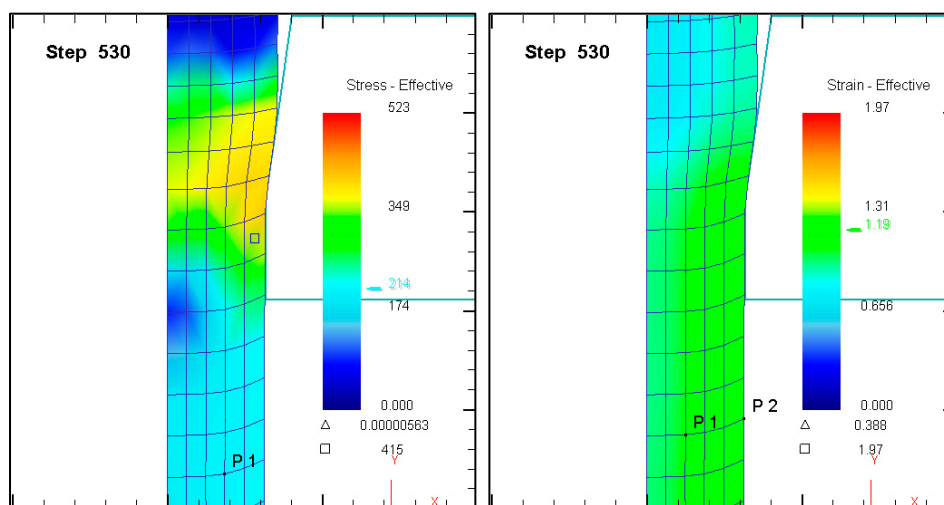


Figura 4.22 Tensiones y deformaciones obtenidas en *Deform2D* para la etapa 4ª del proceso secuencial de trefilado del Cu-ETP ( $\mu=0,21$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$ ).

La Figura 4.22 muestra que la última etapa de la secuencia de estirado diseñada presenta una diferencia significativa, tanto en el valor de la tensión efectiva de estirado necesaria como en el grado de deformación efectiva que adquiere el material del hilo de cobre estirado, desde el eje hasta la superficie del mismo.

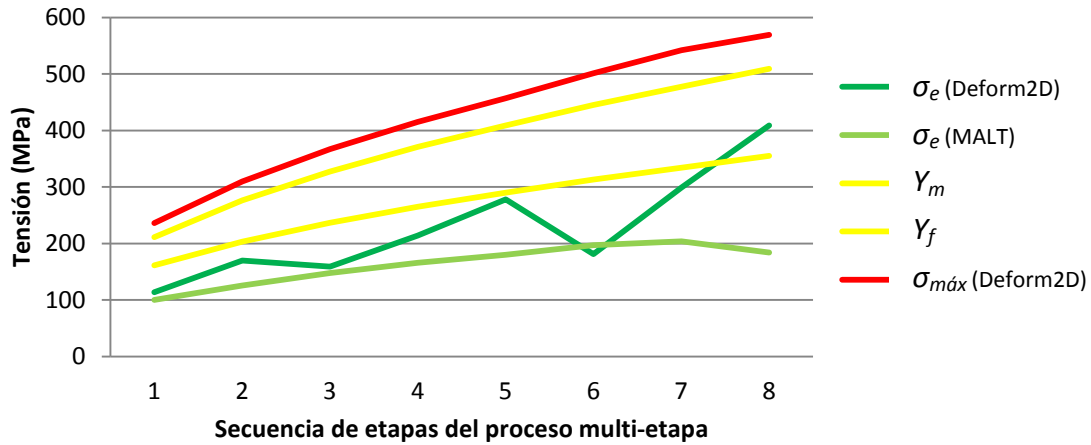


Figura 4.23 Tensiones obtenidas en *Deform2D*, estirado del cobre C11000-O para  $\mu=0,21$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  con *Deform2D*.

En la Figura 4.23 se aprecia que la última etapa, en la que el ratio de deformación plástica aplicado es notablemente inferior al aplicado en el resto de las etapas precedentes de la secuencia multi-etapa diseñada, presenta una reducción suave de sección y un mayor grado de deformación en la zona superficial del producto final estirado. Este hecho se traduce en una ligera disminución en el valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$  obtenida con *PullWorks* para la mencionada última etapa.

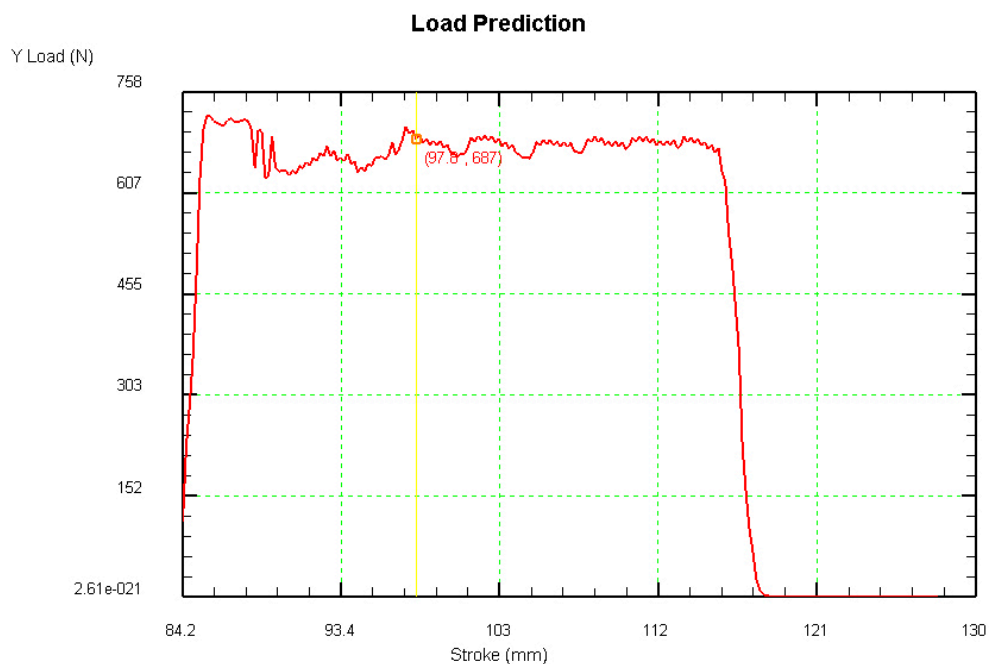


Figura 4.24 Carga de estirado vs desplazamiento, 4ª etapa estirado C11000-O para  $\mu=0,21$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$ .

## **Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa**

Los límites de fluencia establecidos por el valor de la tensión de fluencia del material estirado  $Y_f$  y la tensión de fluencia media  $Y_m$  en la zona de deformación no se ven superados por el valor obtenido para la tensión efectiva de estirado en el punto  $P1$  del material estirado, en ninguna de las etapas según las simulaciones correspondientes.

El gráfico de la Figura 4.24, en el que se representa la carga por unidad de desplazamiento necesaria en cada instante del estirado correspondiente a la 4ª etapa del proceso multi-etapa simulado, muestra la evolución de dicha carga de estirado desde el inicio del proceso hasta alcanzar la velocidad lineal constante. El valor de la carga se mantiene constante durante el proceso de estirado de toda la longitud del hilo. Es esta característica la que hace de este tipo de proceso de conformado por deformación plástica un proceso de carácter estacionario.

➤ **Supuesto nº3: Estirado secuencial considerando  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $\mu=0,36$  y lubricado con grafito ( $\mu=0,14$ ) a velocidad  $v_f=0,078$  m/s siendo  $\Delta=2,40$ .**

Para el siguiente proceso se optimizó el sistema de lubricación y se aplicó un lubricante más eficiente en la zona de contacto material-hilera, de forma que se ha conseguido reducir el coeficiente de rozamiento en la interfase de manera significativa, tal y como se puede apreciar en la reducción apreciada para el valor de la tensión de estirado en todas y cada una de las ocho etapas en las que se ha constituido el proceso de estirado secuencial multi-etapa, diseñado previamente mediante la aplicación de la metodología desarrollada.

En la Tabla 4.29 se presentan los resultados obtenidos a partir de las correspondientes simulaciones efectuadas con el software *Deform2D*, para cada una de las etapas del proceso secuencial objeto de análisis.

Tabla 4.29 Resultados para el estirado del cobre C11000-O para  $\mu=0,14$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  con *Deform2D*.

Etapa	$d_0$ [mm]	$d_f$ [mm]	Rec.	$\epsilon_{\text{efect.máx.}}$	$\epsilon_{\text{efect. P1}}$	$\sigma_{\text{efect.P1}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{efect.máx.}}$ [MPa]	$F$ [N]
1	3,20	2,85	SI	0,31	0,24	90	227	620
2	2,85	2,54	NO	0,59	0,49	118	305	606
3	2,54	2,26	NO	0,87	0,74	162	359	689
4	2,26	2,01	NO	1,18	1,01	167	411	557
5	2,01	1,79	NO	1,43	1,23	208	451	503
6	1,79	1,59	NO	1,74	1,48	272	494	400
7	1,59	1,42	NO	2,04	1,71	344	533	310
8	1,42	1,30	NO	2,32	1,87	319	564	210

En la Figura 4.25 se puede observar que tanto el valor de la tensión efectiva  $\sigma_e$  de estirado como el de la tensión máxima efectiva  $\sigma_{emáx.}$  en la zona de deformación incrementan su valor. Este incremento, producido a medida que se avanza en la

ejecución de la secuencia de etapas del proceso multi-etapa, es consecuencia del endurecimiento por deformación que acumula el metal a lo largo del mismo.

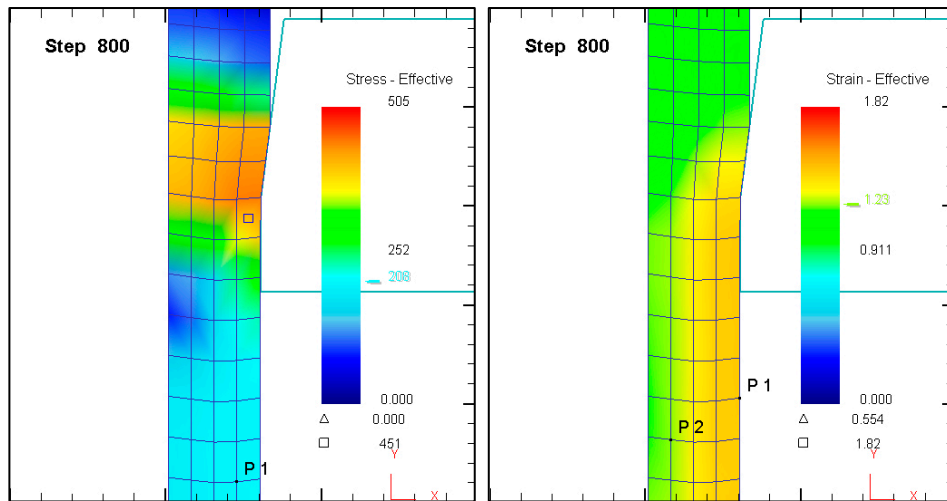


Figura 4.25 Tensiones y deformaciones obtenidas con *Deform2D* para la etapa 5ª (con recocido) en el proceso secuencial de trefilado del cobre C11000-O,  $\Delta=2,40$  y  $\mu=0,14$ .

La deformación efectiva se ve incrementada y se acumula progresivamente en el material estirado, según se realizan las etapas sucesivas que forman parte del proceso multi-etapa diseñado, ya que no se realiza recocido intermedio alguno.

En la gráfica de la Figura 4.26 se evidencia el hecho de que no se alcanza el límite de fluencia del material estirado en ninguna de sus etapas. Se observa una progresión progresiva en el valor de la tensión de estirado, valor que se mantiene próximo y por debajo del límite del proceso.

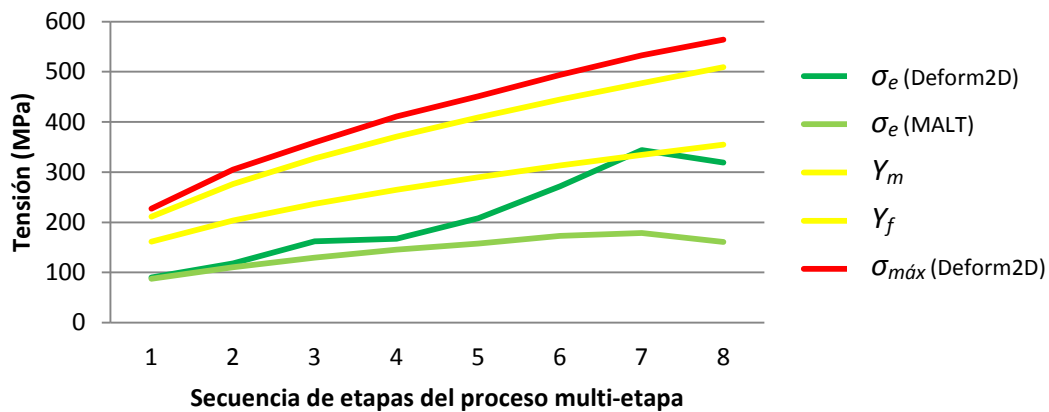


Figura 4.26 Tensiones obtenidas en *Deform2D*, estirado del cobre C11000-O,  $\Delta=2,40$ ,  $\mu=0,14$ .

Los valores obtenidos para la tensión de estirado con una y otra metodología son similares hasta que el producto va acumulando un mayor grado de deformación, a partir de la cuarta o quinta etapa. En las últimas etapas del proceso secuencial analizado se aprecia que los valores de la tensión de estirado obtenidos mediante el

método de los elementos finitos son claramente superiores a los obtenidos como resultado de la aplicación de la metodología propuesta, aunque la tendencia es similar en las dos progresiones representadas en la Figura 4.26.

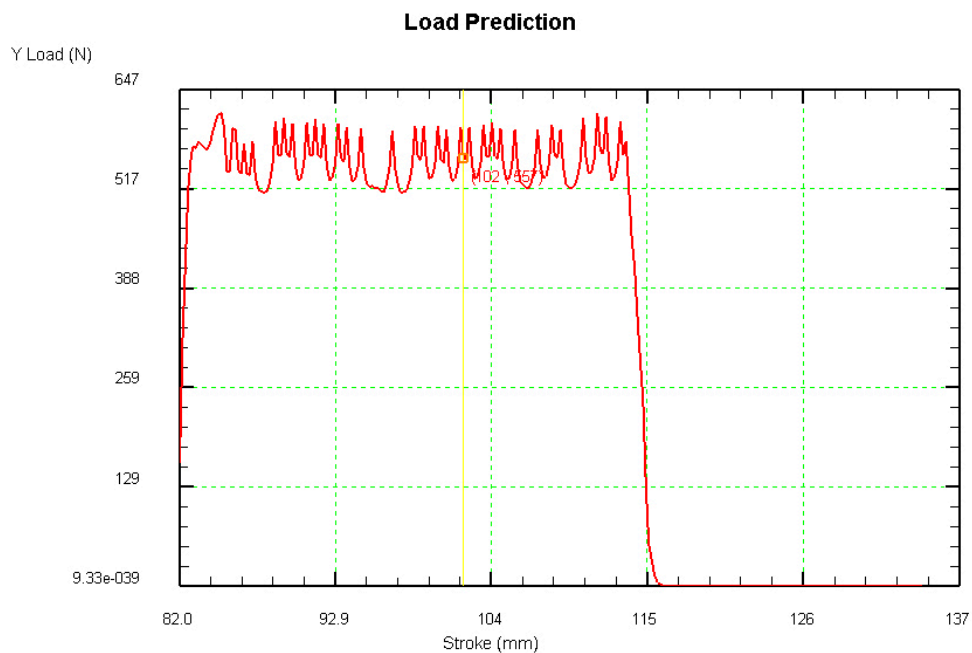


Figura 4.27 Carga de estirado vs desplazamiento, 4ª etapa estirado C11000-O,  $\Delta=2,40$ ,  $\mu=0,14$ .

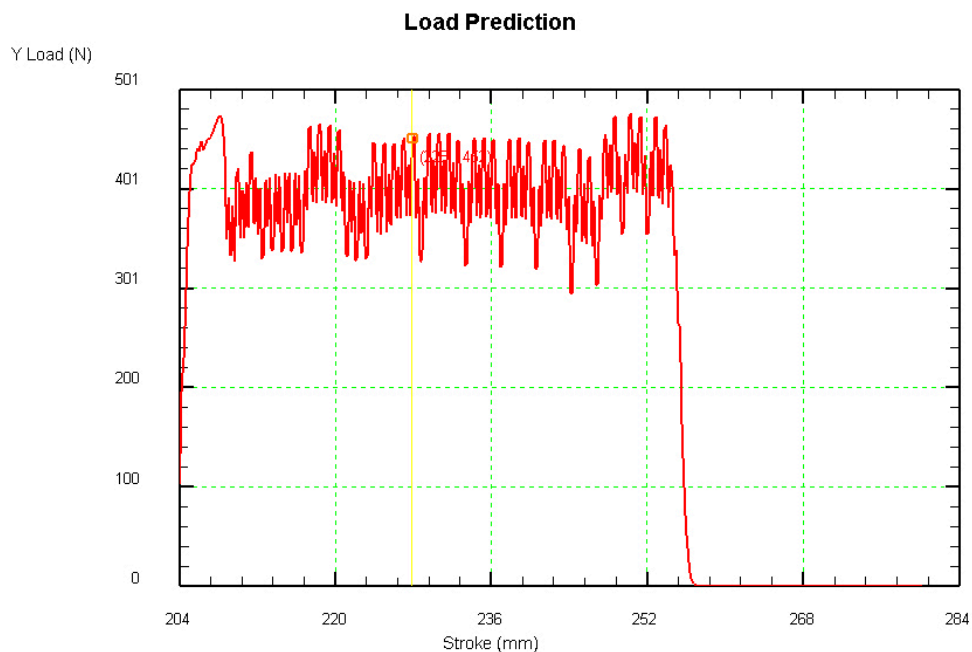


Figura 4.28 Carga de estirado vs desplazamiento, 5ª etapa del proceso de estirado secuencial del cobre C11000-O,  $\Delta=2,40$ ,  $\mu=0,14$ .

*Deform2D* ofrece el valor instantáneo de la carga de estirado a aplicada, en cada una de las etapas estudiadas. El valor de la carga es menor a medida que el proceso

secuencial avanza en las etapas consecutivas que lo constituyen, al ser la sección del producto estirado cada vez más pequeña.

Analizando la Figura 4.27, el valor de la carga o fuerza de estirado  $F$  se alcanza a partir del instante en el que el alambre se desplaza a la velocidad constante establecida para el proceso estacionario.

En la Figura 4.28, se puede apreciar que el valor de la carga o fuerza de estirado  $F$  ha disminuido en comparación con la representada en la gráfica de la etapa inmediatamente anterior.

#### **4.2.5 Discusión de los resultados obtenidos**

Un compendio de observaciones particulares, obtenidas a partir del estudio de los resultados de los análisis llevados a cabo para el estirado secuencial del cobre Cu-ETP, se expone a continuación:

- En todos los supuestos estudiados, al igual que en el proceso del documento de referencia [Lima-Filho, 2003], se ha diseñado una secuencia de estirado multi-etapa constituida en 8 etapas de estirado.
- La aplicación desarrollada, basada en el método analítico, indica el requerimiento de un recocido intermedio, al inicio de la sexta etapa de estirado, en el primero de los supuestos analizados, considerando el trabajo de estirado en seco.
- En los supuestos segundo y tercero, ambos procesos diseñados bajo diferentes condiciones de lubricación, los resultados indican que no es necesario recocido intermedio alguno.
- El diseño geométrico de las secuencias obtenidas mediante la aplicación propuesta, respetando el mismo valor observado en el estudio de referencia para el semi-ángulo de las hileras empleadas [Lima-Filho, 2003], es ligeramente distinto en la sucesión de reducciones de diámetro a aplicar durante la secuencia multi-etapa de estirado. Este hecho se debe a que la herramienta desarrollada determina la secuencia de etapas considerando un valor constante para el factor de forma  $\Delta$ , lo cual implica un valor constante en el ratio de reducción por etapa en toda las etapas del estirado multi-etapa diseñado.
- En el documento de referencia se ha realizado un estudio experimental, en el que el autor no indica los valores experimentales obtenidos para el coeficiente de rozamiento, los cuales se deben corresponder a las diferentes condiciones de lubricación analizadas. Se ha optado por realizar un estudio analítico a partir de datos para coeficiente de rozamiento en seco entre el cobre y el acero, tomados de la bibliografía [Rowe, 1972], estimando un valor mínimo  $\mu=0,36$ .

- Se confirma que, tanto deformación homogénea como fricción, son factores que tienen gran influencia en el proceso. Para este caso, y en los supuestos estudiados, tanto la influencia del trabajo adicional, causante de la inhomogeneidad en la deformación, como el efecto de la fricción en la zona de calibración de la hilera, tienen una influencia muchísimo menor en el valor final de la tensión total de estirado. No obstante, estos últimos términos son muy importantes para precisar el valor de dicha tensión con una mayor exactitud.
- En los tres supuestos analizados, bajo las mismas condiciones geométricas y tecnológicas, exceptuando el tipo de lubricante empleado, se observa que los valores de la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$ , arrojados por la aplicación *PullWorks*, no superan los límites establecidos en ninguno de los diseños, para ninguna de las etapas que los constituyen.
- Cada uno de los diseños de la secuencia del proceso de estirado multi-etapa realizados obedece inicialmente a la limitación geométrica establecida por un valor óptimo para el factor de forma  $\Delta$  de las hilera. Además, debe verificarse la condición en la que el estirado es factible: la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$  se mantiene siempre por debajo del límite de fluencia  $Y_f$  y el límite de rotura  $R_m$  del material estirado, límites que determinan la secuencia de recocidos "on-line" a incluir en el diseño de la secuencia proceso de estirado multi-etapa.
- Cuando  $\Delta$  aumenta su valor dentro del rango de valores aconsejable [Campos et al., 2005], se obtendrá una secuencia de etapas más larga que cuando  $\Delta$  se acerque a un valor mínimo dentro de dicho intervalo, para un mismo semi-ángulo de las hileras empleadas.
- Se ha fijado un valor para  $\Delta$  tal que la secuencia obtenida sea similar en número de etapas y ratio de deformación a aquella que se expone en el documento de referencia. A colación de los resultados obtenidos, se podría obtener una secuencia más corta (bajo un valor  $\Delta > 3$ ), aplicando mayor número de recocidos intermedios o reduciendo de alguna forma el efecto negativo de la fricción existente en la zona de contacto.
- Se observa que, a pesar de la mejora en las condiciones de rozamiento en los supuestos en los que se emplea lubricación, el diseño geométrico del proceso multi-etapa es idéntico en todos ellos. El criterio utilizado a la hora de establecer el diseño de la secuencia de etapas es estrictamente geométrico y se fundamenta en un valor óptimo para el factor de forma  $\Delta$  de las hileras empleadas, siendo el valor en este caso el mismo para todas y cada una de las etapas en los tres supuestos estudiados bajo diferentes condiciones de lubricación.

- La metodología propuesta e implementada en *PullWorks* arroja valores claramente inferiores para la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$  que aquellos obtenidos a partir de las simulaciones numéricas realizadas con *Deform2D*. Este aspecto se hace más notable en las etapas finales y en los tres procesos multi-etapa diseñados.

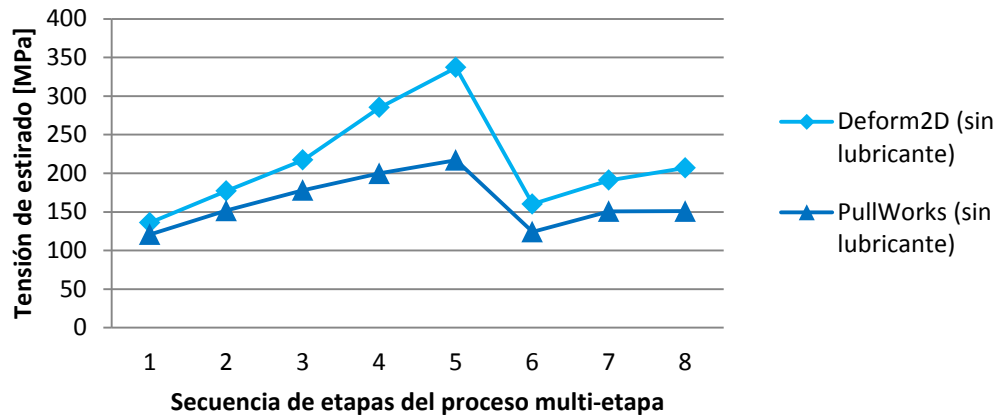


Figura 4.29 Evolución de la tensión de estirado del cobre C11000-O para  $\mu=0,36$ ,  $\nu_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  con *Deform2D* y *PullWorks*.

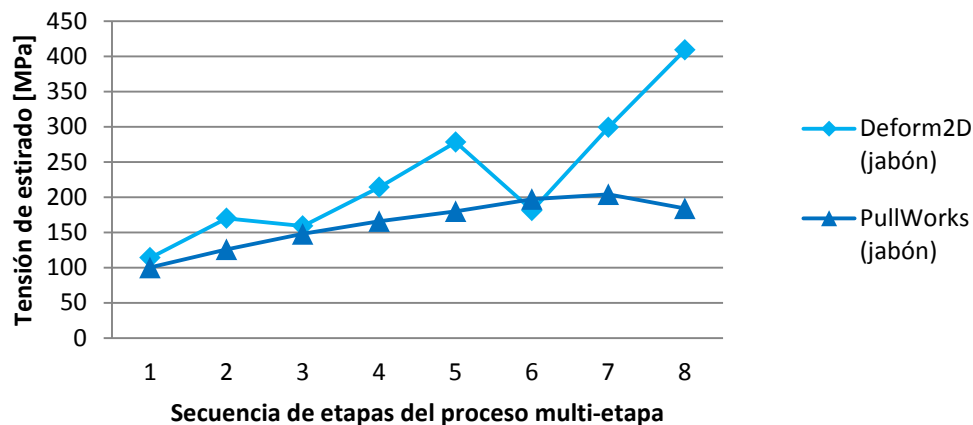


Figura 4.30 Evolución de la tensión de estirado del cobre C11000-O para  $\mu=0,21$ ,  $\nu_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  con *Deform2D* y *PullWorks*.

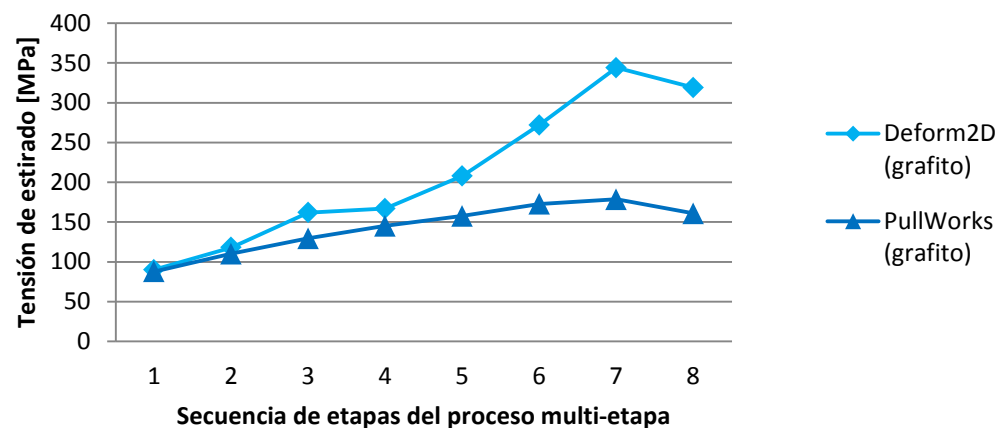


Figura 4.31 Evolución de la tensión de estirado del cobre C11000-O para  $\mu=0,14$ ,  $\nu_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  con *Deform2D* y *PullWorks*.

- En las gráficas (véase Figura 4.29, Figura 4.30 y Figura 4.31), se observa que los valores de la tensión efectiva de estirado obtenidos por el método numérico son superiores a los obtenidos con la aplicación *PullWorks*. Este hecho se hace más evidente cuando el coeficiente de rozamiento disminuye, sobre todo en las últimas etapas de las secuencias diseñadas y cuando no existen recidos intermedios.

Este efecto es la consecuencia directa del endurecimiento por deformación en frío y del rozamiento existente en la interfase. La influencia de este fenómeno no se muestra de la misma manera al utilizar los métodos analítico y numérico, de ahí esta diferencia de resultados.

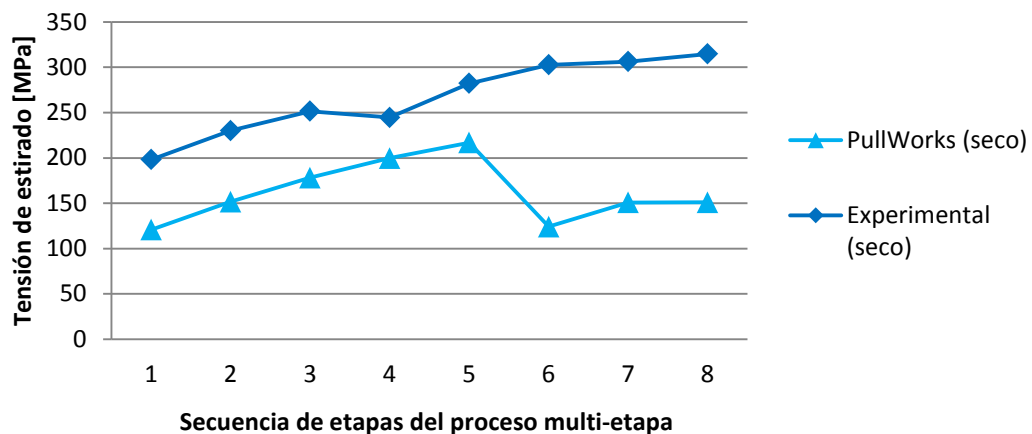


Figura 4.32 Comparativa de evolución de  $\sigma_e$  *PullWorks* vs experimental (cobre C11000-O,  $\mu=0,36$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$ ).

- Los valores obtenidos para la tensión de estirado  $\sigma_e$  con la aplicación desarrollada son, como se observa en la Figura 4.32, sensiblemente inferiores a los resultados experimentales del estudio de referencia, para todas las etapas y en todos los supuestos estudiados.

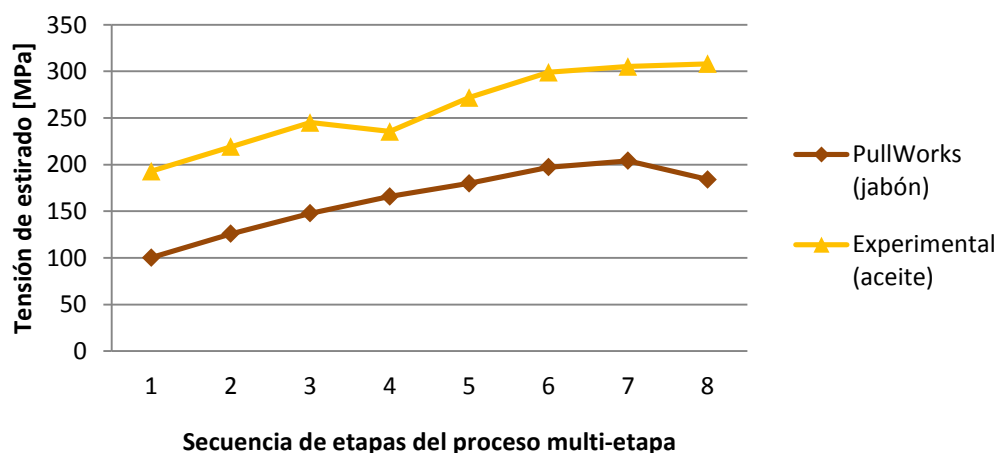


Figura 4.33 Comparativa de evolución de  $\sigma_e$  *PullWorks* vs experimental (cobre C11000-O,  $\mu=0,21$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$ ), lubricación distinta.

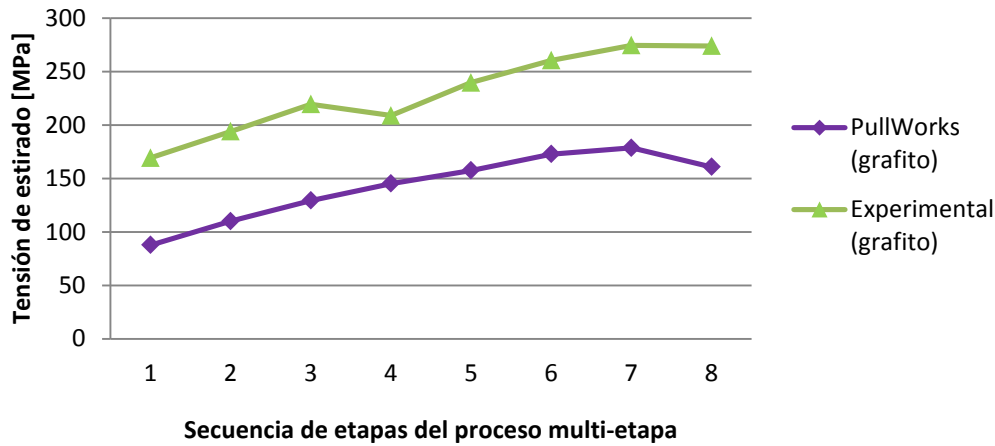


Figura 4.34 Comparativa de evolución de  $\sigma_e$  PullWorks vs experimental (cobre C11000-O,  $\mu=0,14$ ,  $v_f=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$ ).

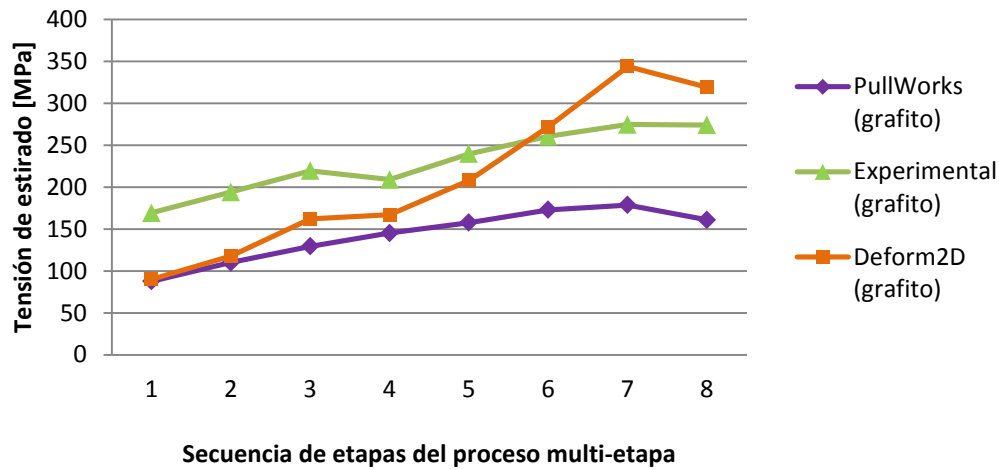


Figura 4.35 Evolución del valor de  $\sigma_e$  (cobre C11000-O, Deform2D vs experimental).

- Observando los valores de  $\sigma_e$ , representados en la Figura 4.34, gráfica en la cual se representa el caso de lubricación con grafito, se confirma que la herramienta desarrollada arroja valores siempre por debajo de los obtenidos por los métodos numérico y experimental.
- Para el tercer diseño se estimó un valor de  $\mu=0,14$  en la interfase. El valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$ , obtenido en las simulaciones del proceso de estirado secuencial multi-etapa diseñado, es muy similar a los correspondientes obtenidos en el estudio experimental de referencia [Lima-Filho, 2003] y presentados en la Tabla 4.17. Este tercer diseño es el más acorde al del documento de referencia.

### **4.3 Estudio y análisis del proceso de estirado de una barra de aluminio**

Se ha realizado el análisis del proceso de trefilado para obtener alambre a partir de alambrón de aluminio AW 7075-O, según la norma UNE por la que se conocen habitualmente las diferentes formas de aleación cuyo principal componente es el aluminio. Para este análisis se aplica el procedimiento metodológico desarrollado en la presente tesis, determinando el diseño del proceso secuencial de estirado y definiendo tecnológicamente las etapas del mismo.

#### **4.3.1 Caracterización de las condiciones inicio del proceso**

Las condiciones iniciales establecidas para el diseño del proceso son las siguientes:

- Tipo de proceso: Estirado.
- Material: Aluminio recocido, AW 7075-O
- Geometrías inicial-final del proceso de estirado:  $d_o = 8 \text{ mm} \rightarrow d_f = 1,5 \text{ mm}$ .
- Geometría de las hileras:  $\alpha_n = 8^\circ$ ,  $R_n = 1 \text{ mm}$ ,  $L_c = 0,50 \cdot d_f \text{ mm}$  (todas las etapas).
- Lubricación a base de aceite mineral,  $\mu = 0,10$ .
- Velocidad del proceso:  $v_f = 0,5 \text{ m/s}$ .

En la Tabla 4.30 y en la Tabla 4.31 se presentan las propiedades mecánicas y composición química del aluminio AW 7075-O:

Tabla 4.30 Propiedades mecánicas AW 7075-O, [ASM Intern. Handbook Committee, 1990].

Propiedad	Denominación	Valor
$E$	Módulo de Young	72000 [Mpa]
$Y$	Límite de fluencia	105 [Mpa]
$R_m$	Tensión de rotura	230 [Mpa]
$C$	Coeficiente de resistencia a la deformación	400 [Mpa]
$n$	Coeficiente de endurecimiento por deformación	0,17
$\mu$	Coeficiente de rozamiento en la interfase	0,05-0,50

Tabla 4.31 Composición química AL 7075-O, [ASM Intern. Handbook Committee, 1990].

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros
%	resto	0,4	0,5	1,2-2	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,2	0,15

#### **4.3.2 Justificación del estudio y análisis del trefilado del aluminio**

Este estudio, para el diseño y análisis del estirado secuencial multi-etapa de una barra de aluminio AW 7075-O, presenta un análisis similar al realizado por Sebastián [Sebastián, 2010]. En dicho documento, el autor enumera los diversos métodos analíticos aplicables al proceso de estirado y realiza el diseño de la secuencia de etapas necesarias para el estirado de este metal.

Tabla 4.32 Diseño de la secuencia con recocidos intermedios [Sebastián M. A., 2010].

<b>Etapas</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$d_f$ [mm]	8,00	4,50	2,50	1,50	-	-	-	-	-	-	-
$\Delta\epsilon$	-	1,148	1,17	1,02	-	-	-	-	-	-	-
$\epsilon$	-	1,148	1,17	1,02	-	-	-	-	-	-	-
$\alpha$ [°]	-	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-
$r$	-	0,683	0,691	0,64	-	-	-	-	-	-	-
$\Delta$	-	0,57	0,56	0,64	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4.33 Diseño de la secuencia sin recocidos intermedios [Sebastián M. A., 2010].

<b>Etapas</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$d_f$ [mm]	8,00	4,50	3,00	2,00	1,50	-	-	-	-	-	-
$\Delta\epsilon$	-	1,148	0,81	0,81	0,574	-	-	-	-	-	-
$\epsilon$	-	1,148	1,958	2,768	3,342	-	-	-	-	-	-
$\alpha$ [°]	-	10	10	10	10	-	-	-	-	-	-
$r$	-	0,683	0,555	0,555	0,437	-	-	-	-	-	-
$\Delta$	-	0,57	0,80	0,80	1,12	-	-	-	-	-	-

En la Tabla 4.32 y en la Tabla 4.33 se reflejan los resultados correspondientes al diseño obtenido para el proceso secuencial de estirado documento de referencia, determinado aplicando una metodología que considera únicamente la influencia de la deformación homogénea del material. El citado estudio presenta los resultados obtenidos bajo dos supuestos muy concretos: cuando se aplica recocido en todas las etapas y cuando no se aplica en ninguna de ellas.

Se puede apreciar que, en el supuesto en el que no existe recocido intermedio, se incrementa en una el número de etapas de la secuencia del proceso de estirado multi-etapa respecto al caso en el que si se realizan recocidos después todas las etapas de estirado. Esta condición afecta directamente al grado de deformación obtenido en el producto final, ya que en de estirado secuencial sin recocidos esta deformación se va acumulando a medida que se van aplicando las etapas sucesivas del proceso.

Es importante incidir en que en este método analítico no considera las condiciones de rozamiento y lubricación existentes en la interfase del proceso.

A continuación se estudian dos supuestos del estirado del aluminio, ambos con unas condiciones geométricas diferentes. De esta forma se diseñarán dos procesos muy distintos: una secuencia completa sin recocidos y otra que incluirá varios tratamientos de estabilización intermedios.

El estudio se ha realizado aplicando la metodología propuesta en esta tesis. Después se ha realizado un análisis aplicando el método de los elementos finitos a los diseños obtenidos, que permite evaluar estos diseños y hacer una valoración comparativa de los resultados obtenidos por ambos métodos.

**4.3.3 Resultados del análisis mediante la metodología propuesta**

En los dos supuestos estudiados se asumen unas condiciones tribológicas tales que el coeficiente de rozamiento por deslizamiento existente entre la hilera (diamante policristalino) y la barra estirada de aluminio va a tener un valor  $\mu=0,03\div 0,50$  [Cheng et al., 2015], que dependerá del tipo de lubricación empleado.

Este estudio nos va a permitir valorar las diferencias entre un proceso secuencial de estirado multi-etapa con un número mínimo de etapas y sin recocidos intermedios, frente a otro diseñado con varios recocidos en diferentes momentos de la secuencia.

➤ **Supuesto nº1: Estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $v_f=0,5$  m/s y lubricación con aceite mineral ( $\mu=0,10$ ) y considerando un factor de forma  $\Delta=2,75$  (Proceso sin recocidos intermedios).**

El diseño de la secuencia, con menor número de etapas posible obtenida, en función de las condiciones asumidas, se presenta en la Tabla 4.34:

Tabla 4.34 Diseño de la secuencia de estirado del AW 7075-O con *PullWorks* ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,75$ ).

<b>Etapa</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$d_f$ [mm]	8,00	7,23	6,53	5,90	5,33	4,82	4,36	3,94	3,56	3,22	2,91
$\epsilon_{\text{efectiva}}$	-	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
$r$	-	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
$\Delta$	-	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
<b>Recocido</b>	-	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
<b>Etapa</b>	-	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
$d_f$ [mm]	-	2,63	2,38	2,15	1,94	1,75	1,58	1,50	-	-	-
$\epsilon_{\text{efectiva}}$	-	2,20	2,40	2,60	2,81	3,02	3,22	3,32	-	-	-
$r$	-	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,10	-	-	-
$\Delta$	-	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	5,38	-	-	-
<b>Recocido</b>	-	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	-	-	-

Aplicando la combinación de condiciones geométricas y condiciones de fricción que se indican en el enunciado de este supuesto, para la aleación de aluminio que se desea estirar, se ha obtenido una secuencia de estirado de 17 etapas en la cual es posible prescindir de recocido intermedio alguno.

Para obtener este mínimo número de etapas sin recocidos intermedios, se ha optado por fijar un semi-ángulo  $\alpha=8^\circ$  en el cono de reducción de las hileras de estirado, además de un valor concreto para la longitud de calibración equivalente al 50% del diámetro de salida, de forma que  $L_c=0,50d_f$  en todas las etapas del proceso secuencial de estirado multi-etapa.

**Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa**

Tabla 4.35 Parámetros tecnológicos del estirado del AW 7075-O, *PullWorks* ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,75$ ).

Etapa	$d_o$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$F$ [N]	$P$ [W]
1	8,00	7,23	0,41	0,50	365,05	409,25	159,09	6531,66	3265,83
2	7,23	6,53	0,41	0,50	398,02	447,83	174,21	5834,27	2917,13
3	6,53	5,90	0,41	0,50	418,70	472,03	182,79	4997,50	2498,75
4	5,90	5,33	0,41	0,50	434,38	490,37	189,82	4235,43	2117,71
5	5,33	4,82	0,41	0,50	446,95	505,08	193,96	3539,15	1769,58
6	4,82	4,36	0,41	0,50	457,67	517,63	198,24	2959,77	1479,89
7	4,36	3,94	0,45	0,50	467,12	528,68	203,70	2483,61	1241,80
8	3,94	3,56	0,41	0,50	475,43	538,40	207,51	2065,52	1032,76
9	3,56	3,22	0,41	0,50	482,83	547,07	209,25	1704,00	852,00
10	3,22	2,91	0,41	0,50	489,72	555,12	213,47	1419,73	709,87
11	2,91	2,63	0,41	0,50	495,92	562,37	216,08	1173,88	586,94
12	2,63	2,38	0,41	0,50	501,74	569,18	216,70	964,08	482,04
13	2,38	2,15	0,41	0,50	507,27	575,65	221,72	804,97	402,49
14	2,15	1,94	0,41	0,50	512,42	581,68	225,71	667,20	333,60
15	1,94	1,75	0,41	0,50	517,46	587,58	228,38	549,33	274,66
16	1,75	1,58	0,41	0,50	522,17	593,09	229,10	449,19	224,60
17	1,58	1,50	0,45	0,50	526,35	597,98	149,82	264,75	132,38

Considerando  $v_f=0,5$  m/s para la velocidad a la salida en cada etapa de la secuencia discontinua que constituye este proceso de estirado, *PullWorks* ha permitido obtener los valores de los parámetros tecnológicos que definen cada etapa en este proceso, que se presentan en la Tabla 4.35.

Tabla 4.36 Componentes de  $\sigma_e$  en el estirado del AW 7075-O, *PullWorks* ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,75$ ).

Etapa	$\sigma_{dh+roz}$ [MPa]	$\sigma_{bp}$ [MPa]	$\sigma_{di}$ [MPa]	$\sigma_{cal}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
1	117,78	0,00	39,49	1,83	159,09
2	129,16	0,00	43,06	1,99	174,21
3	135,40	0,00	45,30	2,09	182,79
4	140,66	0,00	46,99	2,17	189,82
5	143,37	0,00	48,35	2,23	193,96
6	146,44	0,00	49,52	2,29	198,24
7	150,83	0,00	50,54	2,34	203,70
8	153,70	0,00	51,44	2,38	207,51
9	154,60	0,00	52,24	2,41	209,25
10	158,04	0,00	52,98	2,45	213,47
11	159,95	0,00	53,65	2,48	216,08
12	159,91	0,00	54,28	2,51	216,70
13	164,31	0,00	54,88	2,54	221,72
14	167,72	0,00	55,44	2,56	225,71
15	169,81	0,00	55,98	2,59	228,38
16	170,00	0,00	56,49	2,61	229,10
17	90,24	0,00	56,95	2,63	149,82

La Tabla 4.36 muestra un desglose de los valores de las diferentes componentes de la tensión de estirado  $\sigma_e$ , resultados ofrecidos por la aplicación *PullWorks*.

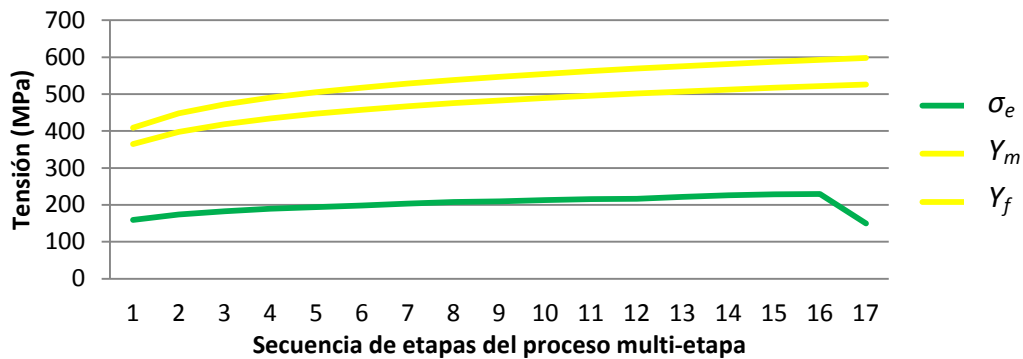


Figura 4.36 Tensiones de estirado para el AW 7075-O con *PullWorks* ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,75$ ).

En la Figura 4.36 se ve que la tensión de estirado  $\sigma_e$ , en todas las etapas de la secuencia diseñada, alcanza un valor muy estable y en torno a los 200 MPa, exceptuando la última etapa en la cual el ratio de reducción aplicado es menor y en la que, en consecuencia, el valor de la tensión de estirado ha disminuido.

Este proceso de estirado multi-etapa es técnicamente viable bajo las condiciones establecidas en la metodología aplicada para su diseño ya que se ha comprobado que en ninguna de las 17 etapas se ha llegado a alcanzar o superar el valor de la tensión de rotura del material procesado.

➤ **Supuesto nº2: Estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $v_f=0,5$  m/s y lubricación con aceite mineral ( $\mu=0,10$ ) y considerando un factor de forma  $\Delta=2,30$  (Proceso con recocido intermedio cada 5 etapas).**

El diseño de la secuencia obtenida con la ayuda de la aplicación informática *PullWorks* se presenta en la Tabla 4.37:

Tabla 4.37 Diseño de la secuencia de estirado del AW 7075-O con *PullWorks* ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,30$ ).

Etapa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_f$ [mm]	8,00	7,09	6,28	5,56	4,93	4,37	3,87	3,43	3,04	2,69	2,38
$\epsilon_{\text{efectiva}}$	-	0,24	0,48	0,72	0,96	1,20	0,24	0,48	0,72	0,96	1,20
$r$	-	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21	0,22	0,21	0,21	0,22	0,22
$\Delta$	-	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30
<b>Recocido</b>	-	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO
Etapa	-	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$d_f$ [mm]	-	2,11	1,87	1,66	1,50	-	-	-	-	-	-
$\epsilon_{\text{efectiva}}$	-	0,24	0,48	0,72	0,92	-	-	-	-	-	-
$r$	-	0,21	0,21	0,21	0,18	-	-	-	-	-	-
$\Delta$	-	2,30	2,30	2,30	2,76	-	-	-	-	-	-
<b>Recocido</b>	-	SI	NO	NO	NO	-	-	-	-	-	-

Considerando las nuevas condiciones geométricas y de fricción del proceso estudiado se ha conseguido reducir la secuencia de estirado hasta las 14 etapas, incluyendo una estación de recocido intermedio “on-line” cada 5 etapas.

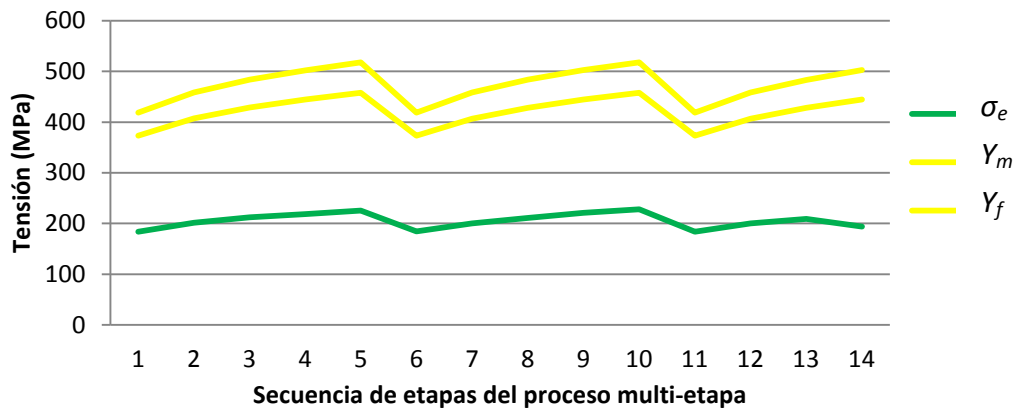


Figura 4.37 Tensiones de estirado para el AW 7075-O con *PullWorks* ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,30$ ).

En la gráfica de la Figura 4.37, se aprecia que los tres recocidos intermedios producen una mejora en la deformabilidad del material y, en consecuencia, ha sido posible la reducción del número de etapas del proceso secuencial de estirado.

Considerando 0,5 m/s para la velocidad de salida de cada etapa, se han obtenido una serie de resultados para los valores de todos y cada uno de los diferentes parámetros tecnológicos, para cada una de las etapas del proceso diseñado. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.38.

La Tabla 4.39 presenta un desglose de los valores de las diferentes componentes de  $\sigma_e$ , desglose obtenido mediante la aplicación informática desarrollada.

Tabla 4.38 Parámetros tecnológicos del estirado del AW 7075-O, *PullWorks* ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,30$ ).

Etapa	$d_o$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$F$ [N]	$P$ [W]
1	8,00	7,09	0,39	0,50	373,23	418,83	184,00	7264,24	3632,12
2	7,09	6,28	0,39	0,50	407,06	458,41	201,33	6236,07	3118,03
3	6,28	5,56	0,39	0,50	428,58	483,59	212,54	5160,26	2580,13
4	5,56	4,93	0,41	0,50	444,55	502,27	218,52	4171,25	2085,63
5	4,93	4,37	0,39	0,50	457,70	517,66	225,40	3380,69	1690,35
6	4,37	3,87	0,39	0,50	373,23	418,83	184,80	2173,83	1086,91
7	3,87	3,43	0,39	0,50	406,92	458,25	200,53	1852,95	926,48
8	3,43	3,04	0,39	0,50	428,42	483,40	211,14	1532,49	766,25
9	3,04	2,69	0,39	0,50	444,79	502,56	221,27	1257,54	628,77
10	2,69	2,38	0,39	0,50	457,89	517,88	227,95	1014,10	507,05
11	2,38	2,11	0,39	0,50	373,23	418,83	183,63	642,08	321,04
12	2,11	1,87	0,39	0,50	406,94	458,27	200,60	550,95	275,47
13	1,87	1,66	0,39	0,50	428,18	483,12	209,06	452,46	226,23
14	1,66	1,50	0,41	0,50	444,70	502,45	194,01	342,84	171,42

Tabla 4.39 Componentes de  $\sigma_e$  en el estirado del AW 7075-O, *PullWorks* ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,30$ ).

<b>Etapas</b>	<b><math>\sigma_{dh+roz}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{bp}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{di}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{cal}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_e</math> [MPa]</b>
<b>1</b>	141,75	0,00	40,38	1,87	184,00
<b>2</b>	155,25	0,00	44,04	2,04	201,33
<b>3</b>	164,02	0,00	46,37	2,14	212,54
<b>4</b>	168,20	0,00	48,09	2,22	218,52
<b>5</b>	173,59	0,00	49,52	2,29	225,40
<b>6</b>	142,56	0,00	40,38	1,87	184,80
<b>7</b>	154,47	0,00	44,02	2,03	200,53
<b>8</b>	162,64	0,00	46,35	2,14	211,14
<b>9</b>	170,93	0,00	48,12	2,22	221,27
<b>10</b>	176,12	0,00	49,54	2,29	227,95
<b>11</b>	141,38	0,00	40,38	1,87	183,63
<b>12</b>	154,54	0,00	44,03	2,03	200,60
<b>13</b>	160,60	0,00	46,32	2,14	209,06
<b>14</b>	143,67	0,00	48,11	2,22	194,01

La viabilidad del proceso queda contrastada, ya que en ningún momento se trabaja por encima de las condiciones que permite el metal. Se aplica tratamiento de recocido al producto estirado cada vez que es necesario, con el objeto de restaurar su ductilidad y deformabilidad para evitar la posible rotura como consecuencia del endurecimiento excesivo consecuencia de la deformación en frío aplicada.

#### **4.3.4 Resultados del análisis mediante la herramienta MEF, *Deform2D***

A continuación se presenta el estudio y análisis, realizado con ayuda de la aplicación de análisis numérico *Deform2D*, para los dos supuestos correspondientes al proceso secuencial de estirado de aluminio diseñados mediante la metodología propuesta.

Ambos supuestos se diseñaron a partir de condiciones en las que la principal diferencia está en el valor del factor de forma  $\Delta$ , factor que condiciona el valor del ratio de reducción aplicado por etapa.

El sistema experto *PullWorks* permitió conocer, en los dos procesos diseñados, en cuál de las etapas de la secuencia calculada se debe aplicar recocido con el fin de evitar la rotura del material estirado. En un primer caso de 14 etapas ha sido necesario tener en cuenta dos recocido intermedios “on-line”, los cuales se han debido realizar al inicio de las etapas sexta y decimoprimera. El estado recocido ha sido considerado a la hora de realizar estas dos etapas.

Para establecer las condiciones de simulación en las etapas en las cuales no se necesita recocido previo, se ha considerado de alguna forma el estado de deformación acumulada en el metal al inicio de cada una de éstas.

➤ **Supuesto nº1: Estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $v_f=0,5$  m/s y lubricación con aceite mineral ( $\mu=0,10$ ) y considerando un factor de forma  $\Delta=2,75$  (Proceso sin recocidos intermedios).**

Una vez simuladas las diecisiete etapas que se obtuvieron para el diseño del proceso secuencial de estirado, bajo las condiciones descritas, se ha podido comprobar que el estirado es perfectamente viable en ellas.

La simulación del proceso, partiendo de la geometría inicial, ha consistido en fijar las condiciones geométricas y realizar virtualmente con el software *Deform2D* el estirado en las diecisiete etapas que constituyen el proceso diseñado, sin aplicar recocido en ningún momento del mismo.

En la Tabla 4.40 se presentan los resultados obtenidos. Estos resultados son los correspondientes al valor de la tensión en los diferentes puntos del metal, durante y a la salida del proceso, así como la distribución de deformaciones en el mismo a la salida de cada etapa del proceso multi-etapa diseñado.

Los resultados de las simulaciones, recogidos en la mencionada tabla, muestran que el valor de la tensión de estirado se mantiene bastante estable en toda la secuencia. Este hecho se da como consecuencia de la condición geométrica que se ha impuesto de inicio, condición que consiste en fijar un valor constante para el factor de forma  $\Delta$  de la hilera de estirado, en todas las etapas del proceso multi-etapa.

Tabla 4.40 Resultados para el estirado del AW 7075-O con *Deform2D* para  $\Delta=2,75$ ,  $\mu=0,10$ .

<b>Etap</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>d_f</math> [mm]</b>	<b>Rec.</b>	<b><math>\epsilon_{\text{efect.máx.}}</math></b>	<b><math>\epsilon_{\text{efect. P1}}</math></b>	<b><math>\sigma_{\text{efect.P1}}</math>[MPa]</b>	<b><math>\sigma_{\text{efect.máx.}}</math>[MPa]</b>	<b>F [N]</b>
<b>1</b>	8,00	7,23	SI	0,34	0,25	165	431	6580
<b>2</b>	7,23	6,53	NO	0,57	0,50	175	470	6150
<b>3</b>	6,53	5,90	NO	0,83	0,75	218	497	5720
<b>4</b>	5,90	5,33	NO	1,09	1,01	206	516	4390
<b>5</b>	5,33	4,82	NO	1,37	1,23	218	532	3550
<b>6</b>	4,82	4,36	NO	1,68	1,46	185	547	3370
<b>7</b>	4,36	3,94	NO	1,95	1,69	192	556	2260
<b>8</b>	3,94	3,56	NO	2,20	1,90	226	563	2120
<b>9</b>	3,56	3,22	NO	2,49	2,13	250	575	1700
<b>10</b>	3,22	2,91	NO	2,80	2,42	209	582	1420
<b>11</b>	2,91	2,63	NO	3,10	2,61	229	590	1100
<b>12</b>	2,63	2,38	NO	2,45	2,43	209	571	970
<b>13</b>	2,38	2,15	NO	2,77	2,74	223	579	880
<b>14</b>	2,15	1,94	NO	3,00	2,95	224	587	696
<b>15</b>	1,94	1,75	NO	3,18	3,19	280	596	590
<b>16</b>	1,75	1,58	NO	3,37	3,42	190	602	436
<b>17</b>	1,58	1,50	NO	3,45	3,42	180	599	305

Cabe señalar que la herramienta de simulación *Deform2D* ha dado bastantes problemas con la estructura de la malla y el remallado automático, al ir guardando los sucesivos resultados en cada una de las etapas para ser utilizados en las subsiguientes como material de partida. Este aspecto pone en evidencia las limitaciones del programa *Deform2D* para el caso de procesos con secuencias demasiado largas. Para solventar este problema, se ha aplicado un procedimiento diferente a partir de la 11ª etapa, con el fin de poder salvar los inconvenientes surgidos en las simulaciones. Este consiste en partir de una malla nueva para cada etapa asumiendo para el valor medio de la deformación observada en el material a la salida de la etapa inmediatamente anterior, de forma que sea posible continuar con las simulaciones y conocer la deformación final acumulada. Esto hace que, a partir de la 11ª etapa la distribución de deformaciones en la sección del alambre sea muy uniforme (véase Tabla 4.40).

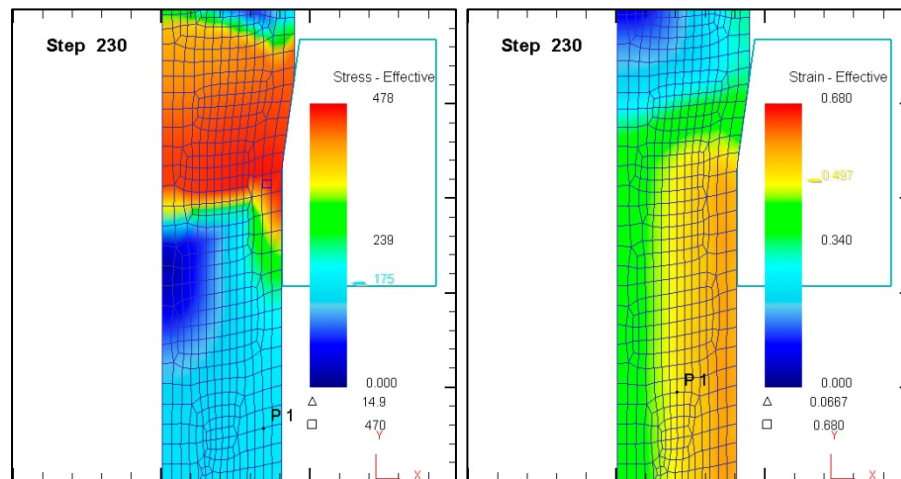


Figura 4.38 Tensiones y deformaciones obtenidas en *Deform2D* para la etapa 2ª del proceso secuencial de estirado del aluminio AW 7075-O para  $\Delta=2,75$ ,  $\mu=0,10$ .

La distribución de deformaciones no es homogénea en toda la sección del producto estirado y se observa, para la geometría de hilera utilizada, un valor máximo de la deformación efectiva en la zona más cercana a la superficie del producto estirado. Este hecho implica un mayor endurecimiento del metal en dicha zona.

En la Figura 4.38, obtenida en el post-procesador del software *Deform2D*, se puede observar la distribución de tensiones en la segunda etapa del proceso secuencial multi-etapa diseñado. Se evidencia que el valor máximo de la tensión se produce en el interior de la hilera de estirado y cerca de la superficie de contacto entre la hilera y metal estirado, zona en la que se produce el conformado plástico del metal en el proceso de estirado.

En la Figura 4.39 se representa la evolución del valor de la fuerza o carga efectiva de estirado  $F$  correspondiente a la segunda etapa del proceso diseñado. Se puede ver que se alcanza un valor máximo relativamente estable en todo el proceso estacionario, ya que la velocidad de salida del alambre es constante.

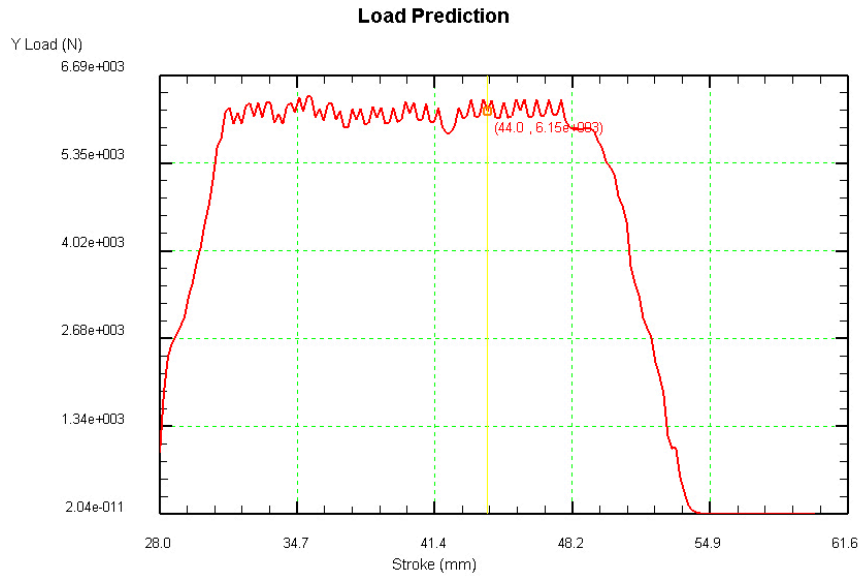


Figura 4.39 Carga vs desplazamiento, 2ª etapa estirado AW 7075-O ( $\Delta=2,75$ ,  $\mu=0,10$ ).

➤ **Supuesto nº2: Estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $v_f=0,5$  m/s y lubricación con aceite mineral ( $\mu=0,10$ ) y considerando un factor de forma  $\Delta=2,30$  (Proceso con recocido intermedio cada 5 etapas).**

En este segundo supuesto se ha obtenido idéntico diseño para la secuencia que en el anterior. Sin embargo, se han aplicado unas condiciones geométricas tales que han permitido reducir el número de etapas de la secuencia completa, incluyendo varios recocidos intermedios en la misma.

Se pretende conocer diferencias, ventajas e inconvenientes de un proceso secuencial idéntico en cuanto al material inicial y el producto final, desde un enfoque puramente geométrico, con y sin tratamientos de recocido.

Tabla 4.41 Resultados para el estirado del AW 7075-O con *Deform2D*, ( $\Delta=2,30$ ,  $\mu=0,10$ ).

Etapa	$d_0$ [mm]	$d_f$ [mm]	Rec.	$\epsilon_{efect.m\acute{a}x.}$	$\epsilon_{efect.P1}$	$\sigma_{efect.P1}$ [MPa]	$\sigma_{efect.m\acute{a}x.}$ [MPa]	$F$ [N]
1	8,00	7,09	SI	0,33	0,27	190	437	7180
2	7,09	6,28	NO	0,64	0,57	201	477	6350
3	6,28	5,56	NO	0,95	0,85	220	503	5540
4	5,56	4,93	NO	1,30	1,13	215	522	4330
5	4,93	4,37	NO	1,59	1,37	248	538	3570
6	4,37	3,87	SI	0,32	0,28	177	433	2060
7	3,87	3,43	NO	0,64	0,57	215	475	1970
8	3,43	3,04	NO	0,92	0,83	217	500	1570
9	3,04	2,69	NO	1,21	1,09	206	518	1170
10	2,69	2,38	NO	1,52	1,38	239	535	1040
11	2,38	2,11	SI	0,31	0,28	171	442	638
12	2,11	1,87	NO	0,59	0,55	163	475	528
13	1,87	1,66	NO	0,89	0,83	202	501	448
14	1,66	1,50	NO	1,19	1,06	154	514	319

En la Tabla 4.41 se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas, para cada etapa del proceso secuencial de estirado multi-etapa diseñado previamente, mediante la aplicación *Deform2D*.

Se observa que, bajo las condiciones impuestas de inicio, se ha obtenido una secuencia de etapas en la cual se intercalan varias estaciones de recocido intermedio “on-line”. Para realizar las correspondientes simulaciones, se ha considerado este aspecto, definiendo el metal en estado recocido con aquellas propiedades mecánicas definidas al inicio del proceso, para las etapas primera, sexta y decimoprimera.

En la Figura 4.40 se puede observar la distribución de tensiones existente en la sección transversal del producto cilíndrico estirado, correspondiente a la cuarta etapa realizada a partir de un estado inicial recocido en la primera etapa. Se observa que el valor de la tensión se produce en la zona de deformación, en el interior de la hilera, superando el límite de fluencia del metal que entra en dicha zona.

Además, observando la distribución de deformaciones existente, se aprecia falta de homogeneidad en toda la sección transversal, más acusada en las etapas justo antes de recocer. La deformación máxima se produce en la zona más cercana a la superficie del producto una vez ha sido deformado por estirado.

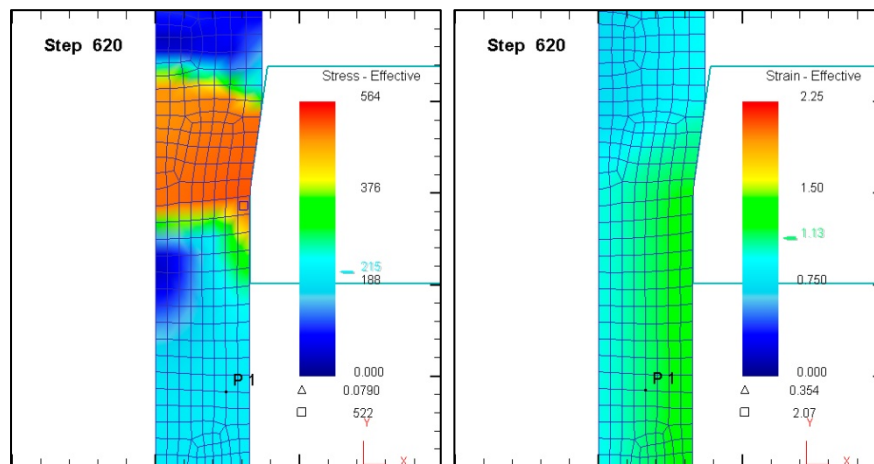


Figura 4.40 Tensiones y deformaciones obtenidas en *Deform2D* para la etapa 4ª del proceso secuencial de estirado del aluminio AW 7075-O, ( $\Delta=2,30$ ,  $\mu=0,10$ ).

En la Figura 4.41, se observan los valores que se han obtenido para la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$  a la salida de la hilera en la 6ª etapa de la secuencia, la tensión máxima en la zona de deformación  $\sigma_{em\acute{a}x.}$ , así como el valor medio de la deformación efectiva acumulada en el producto estirado a la salida de la hilera en dicha etapa, en la cual el metal entra en estado recocido. Se puede apreciar que los valores de ambas tensiones y de la deformación acumulada se ven reducidos, respecto a los obtenidos en las etapas inmediatamente anteriores, gracias al efecto del tratamiento térmico.

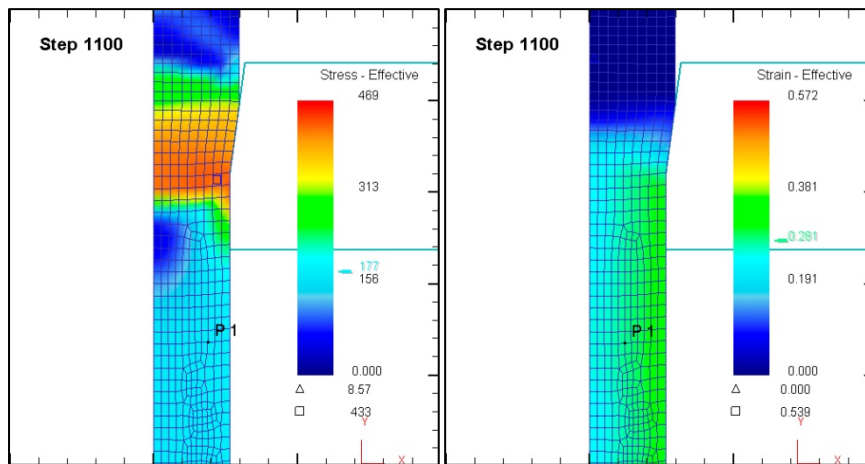


Figura 4.41 Tensiones-deformaciones obtenidas en *Deform2D* para la etapa 6ª, tras recocido, en el proceso secuencial de estirado del aluminio AW 7075-O ( $\Delta=2,30$ ,  $\mu=0,10$ ).

Para este proceso secuencial de estirado multi-etapa, será imprescindible un tratamiento de recocido intermedio cada 5 etapas para devolver el material a su estado de mayor ductilidad. Esta característica ha permitido reducir el número de pasadas o etapas de estirado de 17 a 14 respecto al mismo proceso sin recocidos, aunque para ello ha sido necesaria la inclusión de 2 operaciones de recocido intermedio en este proceso secuencial discontinuo de estirado.

La necesidad de incluir dos operaciones de recocido intermedio en un proceso de estas características va a encarecer el proceso. Se debe considerar que la energía consumida por un horno de recocido es mucho mayor a la que consume un banco de estirado para realizar las tres etapas adicionales que incluye el diseño del proceso secuencial sin recocidos.

En cuanto al tiempo necesario, en uno y otro caso, probablemente será más rápido y por tanto más eficiente realizar 3 etapas adicionales, tal como indica el diseño de 17 etapas, que aplicar los 2 recocidos intermedios que necesitaría el diseño de 14 etapas.

En la gráfica obtenida tras el post-procesado de la 4ª etapa de la secuencia objeto de estudio, a partir de la simulación correspondiente representada en la Figura 4.42, se realiza la lectura del valor de la carga o fuerza de estirado frente al desplazamiento en cada instante del proceso individual en dicha etapa.

El valor máximo de la fuerza necesaria para el estirado  $F$  se alcanza cuando el proceso adquiere su velocidad de trabajo. Esta característica es la que hace que este proceso tenga un carácter estacionario, de manera que su estado es constante en cualquier instante. En la figura anterior se puede observar cómo la estacionariedad del proceso de estirado se da prácticamente entre los 100 y los 130 milímetros del desplazamiento correspondiente a la longitud del tramo de alambre simulado.

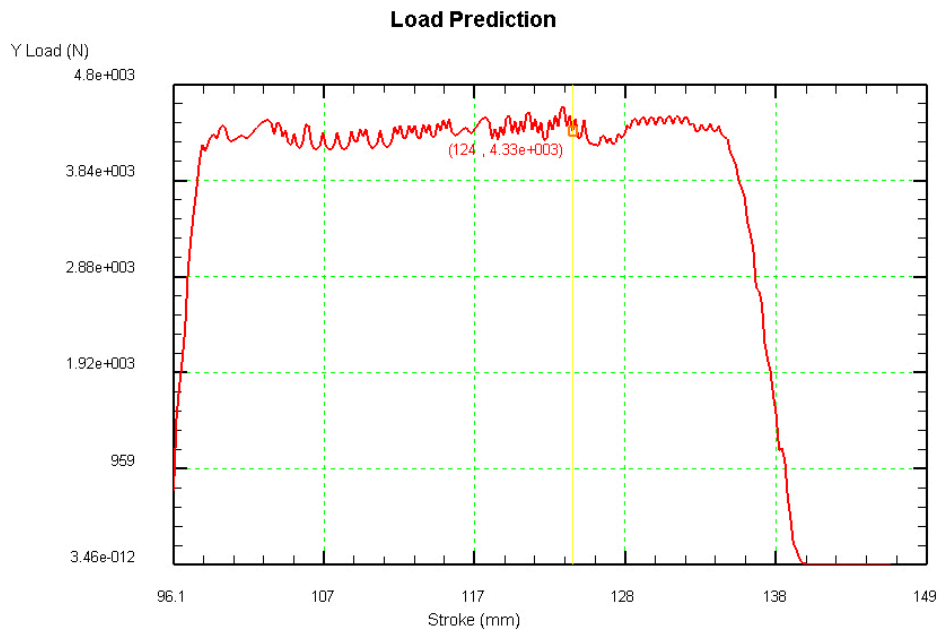


Figura 4.42 Carga vs desplazamiento, 4ª etapa estirado AW 7075-O ( $\Delta=2,30$ ,  $\mu=0,10$ ).

#### 4.3.5 Discusión de los resultados obtenidos

A continuación se enumeran los aspectos fundamentales y conclusiones particulares sobre los procesos estudiados y los resultados obtenidos en los análisis realizados por ambos métodos:

- Se han estudiado dos procesos de estirado para el aluminio AW 7075-O, uno realizado sin aplicar recocido intermedio alguno y el otro aplicando recocidos "on-line" cada 5 etapas, recocidos intercalados en la secuencia del proceso de estirado multi-etapa.
- En el primer supuesto, diseñado con 17 etapas y ningún recocido en toda la secuencia, el valor del ratio de deformación es constante y con valor  $r=0,18$  mientras que en el segundo supuesto esta constante se mantiene en torno a  $r=0,22$  durante toda la secuencia del proceso de estirado, exceptuando la última etapa.
- Para conseguir un incremento de un 4% en el grado de deformación a aplicar por etapa, ha sido necesario incrementar el número de etapas del proceso en tres.
- Como consecuencia del endurecimiento por deformación del aluminio durante el estirado en frío, la secuencia resultante obtenida en el segundo supuesto requiere de dos recocidos intermedios. Estos se aplican, justo antes de la sexta y la undécima etapas, con el fin de evitar la rotura del metal en el proceso de estirado.
- Se puede deducir, a partir de los resultados obtenidos para ambos procesos secuenciales diseñados, que los valores de fuerza de estirado  $F$  y potencia requerida

*P* se mueven en una horquilla muy parecida. Esto es así a pesar de que se trata de dos diseños totalmente distintos.

- El sistema experto desarrollado implica unas condiciones de trabajo óptimas desde el punto de vista geométrico y permite verificar que, en todas y cada una de las etapas que constituyen las dos secuencias diseñadas para el proceso de estirado multi-etapa, el material estirado está sometido a un valor de tensión adecuado para conseguir el estirado. No obstante, el sistema garantiza que nunca se llega a alcanzar el límite por encima del cual se produciría la estricción y la rotura del material sometido a tracción durante el proceso.
- Las propiedades del producto obtenido son función directa del endurecimiento por deformación en frío del metal deformado al final del proceso de estirado multi-etapa.
- En el primer caso (17 etapas), el producto estirado obtenido presentará una mayor resistencia a la tracción, pero será menos dúctil, debido a un mayor grado de deformación acumulada. El material estirado en el proceso que incluye estaciones de recocido intermedias (14 etapas) presentará una resistencia a la tracción inferior, lo que implicará un producto estirado con mejores cualidades de ductilidad y tenacidad.
- Tanto el grado de deformación en frío acumulado como la distribución de tensiones en la sección del producto estirado, confieren un estado tensional inherente a la deformación adicional acumulada en la estructura del metal deformado que repercute directamente en las propiedades mecánicas del producto estirado.
- El grado de deformación en frío acumulada al final de ambos procesos es sensiblemente distinto, como consecuencia de la influencia del recocido intermedio.
- En el proceso diseñado sin recocidos y con una secuencia de 17 etapas se obtiene un producto estirado que presenta una deformación acumulada un 300% superior a la presentada al final de la opción diseñada con 14 reducciones y recocidos "on-line". Las propiedades mecánicas del producto obtenido en uno y otro proceso de estirado multi-etapa serán totalmente distintas.
- En definitiva, un diseño con menos etapas requiere de recocidos intermedios, lo cual implica un producto final con unas características mecánicas muy diferentes al obtenido en un proceso con más etapas que permite la ausencia de recocidos intermedios.
- Antes de establecer el diseño de la secuencia de etapas de un proceso de estirado multi-etapa es imprescindible definir las características geométricas que se desean

en el producto final. Es necesario predeterminar las propiedades mecánicas y cualidades deseadas para el producto final estirado y diseñar un proceso que permita obtener estas propiedades.

- Uno de los objetivos de un proceso secuencial de estirado multi-etapa, además de una geometría definida en el producto final estirado, es el conferir unas cualidades determinadas.
- El diseño de un proceso secuencial de estirado multi-etapa no persigue únicamente obtener la geometría del producto final estirado en el menor número de etapas posible.

A partir de la observación de los valores obtenidos para un parámetro tan significativo del proceso como es la tensión efectiva  $\sigma_e$ , en cada uno de los casos estudiados y en el documento de referencia se han observado los siguientes aspectos:

- En el diseño presentado en el documento de referencia [Sebastián, 2010] se obtienen secuencias muy cortas para el estirado multi-etapa del AW 7075-O. En dicho documento se aplica una metodología en la que no se considera la influencia de factores tan importantes como el rozamiento o la distorsión interna del material estirado y por lo tanto dichos resultados deben tratarse con bastante cautela.
- En los resultados obtenidos de la metodología analítica aplicada en los casos presentados en el documento de referencia, se observan valores muy elevados en el ratio de deformación por etapa. Estos valores superan siempre el 40% y llegan a alcanzar hasta casi el 70% en alguna de las etapas de los diseños obtenidos por dicho método. Estos resultados son consecuencia de la aplicación de un método analítico que no considera el efecto de los factores mencionados anteriormente.
- Observando los resultados del análisis tecnológico de los dos diseños realizados para este caso mediante la metodología propuesta y con la ayuda de la aplicación *PullWorks* desarrollada, se puede afirmar que la implicación del factor de forma  $\Delta$  como parámetro fundamental para el diseño geométrico del proceso secuencial de estirado multi-etapa es muy acertada. Este parámetro lleva implícita tanto la influencia del rozamiento como de la distorsión interna del material en el estirado (véase en el apartado 4 del capítulo 2 referido a los parámetros fundamentales de la geometría de la hilera de estirado).
- El valor de la tensión efectiva  $\sigma_e$  en todas las etapas de las secuencia diseñadas para los dos supuestos analizados, obtenido de aplicar la metodología propuesta implementada en *PullWorks*, es solo ligeramente inferior al obtenido por el método numérico aplicado con el software *Deform2D*.

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

- En la Figura 4.43, para un proceso de estirado secuencial multi-etapa del aluminio que ha sido diseñado sin recocidos intermedios y en 17 etapas, se observa la similitud en los resultados obtenidos, por ambos métodos, para el valor de la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$ . Este hecho confirma la validez de la metodología propuesta, considerando las condiciones particulares que se han fijado para el diseño de este proceso concreto de estirado multi-etapa del aluminio.

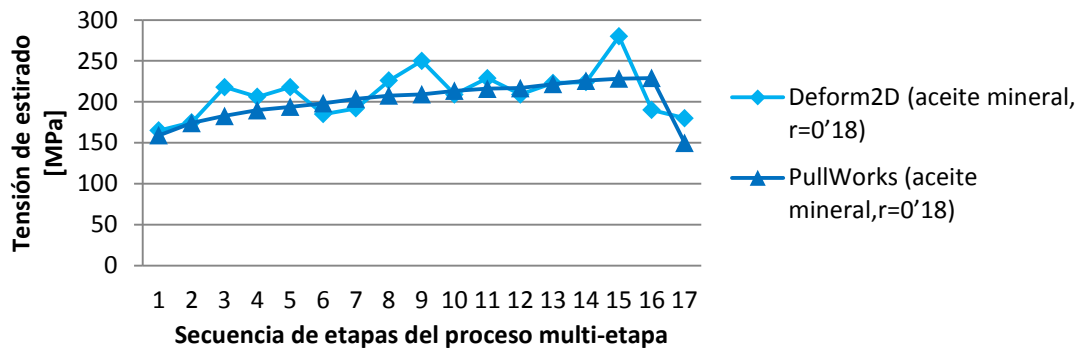


Figura 4.43 Evolución de la tensión de estirado del AW 7075-O para  $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,75$ ,  $r=0,18$  (Deform2D vs PullWorks).

- En la gráfica de la Figura 4.44, para un proceso de estirado multi-etapa de aluminio con recocidos intermedios justo antes de las estaciones 6ª y 11ª, los valores obtenidos para la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$  son similares por ambos métodos.

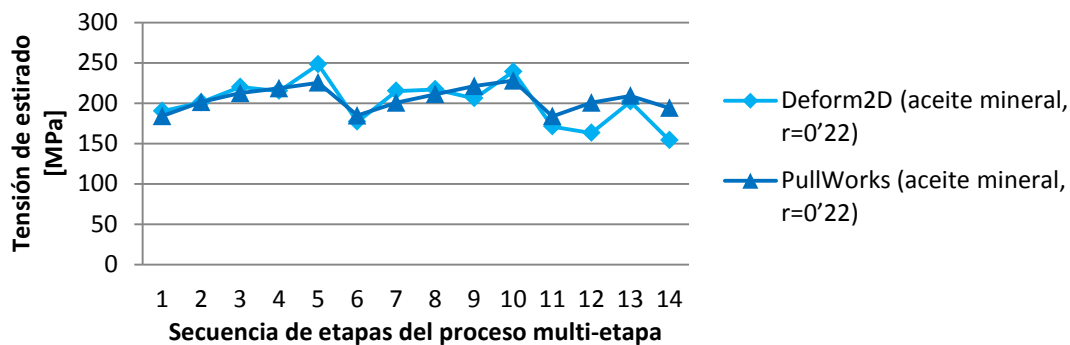


Figura 4.44 Evolución de la tensión de estirado del AW 7075-O para  $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,75$ ,  $r=0,22$  (Deform2D vs PullWorks).

#### **4.4 Estudio y análisis del proceso de trefilado de una barra de latón**

En el estudio que se presenta se realiza el análisis del proceso de trefilado para obtener un hilo a partir de un alambroón de latón 70-30, denominado también C26000 [ASTM B846-11a], según la norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Para este análisis se aplica el procedimiento metodológico desarrollado en la presente tesis, determinando el diseño del proceso secuencial de estirado y definiendo tecnológicamente todas y cada una de las etapas del mismo.

##### **4.4.1 Caracterización de las condiciones de inicio del proceso**

Las condiciones del proceso de trefilado multi-etapa de alambre de latón son:

- Tipo de proceso: Trefilado.
- Material: Latón 70-30, C26000-OS100.
- Geometrías inicial-final del proceso:  $d_0 = 8 \text{ mm} \rightarrow d_f = 1,2 \text{ mm}$ .
- Geometría de las hileras:  $\alpha_n = 5^\circ - 11^\circ$ ,  $R_n = 1 \text{ mm}$ ,  $L_c = 0,35 \cdot d_f \text{ mm}$ ,  $\Delta = 2,50$ .
- Fricción en las bobinas de tensión (latón-acero):  $\mu_b = 0,24$ ,  $n_b = 1$  vuelta.
- Lubricación a base de aceite mineral de baja viscosidad  $\mu \approx 0,12$ .
- Velocidad del proceso:  $v_f = 30 \text{ m/s}$ .

En la Tabla 4.42 y en la Tabla 4.43 se presentan las propiedades mecánicas y composición química del latón C26000:

Tabla 4.42 Propiedades mecánicas C26000, [ASM International Handbook Committee, 1990].

Propiedad	Denominación	Valor
$E$	Módulo de Young	100000 [Mpa]
$Y$	Límite de fluencia	75 [Mpa]
$R_m$	Tensión de rotura	305 [Mpa]
$C$	Coeficiente de resistencia a la deformación	900 [Mpa]
$n$	Coeficiente de endurecimiento por deformación	0,49
$\mu$	Coeficiente de rozamiento en la interfase	0,12

Tabla 4.43 Composición química C26000, [ASM International Handbook Committee, 1990].

	Cu	Pb	Fe	Zn
%	68,5-71,5	0,07	0,05	28,5-31,5

##### **4.4.2 Justificación del estudio y análisis del trefilado de latón**

En este estudio sobre el trefilado de hilo de latón se toma como referencia el trabajo realizado por Sebastián [Sebastián, 2010]. En su trabajo, el autor enumera los diversos

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

métodos analíticos aplicables al proceso de estirado y diseña la secuencia de etapas necesaria para el estirado del latón mediante una metodología fundamentada en la asunción de condiciones de deformación homogénea, que se basa en la determinación de la deformación máxima admisible en cada etapa. Los resultados de dicho proceso secuencial de estirado se presentan en la Tabla 4.44.

Tabla 4.44 Diseño de la secuencia sin recocidos intermedios, [Sebastián, 2010].

<b>Etapas</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$d_f$ [mm]	8,00	4,50	2,60	1,60	1,20	-	-	-	-	-	-
$\Delta\epsilon$	-	1,15	1,10	0,97	0,57	-	-	-	-	-	-
$\epsilon$	-	1,15	2,25	3,22	3,79	-	-	-	-	-	-
$\alpha$ [°]	-	10	10	10	10	-	-	-	-	-	-
$r$	-	0,683	0,674	0,621	0,437	-	-	-	-	-	-
$\Delta$	-	0,60	0,62	0,71	1,19	-	-	-	-	-	-
$\sigma$ [MPa]	-	888	1221	1378	1138	-	-	-	-	-	-
$F$ [KN]	-	14,1	6,5	2,8	1,3	-	-	-	-	-	-

Tal y como se indica en la caracterización del proceso, la velocidad deseada a la salida en la última etapa del proceso de trefilado continuo se ha fijado en  $v_f=30$  m/s.

Se puede apreciar cómo, bajo las condiciones establecidas en el documento de referencia y suponiendo la ausencia de recocidos intermedios, el valor para la fuerza de estirado se ve incrementado a medida que las etapas del proceso avanzan.

El incremento en el valor de la fuerza de estirado es debido al valor creciente de la tensión de estirado a medida que se avanza en la secuencia, incremento que es consecuencia del endurecimiento por deformación en frío que el material va acumulando etapa tras etapa al no aplicarse recocido alguno en todo el proceso.

Es importante incidir en que en este método analítico no considera las condiciones de rozamiento y lubricación existentes en la interfase del proceso, en la zona de contacto hilera-material en la que se produce la deformación plástica del metal en frío. Por este motivo es muy probable que el diseño de la secuencia presentada para el proceso de estirado multi-etapa no sea técnicamente viable.

Estos resultados deben valorarse con cautela, ya que la secuencia propuesta implica ratios de deformación/etapa elevados como consecuencia de la ausencia de recocidos intermedios en el proceso multi-etapa.

Para el trefilado de aleaciones de cobre, es aconsejable no superar el 50% de deformación por etapa en alambres de  $\varnothing=8\div 10$  mm, siendo este límite de aproximadamente un 20% en caso de estirar hilo metálico de menos de 3,5 mm de diámetro [Tschaetsch, 2005].

#### **4.4.3 Resultados del análisis mediante la metodología propuesta**

En todos los supuestos estudiados en el caso del trefilado de latón con hileras de diamante se han considerado unas condiciones de rozamiento o fricción en la interfase o zona de contacto igual o por debajo del valor  $\mu=0,12$ , correspondiente al valor del coeficiente de fricción estática en seco del diamante para diversos metales [Lide, 2004] tomado como referencia. Las condiciones de fricción muy baja en el trefilado de metales no ferrosos son posibles gracias al uso del diamante policristalino en la hilera de estirado y a una lubricación adecuada.

Para el cálculo de la longitud de calibración  $L_c$ , aplicado para determinar los parámetros tecnológicos en cada etapa del proceso diseñado, se ha escogido un valor  $L_c=0,35 \cdot df$  en todas las etapas.

La aplicación *PullWorks*, en la cual se ha implementado la metodología propuesta en esta tesis, ha permitido realizar el diseño de la secuencia de estirado multi-etapa considerando un valor óptimo para el factor delta en todas y cada una de las etapas de la secuencia de forma que, en el caso que se presenta a continuación, se ha fijado un valor  $\Delta=2,50$  para el valor óptimo de este factor geométrico en todas las etapas del proceso y en los tres supuestos estudiados.

El objeto de este caso es estudiar la influencia que tiene el valor del semiángulo  $\alpha$  de la herramienta en la determinación del diseño de la secuencia de etapas que constituye un proceso de estirado multi-etapa y en los valores de todos los parámetros que caracterizan tecnológicamente cada una de las etapas en las que se constituye el proceso secuencial. Para ello se han estudiado tres supuestos de un mismo proceso de estirado secuencial multi-etapa, para valores del semiángulo  $\alpha$  de  $5^\circ$ ,  $8^\circ$  y  $11^\circ$ , analizando la secuencia obtenida y la evolución de los diferentes parámetros tecnológicos en las etapas de dicho proceso secuencial.

Inicialmente se presenta el estudio realizado con ayuda de la herramienta *PullWorks*, desarrollada a tal efecto en el presente trabajo. Para ello se consideran condiciones idénticas en todas las variantes del proceso estudiado, a excepción del mencionado semi-ángulo de la hilera. Además, se ha implicado una tensión de retroceso, aplicada mediante bobinas de tensión entre etapa y etapa en la trefiladora.

Los procesos secuenciales diseñados serán estudiados con ayuda del software de simulación numérica por el método de los elementos finitos *Deform2D*, realizando el análisis etapa por etapa en cada uno de los procesos diseñados para los diferentes valores del semiángulo  $\alpha$ , con la finalidad de confrontar los resultados obtenidos por ambos métodos y conocer cómo influye el valor de dicho ángulo en el proceso secuencial de estirado multi-etapa.

**Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa**

➤ **Supuesto nº1: Proceso de trefilado secuencial para  $\alpha=5^\circ$ ,  $L_c=0,35.d_f$ , considerando un factor delta óptimo  $\Delta=2,50$  para el diseño de la secuencia, a velocidad  $v_f=30$  m/s y  $\mu=0,12$  en seco.**

En la Tabla 4.45 se presentan los resultados correspondientes al diseño geométrico obtenido para la secuencia de trefilado multi-etapa, según las condiciones especificadas:

Tabla 4.45 Secuencia completa del trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=5^\circ$ ).

<b>Etapa</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$d_f$ [mm]	8,00	7,46	6,96	6,49	6,05	5,64	5,26	4,91	4,58	4,27	3,98
$\epsilon_{\text{efectiva}}$	-	0,14	0,28	0,42	0,56	0,70	0,84	0,98	1,12	0,14	0,28
$r$	-	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$\Delta$	-	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
<b>Recocido</b>	-	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO
<b>Etapa</b>	-	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
$d_f$ [mm]	-	3,71	3,46	3,23	3,01	2,81	2,62	2,44	2,28	2,13	1,99
$\epsilon_{\text{efectiva}}$	-	0,42	0,56	0,70	0,84	0,98	0,14	0,28	0,42	0,56	0,70
$r$	-	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$\Delta$	-	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
<b>Recocido</b>	-	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO
<b>Etapa</b>	-	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
$d_f$ [mm]	-	1,86	1,73	1,61	1,50	1,40	1,31	1,22	1,20	-	-
$\epsilon_{\text{efectiva}}$	-	0,84	0,98	0,14	0,28	0,42	0,55	0,69	0,72	-	-
$r$	-	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,13	0,03	-	-
$\Delta$	-	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	10,56	-	-
<b>Recocido</b>	-	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	-	-

Mediante la metodología desarrollada e implementada en la aplicación informática *PullWorks* se obtiene un diseño de 28 etapas, que incluye tratamientos de recocido intermedio on-line cada 8 etapas. Se trata de un proceso largo, a pesar de utilizar un semi-ángulo de hileras sensiblemente pequeño.

Se debe tener en cuenta que el latón es un metal dúctil pero con un alto grado de endurecimiento por deformación en frío. Esta característica hace necesaria la aplicación de reducciones muy suaves o, por el contrario, constantes etapas de tratamiento de recocido intermedio entre etapas de estirado. Se trata de un metal que se caracteriza por que es más fácilmente conformable en caliente que en frío ya que al ser deformado en frío alcanza un grado de acritud elevado fácilmente.

En la Tabla 4.46 se muestran los valores de los parámetros tecnológicos correspondientes a cada una de las 28 etapas diseñadas, para  $v_f=30$  m/s.

Tabla 4.46 Parámetros tecnológicos del trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=5^\circ$ ).

<b>Etapa</b>	<b><math>d_o</math> [mm]</b>	<b><math>d_f</math> [mm]</b>	<b><math>V_e</math> [m/s]</b>	<b><math>V_s</math> [m/s]</b>	<b><math>\bar{Y}</math> [MPa]</b>	<b><math>Y_f</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_e</math> [MPa]</b>	<b><math>F</math> [N]</b>	<b><math>P</math> [W]</b>
<b>1</b>	8,00	7,46	0,76	0,86	305,49	418,44	114,01	4983,18	4310,45
<b>2</b>	7,46	6,96	0,86	1,00	398,01	556,28	169,57	6451,35	6451,35
<b>3</b>	6,96	6,49	1,00	1,15	469,79	663,23	201,29	6658,84	7657,66
<b>4</b>	6,49	6,05	1,15	1,33	529,80	752,66	227,68	6545,37	8705,34
<b>5</b>	6,05	5,64	1,33	1,53	582,29	830,87	250,16	6249,91	9537,36
<b>6</b>	5,64	5,26	1,53	1,74	629,41	901,06	269,22	5850,11	10196,74
<b>7</b>	5,26	4,91	1,74	2,01	672,39	965,12	284,90	5394,41	10842,77
<b>8</b>	4,91	4,58	2,01	2,08	713,28	1026,04	304,52	5016,97	10425,26
<b>9</b>	4,58	4,27	2,08	2,38	305,63	418,64	131,18	1878,55	4470,95
<b>10</b>	4,27	3,98	2,38	2,73	399,09	557,90	171,74	2136,61	5826,53
<b>11</b>	3,98	3,71	2,73	3,14	469,86	663,35	202,02	2183,92	6855,31
<b>12</b>	3,71	3,46	3,14	3,61	529,45	752,13	226,49	2129,55	7685,54
<b>13</b>	3,46	3,23	3,61	4,14	581,31	829,40	246,12	2016,71	8351,21
<b>14</b>	3,23	3,01	4,14	4,77	629,92	901,83	271,66	1933,07	9216,90
<b>15</b>	3,01	2,81	4,77	5,47	672,33	965,02	284,57	1764,76	9655,02
<b>16</b>	2,81	2,62	5,47	6,29	305,49	418,44	131,02	706,37	4445,21
<b>17</b>	2,62	2,44	6,29	7,26	400,05	559,32	173,66	812,01	5891,98
<b>18</b>	2,44	2,28	7,26	8,31	467,85	660,35	196,05	800,45	6651,73
<b>19</b>	2,28	2,13	8,31	9,52	528,09	750,10	221,84	790,50	7527,10
<b>20</b>	2,13	1,99	9,52	10,91	580,74	828,55	243,79	758,25	8271,74
<b>21</b>	1,99	1,86	10,91	12,49	629,57	901,30	263,07	714,80	8925,66
<b>22</b>	1,86	1,73	12,49	14,43	674,54	968,32	296,65	697,32	10065,11
<b>23</b>	1,73	1,61	14,43	16,67	308,52	422,94	134,90	274,64	4577,14
<b>24</b>	1,61	1,50	16,67	19,20	399,59	558,63	172,73	305,24	5860,66
<b>25</b>	1,5	1,40	19,20	22,04	468,94	661,96	198,98	306,30	6751,25
<b>26</b>	1,4	1,31	22,04	25,17	526,80	748,19	217,47	293,11	7378,56
<b>27</b>	1,31	1,22	25,17	29,02	579,45	826,63	251,54	294,04	8534,27
<b>28</b>	1,22	1,20	29,02	30,00	624,90	894,35	102,74	116,20	3486,06

De los resultados anteriores es posible deducir el alto grado de endurecimiento por deformación en frío que presenta este metal. El valor de la tensión correspondiente al límite de fluencia del latón se ve incrementado sustancialmente a medida que éste es conformado en frío. En las 8 primeras etapas de la secuencia diseñada, justo hasta la etapa previa al primer recocido on-line, el valor de este límite se ha visto incrementado más de un 200%.

Esta característica va a influir directamente en el valor de la tensión de estirado necesaria en cada etapa. Al tratarse de un proceso de trefilado en el que se parte de una sección muy grande, se obtienen valores muy elevados para la fuerza  $F$  requerida en las etapas iniciales.

En la Tabla 4.47 se presentan los valores de las distintas componentes de la tensión de estirado en el proceso de trefilado diseñado. Mientras, en la gráfica de la Figura 4.45,

se muestra la evolución del valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$ , durante toda la secuencia de etapas del proceso de trefilado.

Tabla 4.47 Componentes de  $\sigma_e$  en el trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=5^\circ$ ).

Etapa	$\sigma_{dh+roz}$ [MPa]	$\sigma_{bp}$ [MPa]	$\sigma_{di}$ [MPa]	$\sigma_{cal}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
1	92,15	0,00	20,57	1,28	114,01
2	119,26	21,83	26,81	1,67	169,57
3	141,77	25,91	31,64	1,97	201,29
4	160,47	29,30	35,68	2,23	227,68
5	176,30	32,20	39,22	2,45	250,16
6	189,53	34,65	42,39	2,64	269,22
7	200,11	36,68	45,28	2,82	284,90
8	214,29	39,20	48,04	3,00	304,52
9	92,43	16,88	20,58	1,28	131,18
10	121,08	22,10	26,88	1,68	171,74
11	142,40	26,00	31,64	1,97	202,02
12	159,45	29,15	35,66	2,22	226,49
13	172,84	31,69	39,15	2,44	246,12
14	191,63	34,96	42,42	2,65	271,66
15	199,83	36,64	45,28	2,82	284,57
16	92,30	16,86	20,57	1,28	131,02
17	122,69	22,34	26,94	1,68	173,66
18	137,34	25,24	31,51	1,96	196,05
19	155,50	28,56	35,57	2,22	221,84
20	170,85	31,39	39,11	2,44	243,79
21	184,15	33,87	42,40	2,64	263,07
22	210,24	38,15	45,43	2,83	296,65
23	95,47	17,35	20,78	1,30	134,90
24	121,91	22,23	26,91	1,68	172,73
25	139,81	25,62	31,58	1,97	198,98
26	151,78	28,00	35,48	2,21	217,47
27	177,71	32,37	39,03	2,43	251,54
28	47,90	10,13	42,09	2,62	102,74

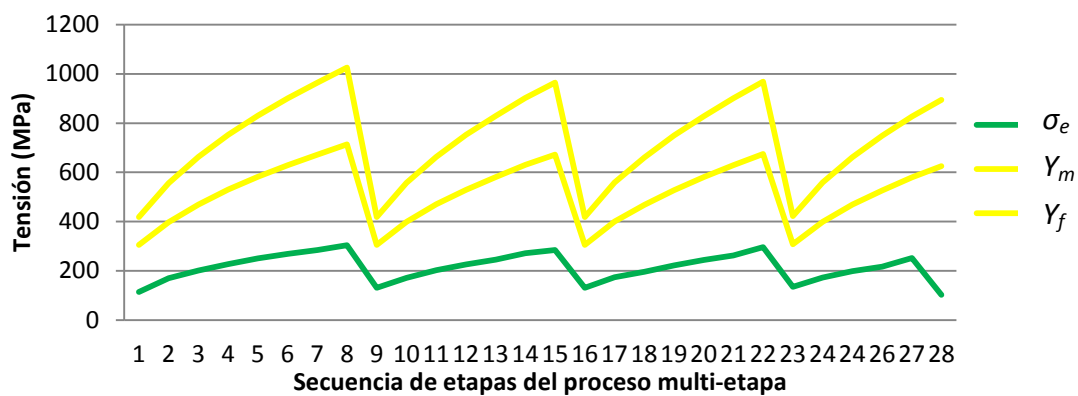


Figura 4.45 Tensiones de estirado en el trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=5^\circ$ ).

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

En la Figura 4.45 se observa que la tensión de estirado  $\sigma_e$  se mantiene en todo momento por debajo del límite establecido por la tensión de fluencia del metal estirado, en todas las etapas de la secuencia diseñada. Además, se puede ver esa forma en diente de sierra, consecuencia del efecto de las estaciones de recocido intermedio intercaladas en el proceso secuencial de trefilado multi-etapa.

➤ **Supuesto nº2: Proceso de trefilado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,35 \cdot d_f$ , considerando un factor delta óptimo  $\Delta=2,50$  para el diseño de la secuencia, a velocidad  $v_f=30$  m/s y  $\mu=0,12$  en seco.**

La secuencia diseñada en función de las condiciones asumidas para el proceso es la presentada en la Tabla 4.48:

Tabla 4.48 Secuencia completa del trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=8^\circ$ ).

<b>Etap</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b><math>d_f</math> [mm]</b>	8,00	7,16	6,40	5,73	5,13	4,59	4,11	3,68	3,29	2,94	2,63
<b><math>\epsilon_{\text{efectiva}}</math></b>	-	0,22	0,44	0,22	0,44	0,22	0,44	0,22	0,44	0,22	0,44
<b><math>r</math></b>	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<b><math>\Delta</math></b>	-	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
<b>Recocido</b>	-	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO
<b>Etap</b>	<b>-</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
<b><math>d_f</math> [mm]</b>	-	2,35	2,10	1,88	1,68	1,50	1,34	1,20	-	-	-
<b><math>\epsilon_{\text{efectiva}}</math></b>	-	0,23	0,45	0,22	0,44	0,23	0,46	0,22	-	-	-
<b><math>r</math></b>	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	-	-	-
<b><math>\Delta</math></b>	-	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,53	-	-	-
<b>Recocido</b>	-	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	-	-	-

Tabla 4.49 Parámetros tecnológicos del trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=8^\circ$ ).

<b>Etap</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>d_f</math> [mm]</b>	<b><math>V_e</math> [m/s]</b>	<b><math>V_s</math> [m/s]</b>	<b><math>\bar{Y}</math> [MPa]</b>	<b><math>Y_f</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_e</math> [MPa]</b>	<b><math>F</math> [N]</b>	<b><math>P</math> [W]</b>
<b>1</b>	8,00	7,16	0,66	0,83	362,64	503,58	176,63	7111,92	5917,11
<b>2</b>	7,16	6,40	0,83	1,04	480,95	679,87	269,43	8667,69	9031,74
<b>3</b>	6,40	5,73	1,04	1,30	363,38	504,69	201,49	5195,85	6753,50
<b>4</b>	5,73	5,13	1,30	1,63	479,52	677,73	265,93	5496,66	8948,56
<b>5</b>	5,13	4,59	1,63	2,04	364,20	505,91	202,77	3355,20	6851,31
<b>6</b>	4,59	4,11	2,04	2,56	479,38	677,53	265,60	3523,73	9013,69
<b>7</b>	4,11	3,68	2,56	3,19	362,64	503,58	200,99	2137,73	6819,35
<b>8</b>	3,68	3,29	3,19	3,99	480,79	679,62	269,03	2287,06	9127,64
<b>9</b>	3,29	2,94	3,99	5,00	365,79	508,28	205,26	1393,45	6964,46
<b>10</b>	2,94	2,63	5,00	6,25	480,25	678,82	267,72	1454,38	9084,03
<b>11</b>	2,63	2,35	6,25	7,82	368,97	513,02	207,16	898,53	7029,21
<b>12</b>	2,35	2,10	7,82	9,80	485,64	686,85	272,51	943,87	9246,20
<b>13</b>	2,10	1,88	9,80	12,22	363,49	504,85	201,66	559,78	6842,21
<b>14</b>	1,88	1,68	12,22	15,31	481,19	680,23	270,02	598,55	9161,36
<b>15</b>	1,68	1,50	15,31	19,20	366,87	509,88	206,96	365,72	7021,86
<b>16</b>	1,50	1,34	19,20	24,06	485,92	687,27	273,21	385,30	9269,85
<b>17</b>	1,34	1,20	24,06	30,00	362,64	503,58	200,78	227,08	6812,29

Al aumentar el semi-ángulo de las hileras se ha obtenido un proceso secuencial en el cual es necesario aplicar recocidos intermedios alternos a lo largo de toda la secuencia. La reducción del número de etapas implica un incremento en los valores de la fuerza y potencia requeridas, en todas las etapas, tal y como se aprecia en la Tabla 4.49.

Tabla 4.50 Componentes de  $\sigma_e$  en el trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=8^\circ$ ).

Etapa	$\sigma_{dh+roz}$ [MPa]	$\sigma_{bp}$ [MPa]	$\sigma_{di}$ [MPa]	$\sigma_{cal}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
1	135,88	0,00	39,23	1,52	176,63
2	182,10	33,28	52,03	2,02	269,43
3	135,77	24,89	39,31	1,53	201,49
4	179,20	32,84	51,88	2,01	265,93
5	136,79	25,05	39,40	1,53	202,77
6	178,92	32,80	51,86	2,01	265,60
7	135,41	24,82	39,23	1,52	200,99
8	181,76	33,23	52,02	2,02	269,03
9	138,79	25,36	39,57	1,54	205,26
10	180,67	33,07	51,96	2,02	267,72
11	140,10	25,59	39,92	1,55	207,16
12	184,27	33,67	52,54	2,04	272,51
13	135,90	24,91	39,33	1,53	201,66
14	182,58	33,36	52,06	2,02	270,02
15	140,15	25,57	39,69	1,54	206,96
16	184,84	33,75	52,57	2,04	273,21
17	135,23	24,80	39,23	1,52	200,78

Los valores de las componentes de la tensión de estirado  $\sigma_e$ , para cada una de las 17 etapas de la secuencia de trefilado diseñada son los presentados en la Tabla 4.50.

Al aumentar el semi-ángulo de las hileras se ha obtenido un proceso secuencial en el cual es necesario aplicar recocidos intermedios alternos a lo largo de toda la secuencia. La reducción del número de etapas implica un incremento en los valores de la fuerza y potencia requeridas, en todas las etapas, tal y como se aprecia en la Tabla 4.49.

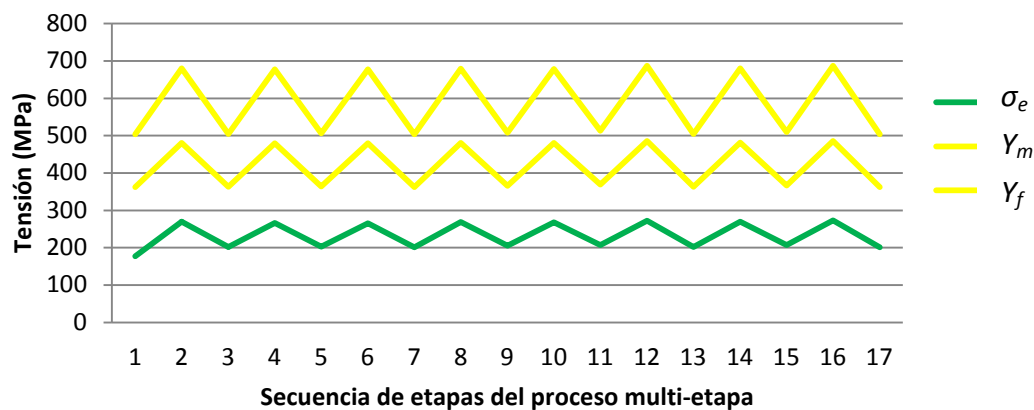


Figura 4.46 Tensión de estirado en el trefilado secuencial de latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=5^\circ$ ).

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

En la Figura 4.46, se observa que la tensión de estirado se mantiene por debajo de los límites de fluencia del material estirado para todas las etapas de la secuencia multi-etapa diseñada con el software *PullWorks*. Los resultados obtenidos con esta aplicación indican que en ninguna etapa se alcanza el valor de la tensión de rotura  $R_m$  del material estirado en ninguna de las 17 etapas de la secuencia de trefilado diseñada y, por tanto, la herramienta indica la viabilidad práctica del proceso multi-etapa de trefilado que se ha diseñado.

➤ **Supuesto nº3: Proceso de trefilado secuencial para  $\alpha=11^\circ$ ,  $L_c=0,35.d_f$ , considerando un factor delta óptimo  $\Delta=2,50$  para el diseño de la secuencia, a velocidad  $v_f=30$  m/s y  $\mu=0,12$  en seco.**

Introduciendo las condiciones geométricas y tecnológicas asumidas en los apartados correspondientes de la aplicación *PullWorks*, se ha obtenido el diseño presentado en la Tabla 4.51 para el proceso de trefilado secuencial multi-etapa del latón:

Tabla 4.51 Secuencia completa del trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=11^\circ$ ).

Etapa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_f$ [mm]	8,00	6,87	5,90	5,06	4,34	3,72	3,19	2,74	2,35	2,02	1,73
$\epsilon_{\text{efectiva}}$	-	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31	0,30	0,31	0,30	0,31
$r$	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27
$\Delta$	-	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Recocido	-	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Etapa	-	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$d_f$ [mm]	-	1,48	1,27	1,20	-	-	-	-	-	-	-
$\epsilon_{\text{efectiva}}$	-	0,31	0,31	0,42	-	-	-	-	-	-	-
$r$	-	0,27	0,26	0,11	-	-	-	-	-	-	-
$\Delta$	-	2,50	2,50	6,77	-	-	-	-	-	-	-
Recocido	-	SI	SI	NO	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4.52 Parámetros tecnológicos, trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=11^\circ$ ).

Etapa	$d_0$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$F$ [N]	$P$ [W]
1	8,00	6,87	0,81	1,11	409,85	573,92	247,08	9159,02	10157,36
2	6,87	5,90	1,11	1,51	412,26	577,51	282,41	7721,12	11628,00
3	5,90	5,06	1,51	1,69	413,75	579,73	285,18	5734,64	9691,54
4	5,06	4,34	1,69	2,29	413,64	579,58	284,99	4215,97	9671,43
5	4,34	3,72	2,29	3,12	414,35	580,64	286,31	3111,85	9715,21
6	3,72	3,19	3,12	4,25	415,27	582,00	286,38	2288,81	9715,99
7	3,19	2,74	4,25	5,75	409,85	573,92	280,58	1654,40	9519,43
8	2,74	2,35	5,75	7,82	413,70	579,66	285,09	1236,54	9673,45
9	2,35	2,02	7,82	10,59	411,28	576,06	280,62	899,31	9520,98
10	2,02	1,73	10,59	14,43	415,24	581,96	287,98	676,92	9770,73
11	1,73	1,48	14,43	19,72	415,27	582,00	254,58	437,96	8637,37
12	1,48	1,27	19,72	26,78	413,14	578,83	284,05	359,82	9637,55
13	1,27	1,20	26,78	30,00	551,26	784,62	202,60	229,13	6873,92

Una vez calculadas las velocidades a la entrada y salida, para todas y cada una de las etapas del proceso diseñado, se han determinado los valores para los diferentes parámetros tecnológicos que se muestran en la Tabla 4.52.

Los valores obtenidos para las diferentes componentes de la tensión de estirado efectiva, en cada una de las 13 etapas de la secuencia del proceso de trefilado multi-etapa, se presentan en la Tabla 4.53. En los resultados obtenidos se observa que se trata de un proceso secuencial de trefilado en el que se intercalan recocidos intermedios al inicio de todas las etapas.

Tabla 4.53 Componentes de  $\sigma_e$  en el trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=11^\circ$ ).

Etapa	$\sigma_{dh+roz}$ [MPa]	$\sigma_{bp}$ [MPa]	$\sigma_{di}$ [MPa]	$\sigma_{cal}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
1	184,04	0,00	61,33	1,72	247,08
2	185,05	33,95	61,69	1,73	282,41
3	187,24	34,29	61,91	1,74	285,18
4	187,09	34,27	61,90	1,74	284,99
5	188,14	34,43	62,00	1,74	286,31
6	188,06	34,44	62,14	1,74	286,38
7	183,80	33,73	61,33	1,72	280,58
8	187,17	34,28	61,90	1,74	285,09
9	183,62	33,73	61,54	1,73	280,62
10	189,46	34,64	62,13	1,74	287,98
11	190,69	33,76	62,14	1,74	288,34
12	186,34	34,15	61,82	1,74	284,05
13	97,64	20,16	82,49	2,32	202,60

Con este diseño se ha obtenido un proceso que es muy corto en cuanto al número de reducciones a realizar. Sin embargo es el proceso que más estaciones de recocido “on-line” va a requerir, con el coste económico que esto puede implicar.

En la gráfica de la Figura 4.47 se puede ver una la evolución del valor de la tensión efectiva de estirado requerida en cada una de las 13 etapas del proceso diseñado:

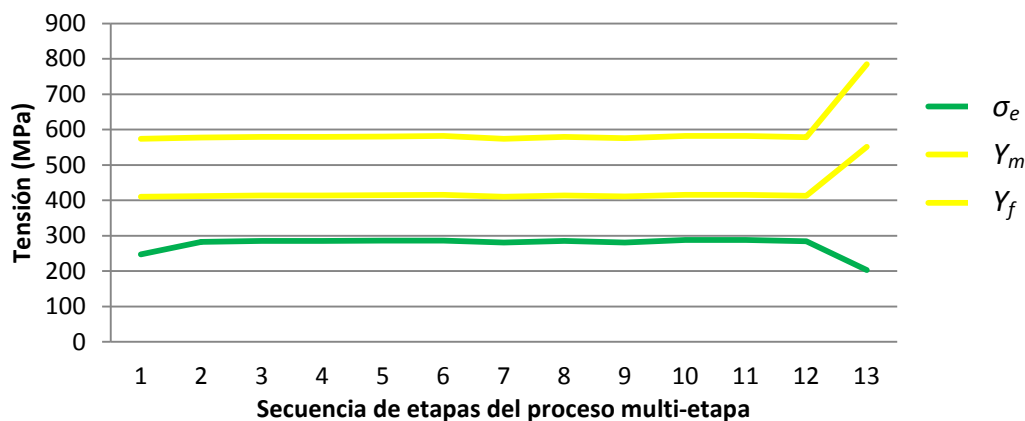


Figura 4.47 Tensión de estirado en el trefilado secuencial de latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=11^\circ$ ).

El valor alcanzado por dicha tensión de estirado  $\sigma_e$  es prácticamente el mismo en todas las etapas de la secuencia. Se está partiendo del latón recocido en en cada una de las etapas del proceso secuencial, a excepción de la última, en la cual el grado de reducción aplicado disminuye respecto al resto.

A pesar de este último aspecto, se puede apreciar que esta última etapa es la única en la cual se produce endurecimiento del material. La última pasada de trefilado se realiza sin recocido tras la etapa previa, con lo cual la deformación final acumulada del producto trefilado es el resultado de la suma de las deformaciones efectivas aplicadas en las dos últimas etapas de la secuencia.

#### **4.4.4 Resultados del análisis mediante la herramienta MEF, *Deform2D***

Se ha realizado el estudio y análisis correspondiente a dos de los supuestos del proceso para el trefilado secuencial multi-etapa de una barra de latón, de 8 a 1,2 milímetros de diámetro, desarrollados en el apartado anterior. Para ello se ha utilizado la aplicación del método de los elementos finitos mediante el software *Deform2D*.

El primer supuesto ofrece un diseño que se constituye en un número de etapas muy elevado, sin intercalar recocido intermedio alguno. Este diseño se vería justificado cuando se requieran unas características mecánicas muy concretas en el latón trefilado, propiedades de resistencia a la tracción y dureza elevadas, obtenidas aplicando un alto grado de deformación efectiva acumulada al producto final. Se trata de un diseño poco eficiente desde el punto de vista del número de etapas, ya que la construcción de una máquina de estas características resultaría muy cara.

Considerando los aspectos señalados anteriormente, el estudio comparativo realizado consiste en el análisis de los resultados obtenidos para el segundo y tercer supuestos, procesos diseñados anteriormente con ayuda de la metodología propuesta.

Los dos supuestos considerados, para el análisis comparativo y de validación de la metodología propuesta en este trabajo, incluyen recocidos intermedios “on-line” intercalados en la secuencia del proceso de trefilado multi-etapa.

El recocido intermedio aplicado de manera eficiente, entre las etapas de un proceso secuencial de trefilado o estirado multi-etapa, permite minimizar el riesgo de roturas en el material durante el proceso e implica una construcción más compacta y con menor número de estaciones de trefilado. Sin embargo encarece en sobremanera el proceso como consecuencia del coste de la instalación y del consumo eléctrico de los módulos de recocido en la máquina trefiladora.

En función de la distribución de los recocidos intermedios “on-line”, intercalados entre las etapas de un proceso secuencial de estirado multi-etapa, se obtendrán diferentes características mecánicas en el producto final estirado.

La aplicación *PullWorks*, que implementa la metodología de diseño propuesta en esta tesis, fundamenta el cálculo del diseño del proceso secuencial de estirado en función de un parámetro que el usuario debe indicar. El valor del factor delta  $\Delta$  puede estar encaminado a la obtención de la secuencia más corta posible, pero a menor número de etapas mayor será la probabilidad de que sea necesario aplicar este tratamiento intermedio.

Así, la aplicación permite al usuario plantearse el objetivo de un proceso de estirado en el cual, además de conseguir una geometría final determinada, sea posible obtener un conferir unas determinadas características mecánicas al mismo gracias al endurecimiento por deformación en frío y a la distribución de las etapas de recocido intermedio “on-line” en la secuencia multi-etapa de trefilado.

➤ **Supuesto nº2: Proceso de trefilado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,35.d_f$ , considerando un factor delta óptimo  $\Delta=2,50$  para el diseño de la secuencia, a velocidad  $v_f=30$  m/s y  $\mu=0,12$  en seco.**

Los resultados obtenidos, a partir de las simulaciones realizadas con el software de cálculo numérico *Deform2D*, han permitido determinar los valores representativos para las tensiones principales, las deformaciones y la fuerza de estirado necesaria en cada una de las etapas del proceso previamente diseñado con *PullWorks*

Los datos que definen tecnológicamente la secuencia del proceso, como las tensiones y las deformaciones, se presentan en la Tabla 4.54.

Tabla 4.54 Resultados obtenidos para el trefilado del latón (*Deform2D*,  $\Delta=2,50$ ,  $\mu=0,12$ ,  $\alpha=8^\circ$ ).

<b>Etap</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>d_f</math> [mm]</b>	<b>Rec.</b>	<b><math>\epsilon_{efect.m\acute{a}x.}</math></b>	<b><math>\epsilon_{efect. P1}</math></b>	<b><math>\sigma_{efect.P1}</math>[MPa]</b>	<b><math>\sigma_{efect.m\acute{a}x.}</math>[MPa]</b>	<b>F [N]</b>
<b>1</b>	8,00	7,16	SI	0,30	0,23	223	587	8200
<b>2</b>	7,16	6,40	NO	0,59	0,45	319	789	10040
<b>3</b>	6,40	5,73	SI	0,30	0,23	194	567	4970
<b>4</b>	5,73	5,13	NO	0,57	0,44	291	775	5900
<b>5</b>	5,13	4,59	SI	0,30	0,22	199	580	3180
<b>6</b>	4,59	4,11	NO	0,57	0,45	244	755	3720
<b>7</b>	4,11	3,68	SI	0,30	0,23	219	570	2200
<b>8</b>	3,68	3,29	NO	0,55	0,43	265	743	2210
<b>9</b>	3,29	2,94	SI	0,30	0,24	234	588	1500
<b>10</b>	2,94	2,63	NO	0,60	0,46	327	776	1730
<b>11</b>	2,63	2,35	SI	0,29	0,23	207	568	895
<b>12</b>	2,35	2,10	NO	0,56	0,45	275	759	945
<b>13</b>	2,10	1,88	SI	0,30	0,24	208	569	566
<b>14</b>	1,88	1,68	NO	0,56	0,43	254	746	584
<b>15</b>	1,68	1,50	SI	0,30	0,24	241	578	417
<b>16</b>	1,50	1,34	NO	0,56	0,44	305	756	392
<b>17</b>	1,34	1,20	SI	0,30	0,23	250	580	224

Se observa un grado de deformación efectiva muy bajo en el producto final, hecho que es debido al efecto del último recocido realizado prácticamente al final del proceso secuencial multi-etapa diseñado.

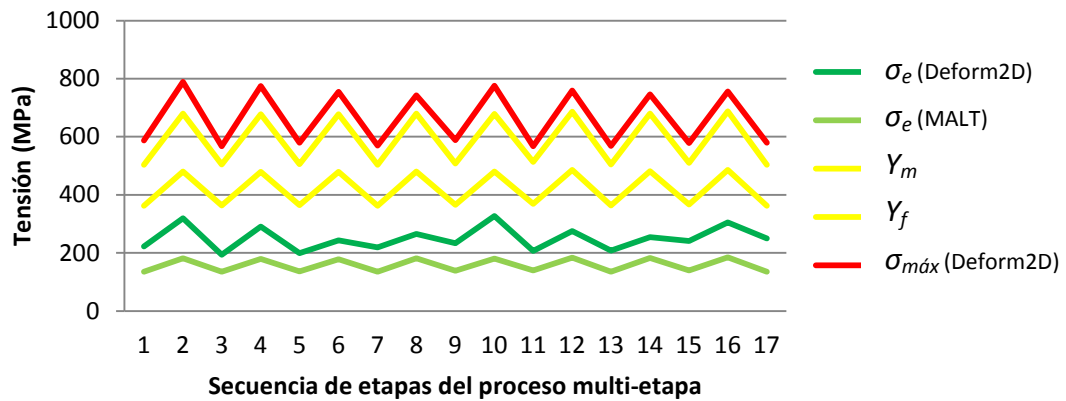


Figura 4.48 Gráfica de tensiones para el trefilado del latón (*Deform2D*,  $\Delta=2,50$ ,  $\mu=0,12$ ,  $\alpha=8^\circ$ ).

En la gráfica de la Figura 4.48, se evidencia claramente la influencia que tienen los recocidos intermedios en el valor de la tensión de estirado y el límite de fluencia, éste último función directa del endurecimiento del material.

El diseño obtenido establece una distribución alternada en las estaciones de recocido “on-line”, hecho que hace que la tensión de estirado  $\sigma_e$  se mantenga en valores moderados a lo largo de toda la secuencia diseñada.

Los resultados obtenidos con *PullWorks* se mantienen ligeramente por debajo de los valores obtenidos en las simulaciones realizadas con la aplicación *Deform2D*. Ambos métodos, analítico y numérico, arrojan resultados para el valor de la tensión de estirado que confirman la viabilidad técnica del proceso secuencial de estirado multi-etapa diseñado.

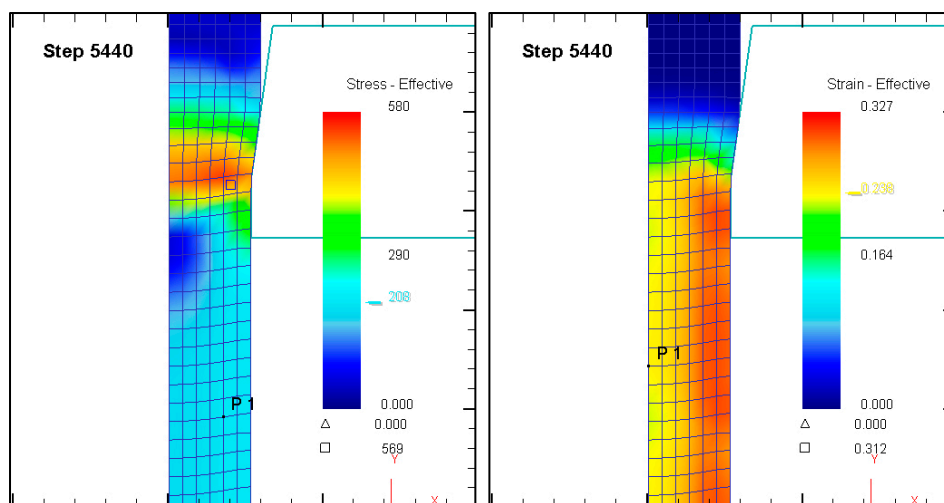


Figura 4.49 Tensiones-deformaciones trefilado de latón (etapa 13, con recocido,  $\alpha=8^\circ$ ).

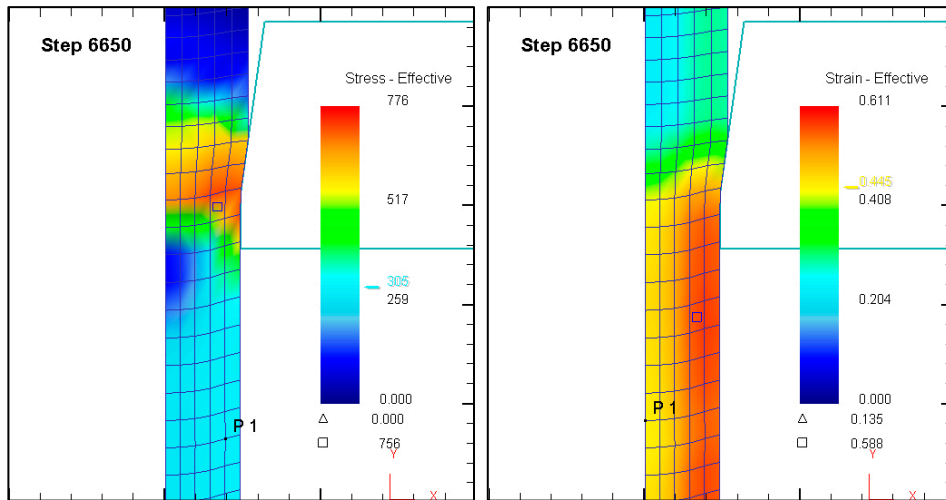


Figura 4.50 Tensiones-deformaciones trefilado de latón (etapa 16, sin recocido,  $\alpha=8^\circ$ ).

El punto de fluencia del metal a estirar se supera en la zona de deformación en el interior de la hilera, pero sin llegar al límite de rotura del mismo, tal y como reflejan los resultados en las simulaciones.

En la Figura 4.49 y en la Figura 4.50, correspondientes a las simulaciones de las etapas 13 y 16 respectivamente, se puede observar la influencia que tiene la ausencia de tratamiento de recocido y que se traduce en un incremento en el valor de la tensión de estirado en toda la sección del hilo a la salida de la hilera, además de una deformación efectiva acumulada cuando no se realiza un recocido del material previamente conformado plásticamente en frío.

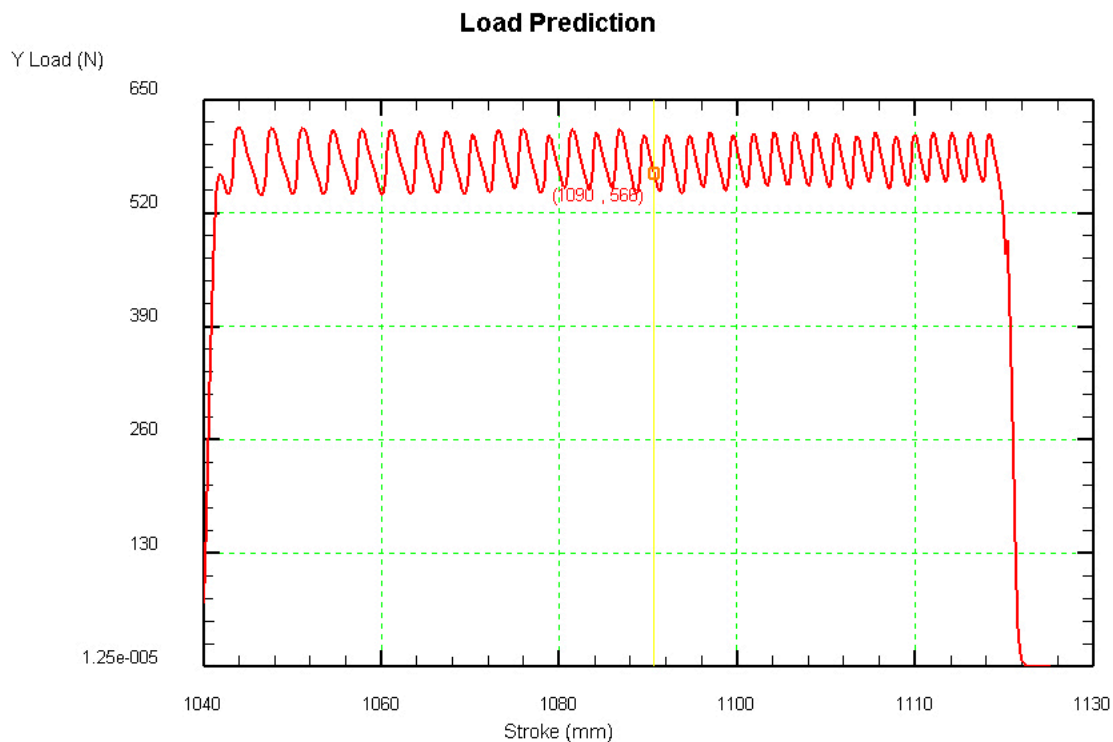


Figura 4.51 Carga vs desplazamiento, 13ª etapa trefilado latón ( $\Delta=2,50$ ,  $\mu=0,12$ ,  $\alpha=8^\circ$ ).

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

En la Figura 4.51 se representa el valor de la fuerza de estirado por unidad de desplazamiento o avance del metal a través de la hilera de estirado, dando el valor máximo efectivo  $F$  cuando se alcanza la velocidad constante del proceso.

Es evidente que, en todas aquellas etapas en las cuales no se aplicó recocido previo, el valor de la fuerza de estirado es mayor que en aquellas en las que se parte del latón recocido, aspecto que es consecuencia del endurecimiento producido durante el estirado.

La cantidad de recocidos afecta al número de etapas necesarias en las que se constituye la secuencia, mientras la distribución de estos en la secuencia de etapas va a condicionar las propiedades del producto final.

➤ **Supuesto nº3: Proceso de trefilado secuencial para  $\alpha=11^\circ$ ,  $L_c=0,35 \cdot d_f$ , considerando un factor delta óptimo  $\Delta=2,50$  para el diseño de la secuencia, a velocidad  $v_f=30$  m/s y  $\mu=0,12$  en seco.**

En la Tabla 4.55 se muestran los resultados obtenidos, a partir del análisis de las simulaciones realizadas con el software *Deform2D*, para los valores de tensión efectiva de estirado a la salida de la hilera, tensión máxima en la zona de deformación del metal en el interior de la hilera, así como el valor mínimo y máximo de la deformación efectiva en la sección transversal de la barra para cada una de las 13 etapas en las que se constituye en proceso secuencial de trefilado multi-etapa diseñado.

Tabla 4.55 Resultados obtenidos para el trefilado del latón (*Deform2D*,  $\Delta=2,50$ ,  $\mu=0,12$ ,  $\alpha=11^\circ$ ).

Etapa	$d_0$ [mm]	$d_f$ [mm]	Rec.	$\epsilon_{\text{efect.máx.}}$	$\epsilon_{\text{efect. P1}}$	$\sigma_{\text{efect.P1}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{efect.máx.}}$ [MPa]	$F$ [N]
1	8,00	6,87	SI	0,39	0,30	279	663	9950
2	6,87	5,90	SI	0,41	0,32	276	667	7600
3	5,90	5,06	SI	0,40	0,30	295	657	5490
4	5,06	4,34	SI	0,39	0,30	240	640	3670
5	4,34	3,72	SI	0,41	0,32	269	647	3040
6	3,72	3,19	SI	0,37	0,30	263	641	1990
7	3,19	2,74	SI	0,41	0,32	248	643	1640
8	2,74	2,35	SI	0,39	0,29	268	641	1140
9	2,35	2,02	SI	0,40	0,32	262	656	860
10	2,02	1,73	SI	0,39	0,29	243	628	580
11	1,73	1,48	SI	0,38	0,31	257	641	487
12	1,48	1,27	SI	0,37	0,29	264	637	328
13	1,27	1,20	NO	0,64	0,39	189	801	192

La Figura 4.52 presenta gráficamente la evolución de los valores de la tensión, considerando las diferentes zonas del material observadas en las simulaciones en cada etapa del proceso, así como los límites de fluencia calculados para cada etapa de la secuencia del proceso de trefilado multi-etapa previamente diseñado con *PullWorks*.

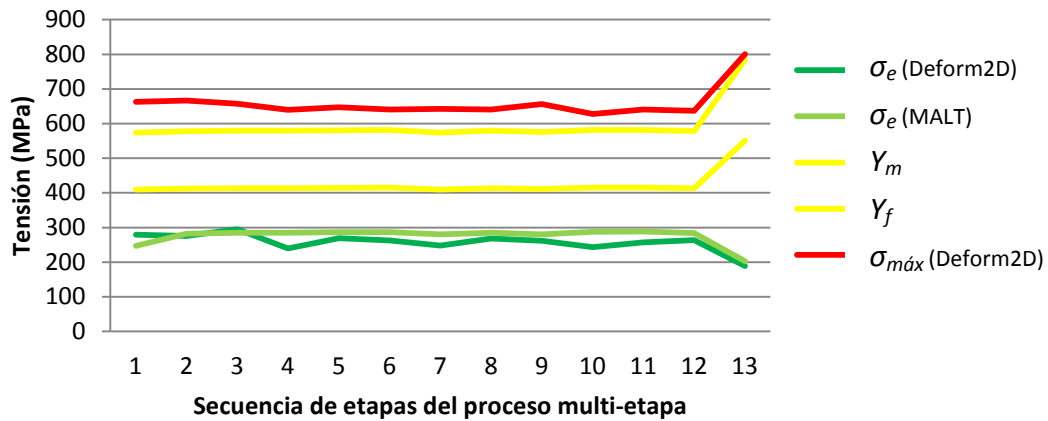


Figura 4.52 Gráfica de tensiones para el trefilado del latón (*Deform2D*,  $\Delta=2,50$ ,  $\mu=0,12$ ,  $\alpha=11^\circ$ ).

Los valores obtenidos para la tensión de estirado se mantienen siempre por debajo de los arrojados del simulador *Deform2D*. Este aspecto confirma la naturaleza de límite inferior que caracteriza al método de análisis de las tensiones locales, método utilizado en la aplicación desarrollada, frente al método numérico de análisis de elementos finitos que se implementa en las aplicaciones informáticas como *Deform2D*.

Se puede afirmar que esta secuencia de estirado multi-etapa es perfectamente viable desde el punto de vista tecnológico, ya que se evidencia que los valores de la tensión  $\sigma_e$  se mantienen siempre por debajo de los límites de fluencia del material deformado.

La tensión efectiva máxima  $\sigma_{m\acute{a}x}$  se alcanza en la zona de deformación y supera el valor establecido por el límite de fluencia. Esto se ha podido comprobar en las simulaciones de todas y cada una de las etapas de la secuencia diseñada, para valores del límite de fluencia que se han calculado según la expresión correspondiente a la ley de endurecimiento de *Ludwik-Hollomon* [Rowe, 1972], considerada en la metodología desarrollada e implementada en la aplicación *PullWorks*.

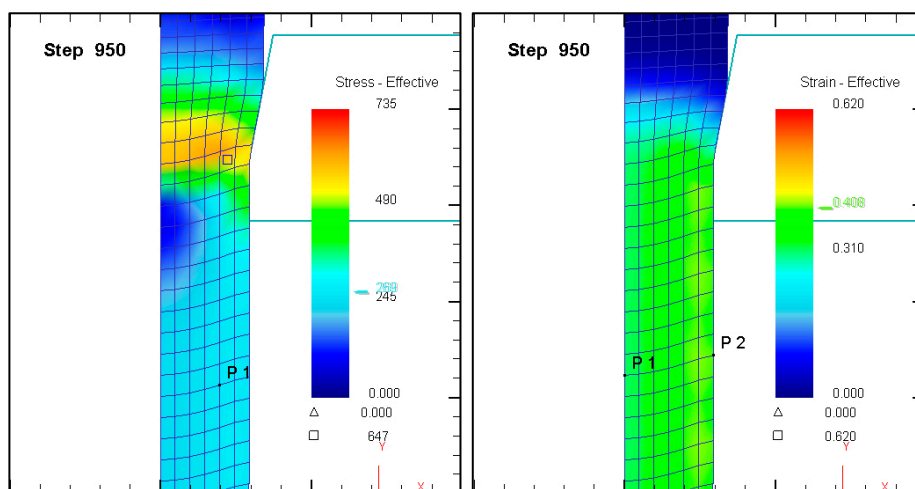


Figura 4.53 Tensiones-deformaciones trefilado de latón (etapa 5, sin recocido,  $\alpha=11^\circ$ ).

La Figura 4.53 muestra los resultados de una de las simulaciones realizadas con *Deform2D* y en ella se puede observar la distribución de tensiones en la zona de deformación en el interior de la hilera de estirado. En esta figura se aprecia que la tensión máxima se produce cerca de la zona de contacto, mientras que, una vez que el material sale transformado en su geometría y estructura, la distribución uniforme corresponde a la tensión efectiva de estirado aplicada a la salida.

La carga o fuerza de estirado es equivalente al producto entre la tensión de estirado que soporta todo el tramo de alambre existente a la salida de la hilera y el área del alambre obtenido. El valor efectivo de esta fuerza de estirado  $F$ , para una etapa concreta del proceso secuencial de estirado multi-etapa se alcanza cuando el proceso de estirado en dicha etapa llega a su velocidad máxima.

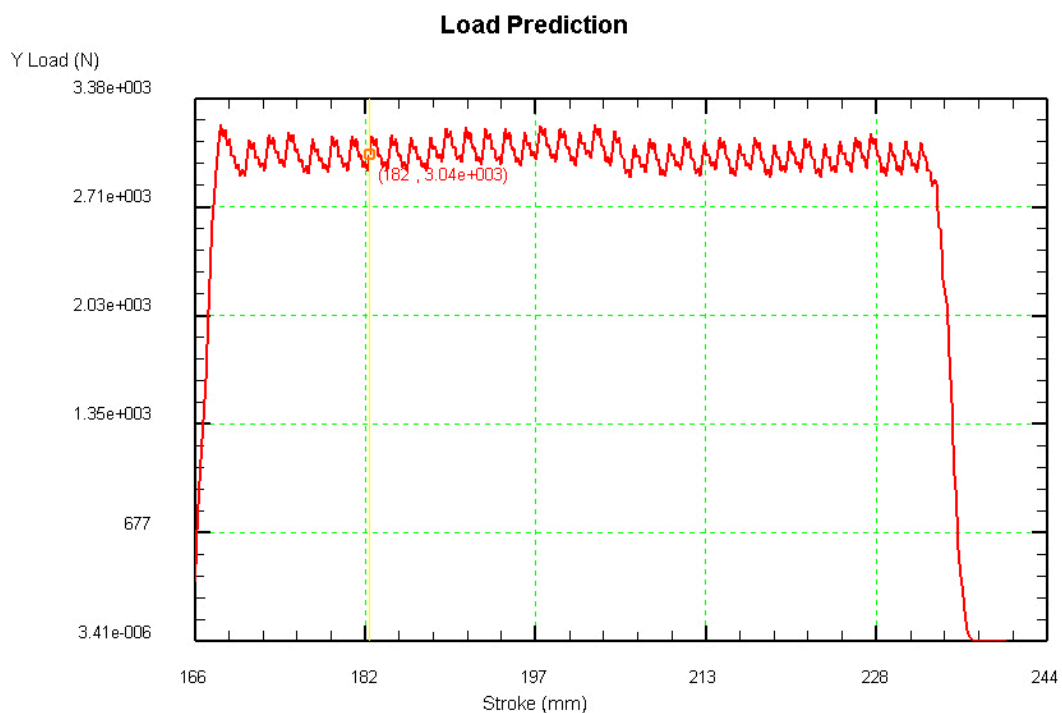


Figura 4.54 Carga vs desplazamiento, 5ª etapa trefilado latón ( $\Delta=2,50$ ,  $\mu=0,12$ ,  $\alpha=11^\circ$ ).

La Figura 4.54 muestra la evolución del valor de la fuerza de estirado correspondiente al estirado del tramo de alambre correspondiente a la 5ª etapa de la secuencia de estirado multi-etapa diseñada, desde que entra en la hilera hasta que sale de ella.

Ambos parámetros, velocidad y fuerza de estirado se mantienen constantes durante todo el proceso de estirado en cada etapa por separado. Esta condición se cumple en todas las etapas del proceso secuencial de estirado multi-etapa diseñado, de manera que este aspecto lo que lo caracteriza como proceso estacionario. En un proceso de este tipo, las condiciones de trabajo se mantienen constantes durante todo el tiempo en el que se realiza la transformación y se pueden realizar mediciones en cualquier instante del mismo.

#### **4.4.5 Discusión de los resultados obtenidos**

- En los tres supuestos estudiados ( $\alpha=5^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$  y  $\alpha=11^\circ$ ) se observa que, para el proceso multi-etapa diseñado, se incrementa el número de etapas de estirado necesarias considerando las mismas condiciones iniciales, a medida que el valor del semi-ángulo  $\alpha$  de las hileras empleadas se ve reducido.
- Se observa cómo, al reducirse el número de etapas necesarias, se requiere un mayor número de estaciones intermedias de recocido "on-line" para mantener el grado óptimo de deformabilidad y ductilidad del latón.
- Ha de tenerse en cuenta que se trata de una aleación de latón con un contenido relativamente alto de zinc, lo cual le confiere una buena ductilidad y maleabilidad en estado recocido. No obstante, este componente confiere un alto grado de endurecimiento por deformación en frío al latón.
- Si se comparan los resultados obtenidos en los valores de la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$  del documento de referencia [Sebastián, 2010], con los resultados arrojados tras aplicar la metodología propuesta en este trabajo, se observa una gran diferencia en cuanto al número de etapas en las que se constituye el diseño de ambos procesos de estirado multi-etapa.
- Considerando los resultados y el diseño obtenido por la metodología propuesta en el documento de referencia y comparándolo, por ejemplo, con el número de etapas obtenido en la secuencia diseñada con *PullWorks* para un semi-ángulo  $\alpha=11^\circ$ , se puede observar que se incrementa sensiblemente el número de etapas que son necesarias al considerar los efectos de rozamiento, deformación adicional y endurecimiento por deformación.
- Se puede afirmar que el método analítico utilizado en el documento de referencia, tanto para el diseño de la secuencia de etapas como para el análisis tecnológico de la misma, ofrece resultados que deben tomarse con mucha cautela, ya que este no considera diversos factores que, tal y como queda demostrado, tienen influencia en el proceso.
- La metodología propuesta en este trabajo considera la influencia de factores tan importantes como el efecto del rozamiento existente en la zona de deformación entre herramienta y material estirado, el semi-ángulo  $\alpha$  del cono de la hilera o el trabajo adicional debido a la distorsión interna acumulada en el metal como consecuencia de la deformación aplicada en el proceso.
- Los valores obtenidos para la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$ , presentados en el documento de referencia [Sebastián, 2010], son superiores en todas y cada una de las etapas a aquellos valores obtenidos para este mismo parámetro en las etapas de

la secuencias diseñadas en los tres supuestos estudiados para  $\alpha=5^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$  y  $\alpha=11^\circ$ . Se trata de diseños de secuencias con un número de etapas muy distinto.

- Para el método analítico propuesto en este trabajo y en base a los resultados obtenidos para el valor de la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$ , en el rango de valores del semi-ángulo  $\alpha$  estudiado, se puede afirmar que el valor de la tensión  $\sigma_e$  es mayor cuanto menor es el valor del semi-ángulo  $\alpha$  de las hileras empleadas, considerando un valor fijo del factor de forma  $\Delta$  en todos los supuestos estudiados.
- Es importante señalar que los efectos del semi-ángulo  $\alpha$  de la hilera y del ratio de reducción de la misma han de considerarse juntos, ya que estos afectan a la forma de la zona de deformación. Esta influencia viene dada en gran medida de una forma indirecta, ya que el valor del semi-ángulo  $\alpha$  influye directamente en el número de etapas que se obtendrá en el diseño de la secuencia.
- El semi-ángulo  $\alpha$  de la hilera de estirado tiene una influencia directa en la determinación del valor de la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$ , de manera que éste interviene de manera implícita en la expresión obtenida para el cálculo de esta tensión de estirado, expresión obtenida y ampliada a partir del análisis local de tensiones del sistema hilera-metal estirado.
- En número de etapas de la secuencia va a estar caracterizado por un mayor o menor ratio de deformación  $r$  por etapa. Este factor afecta de manera muy notable al proceso en cuanto al valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$  se refiere.
- Observando las características del producto final obtenido en el proceso secuencial de trefilado multi-etapa se puede ver cómo, para el primer supuesto ( $\alpha = 5^\circ$ ) constituido en 28 etapas en las que se intercala recocido "on-line" cada 8 etapas, se obtiene un producto final con un grado de deformación acumulada  $\varepsilon = 0,72$ .

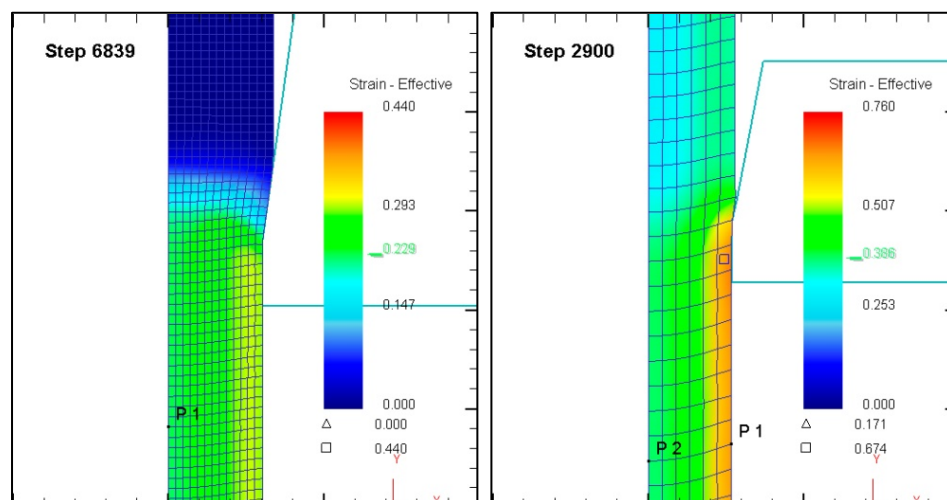


Figura 4.55 Distribución de deformaciones obtenida en el producto final estirado (latón C26000 o latón 70/30) para  $\alpha = 8^\circ$  (izquierda) y  $\alpha = 11^\circ$  (derecha).

- De la observación de la simulación en la última etapa de este diseño de 28 etapas (véase Figura 4.55) se deduce que producto final estirado presenta mayor dureza en la zona más cercana a la superficie en su sección. Esto implica un alto valor de resistencia a tracción y buena elasticidad. Estas características mecánicas lo hacen apto para la fabricación de muelles, resortes y de mallas o tejidos de alta resistencia.
- Si se analizan las características del producto final obtenido tras el proceso secuencial de trefilado multi-etapa diseñado en el tercer supuesto ( $\alpha = 11^\circ$ ) y constituido en 13 etapas, se observa que se ha requerido recocido "on-line" en todas y cada una de las etapas de la secuencia multi-etapa a excepción de la última, obteniéndose un producto de hilo de latón de sección circular de  $\varnothing 1,2$  mm que acumula un grado de deformación  $\varepsilon = 0,42$ .
- El producto obtenido, para  $\alpha = 11^\circ$ , presentará un grado de endurecimiento por deformación elevado. La distribución de deformaciones es menos uniforme en la sección del hilo obtenido, consecuencia de un semi-ángulo  $\alpha$  mayor en las hileras empleadas, en comparación con la distribución de deformaciones obtenida para valores de  $\alpha$  más pequeños. Esto se hace evidente en los resultados obtenidos con el software de análisis numérico *Deform2D*, para los procesos diseñados con  $\alpha = 8^\circ$  y  $\alpha = 11^\circ$ , resultados que se muestran en la Figura 4.55.
- El límite elástico del producto estirado en este último caso alcanza los 784,62 MPa y el grado de deformación máxima admisible del material está en torno al 45%, considerando el valor de su límite de rotura  $R_m$ .

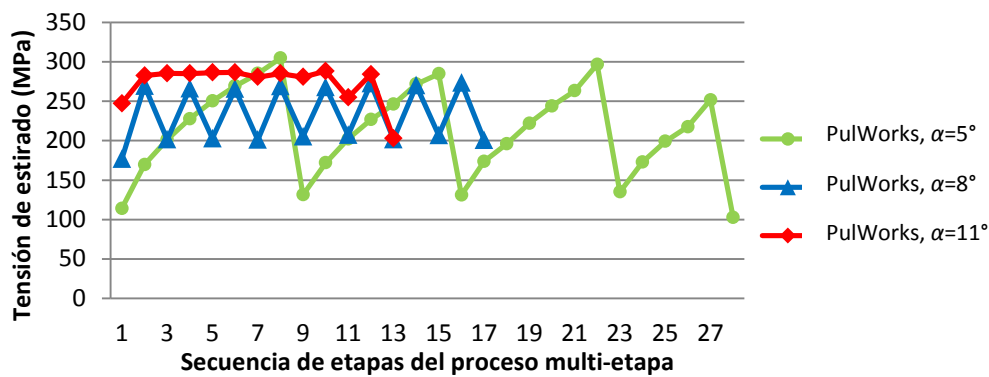


Figura 4.56 Evolución del valor de la tensión  $\sigma_e$  de estirado del latón C26000 para diferentes valores del semi-ángulo  $\alpha$  de la hilera (*PullWorks*).

- El valor de la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$  es muy estable en el proceso secuencial diseñado para hileras con semi-ángulo  $\alpha = 11^\circ$ , ya que se inician todas sus etapas a partir de un material previamente recocido, tal y como muestra la Figura 4.56.

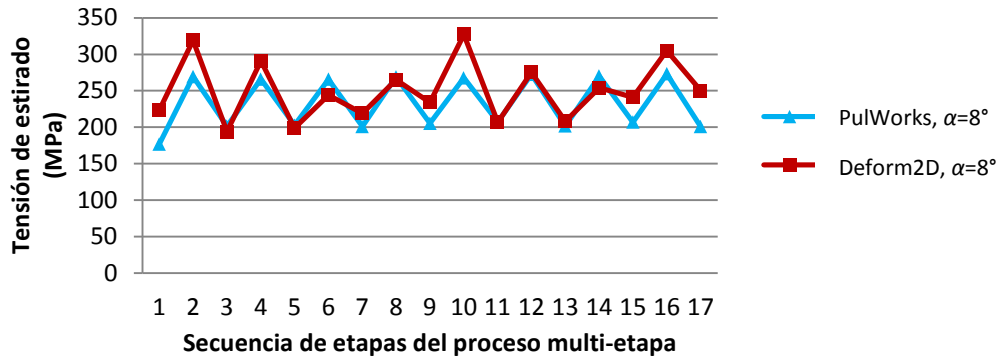


Figura 4.57 Valor de la tensión  $\sigma_e$  de estirado del latón C26000 para  $\alpha = 8^\circ$  (*PullWorks* vs *Deform2D*).

- En la Figura 4.57, se observa perfectamente cómo el tratamiento de recocido aplicado alternativamente entre etapas de la secuencia diseñada para  $\alpha = 8^\circ$ , hace que la tensión de estirado requerida en aquellas etapas realizadas tras recocido sea ostensiblemente inferior a la alcanzada en el resto de etapas.

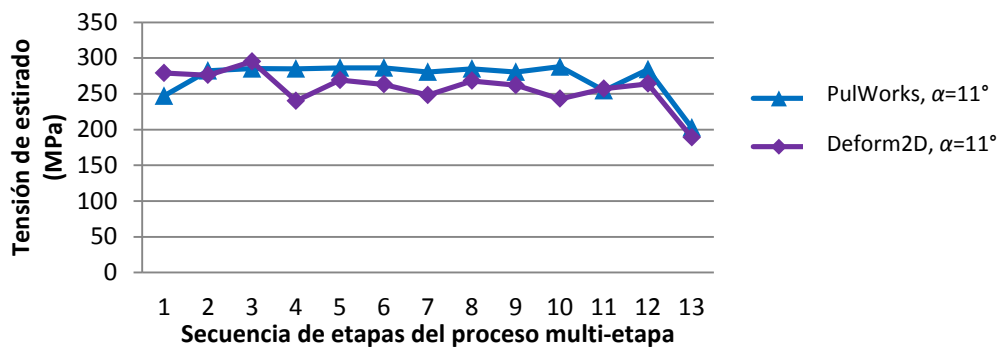


Figura 4.58 Valor de la tensión  $\sigma_e$  de estirado del latón,  $\alpha = 11^\circ$  (*PullWorks* vs *Deform2D*).

- Las gráficas de la Figura 4.57 y de la Figura 4.58 muestran la evolución de la tensión  $\sigma_e$ , en las secuencias diseñadas con hileras de semi-ángulo  $\alpha = 8^\circ$  y  $\alpha = 11^\circ$ , observándose buena correlación en los resultados obtenidos por ambos métodos.
- La evolución del valor de la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$ , obtenido a partir de las simulaciones realizadas con la herramienta de análisis numérico *Deform2D* para el diseño con semi-ángulo de hileras  $\alpha = 8^\circ$ , se mantiene siempre en valores ligeramente superiores a los obtenidos mediante la aplicación de la metodología fundamentada en el método analítico propuesto en el presente trabajo, como se observa en la gráfica de la Figura 4.57. No obstante, los valores obtenidos para esta tensión son muy similares en ambos casos.
- Para  $\alpha = 11^\circ$ , la evolución de la tensión efectiva de estirado obtenida según la herramienta de análisis numérico *Deform2D* se mantiene generalmente en valores ligeramente inferiores y muy similares a los obtenidos mediante la aplicación de la

metodología fundamentada en el método analítico propuesto en la presente tesis, tal y como se puede ver en la Figura 4.58.

- La Figura 4.59 presenta la evolución del valor de la potencia requerida en ambos casos, valor obtenido con la aplicación *PullWorks* desarrollada. Se observa que las potencias requeridas son ligeramente mayores para el proceso secuencial de trefilado multi-etapa diseñado con mayor semiángulo  $\alpha$  en el cono de las hileras de trefilado empleadas.

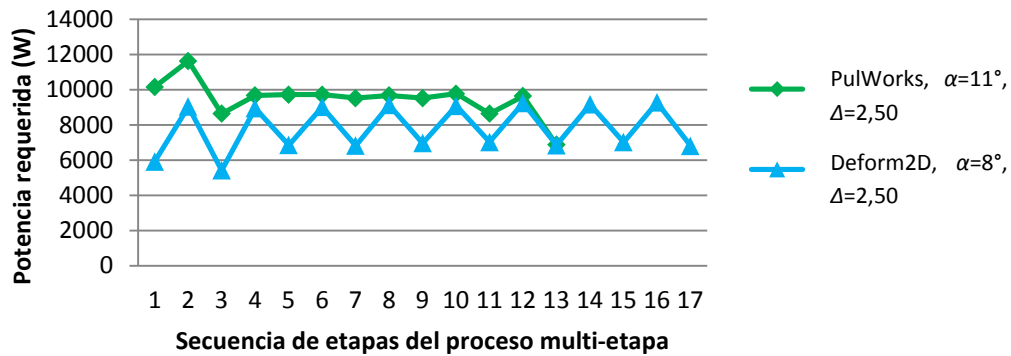


Figura 4.59 Potencia para el trefilado secuencial multi-etapa del latón C26000 (*PullWorks*).

#### 4.5 Estudio y análisis del proceso de trefilado de cobre *Cunext Copper Industries S.L.*

*Cunext Industries* es un grupo empresarial que se ha dedicado desde sus inicios, en 1917, a la transformación del cobre de la más alta calidad y que en la actualidad cuenta con instalaciones en Madrid, Barcelona, Oviedo, Vitoria y Córdoba.

La sociedad eligió Córdoba para su planta de producción, dada la proximidad geográfica de las explotaciones mineras ubicadas en Riotinto (Huelva). Su llegada significó la transformación de la industria cordobesa en torno a esta empresa, líder en el sector de los transformados del cobre. En la actualidad produce cobre electrolítico, latones, ferrosilíceos, materiales elaborados en plancha y productos trefilados.

En 1978 la empresa *Ibérica del Cobre, S.A.* se hizo cargo de la actividad de la planta, poniendo en funcionamiento una nueva línea de colada continua en 1984. Justo dos décadas más tarde, en 2004, es cuando ve la luz *Cunext Copper* (véase Figura 4.60).

*Cunext Copper Industries S.L.* toma las riendas de la producción de cobre trefilado y de la línea de colada continua, modernizando todos los medios y procedimientos de la compañía hasta convertirla en lo que es hoy en día: una empresa con años de experiencia, líder en el mercado de los productos del cobre estirado en Europa.



Figura 4.60 Factoría de *Cunext Copper Industries S.L.L.* en Córdoba.

(<http://www.cunext.com/>, 2016).

##### 4.5.1 Descripción del proceso productivo para el trefilado de cobre

Este proceso requiere de alambrión de cobre como materia prima, materia prima de propiedades mecánicas y dimensiones que permitan su procesamiento por estirado.

*Cunext Copper Industries S.L.* integra el proceso de obtención de dicho alambrión en sus propias instalaciones, para lo que utiliza cátodos de cobre electrolítico en forma de planchones. Estos planchones de cátodo de cobre electrolítico son la materia prima en la fusión, al inicio de la instalación en la planta de colada continua.

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

El cobre electrolítico se funde en un horno vertical, pasando ya en estado líquido a un horno de mantenimiento giratorio que suministra la cantidad necesaria a la máquina de colada horizontal. De esta sale una barra sólida que es laminada al pasar a través de un tren de laminación en caliente, constituido en doce pasos sucesivos, hasta transformarse en alambión de  $\varnothing 8$  mm. Finalmente, este alambión pasa por la cámara de decapado para eliminar los óxidos superficiales y se enrolla en bobinas de 5 Tm.

Los rollos de alambión, de una pureza de hasta el 99,99%, servirán como materia prima para el inicio de un posterior proceso de estirado secuencial multi-etapa.



Figura 4.61 Colada continua para la obtención de alambión.

(<http://www.cunext.com/>, 2016).



Figura 4.62 Colada continua y laminación en caliente "Contirod" (Cunext Copper Ind. S.L.).

El sistema de colada continua "Contirod" está totalmente optimizado para asegurar la más alta calidad del producto y se compone de un horno de fusión, un horno de retención, una máquina de colada de doble cinta y un tren de laminación continua, como se puede apreciar en el esquema de la Figura 4.61.

Todas las cajas de laminación cuentan con unidades de transmisión individuales y están equipadas con sistemas eléctricos y electrónicos de última generación para el control óptimo del proceso. Los sistemas de transmisión y ventiladores de la instalación están equipados con motores trifásicos de frecuencia variable, los cuales permiten un mínimo consumo de energía.

### Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

Los modernos sistemas eléctricos, combinados con el sistema de control automático del proceso aseguran una operación fiable y sin interrupciones, permitiendo obtener un producto de muy alta calidad, compactado y embalado de forma totalmente automática en bobinas de alambón.

La planta tiene una capacidad de fundición de 48 t/h. a una velocidad de colada de aproximadamente 10 m/min., siendo la medida estándar de alambón acabado los 8 milímetros de diámetro.

El proceso de estirado se inicia en unidades de trefilado equipadas con sistema de alimentación automática de alambón, estación de recocido final y sistema de enrollado; diseñadas para la producción de alambre en calidad de desbaste con diámetro final comprendido entre los 3,5 mm y los 1,60 mm (Figura 4.63).

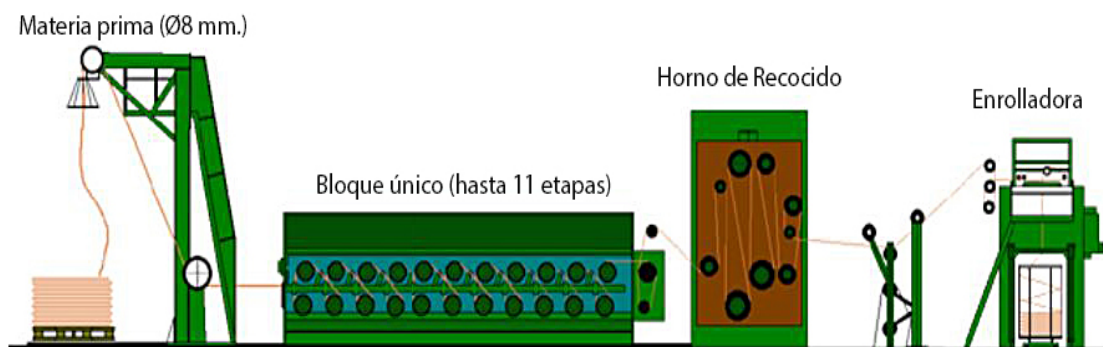


Figura 4.63 Unidad de trefilado de desbaste de alambre.

(<http://www.cunext.com/>, 2016).

El alambre de desbaste es el semi-elaborado, empleado como materia prima en las unidades de trefilado final. En éstas se parte generalmente de diámetro 2 mm y se transforma en hilo de cobre, hasta alcanzar el diámetro solicitado por el cliente, que puede ser de hasta Ø0,2 mm (Figura 4.64).

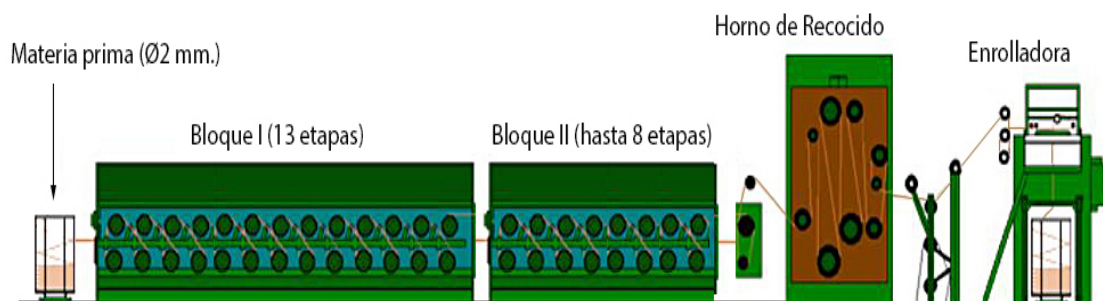


Figura 4.64 Unidad de trefilado de acabado de hilo de cobre.

(<http://www.cunext.com/>, 2016).

**4.5.2 Descripción del proceso de trefilado en desbaste**

La célula flexible de trefilado en desbaste de *Cunext Copper Industries S.L.* trabaja a partir de una bobina de alambroón de cobre de 8 mm de diámetro, obtenido mediante el proceso previo de colada-laminación continua, desenrollándolo y enderezándolo inicialmente para su correcta entrada en la trefiladora del fabricante *Niehoff*, en la que posteriormente se reducirá su sección mediante el trefilado secuencial multi-etapa.

En la Tabla 4.56 se muestran las configuraciones posibles que ofrece la máquina, partiendo siempre de alambroón de 8 milímetros de diámetro. Mediante la supresión selectiva de hileras de la 1ª y entre la 7ª y 10ª estaciones inclusive es posible conseguir diferentes diámetros de salida en el producto semi-elaborado:

Tabla 4.56 Secuencias en el desbaste mono-filar *Niehoff M85 (Cunext Copper Industries S.L.)*.

Nº	Elemento	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
1	∅ guía [mm]	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000
	∅ de trabajo [mm]	6,676	6,676	-	-	-	-
	Vueltas rodillo tractor	4	4	-	-	-	-
2	∅ guía [mm]	6,800	6,800	9,000	9,000	9,000	9,000
	∅ de trabajo [mm]	5,621	5,621	<b>6,676</b>	6,676	6,676	6,676
	Vueltas rodillo tractor	4	4	4	4	4	4
3	∅ guía [mm]	5,900	5,900	6,800	6,800	6,800	6,800
	∅ de trabajo [mm]	4,734	4,734	<b>5,621</b>	5,621	5,621	5,621
	Vueltas rodillo tractor	4	4	4	4	4	4
4	∅ guía [mm]	5,100	5,100	5,900	5,900	5,900	5,900
	∅ de trabajo [mm]	3,987	3,987	<b>4,734</b>	4,734	4,734	4,734
	Vueltas rodillo tractor	4	4	4	4	4	4
5	∅ guía [mm]	4,500	4,500	5,100	5,100	5,100	5,100
	∅ de trabajo [mm]	3,357	3,357	<b>3,987</b>	3,987	3,987	3,987
	Vueltas rodillo tractor	3	3	4	4	4	4
6	∅ guía	3,90	3,90	4,500	4,500	4,500	4,500
	∅ de trabajo	2,827	2,827	<b>3,250</b>	3,357	3,200	3,357
	Vueltas rodillo tractor	3	3	3	3	3	3
7	∅ guía [mm]	3,500	3,500	3,900	3,900	-	-
	∅ de trabajo [mm]	2,381	2,381	<b>2,730</b>	2,8277	-	-
	Vueltas rodillo tractor	3	3	3	3	-	-
8	∅ guía [mm]	3,20	3,20	3,60	3,60	-	-
	∅ de trabajo [mm]	2,121	2,121	<b>2,340</b>	2,519	-	-
	Vueltas rodillo tractor	3	3	3	3	-	-
9	∅ guía [mm]	3,000	3,000	-	-	-	-
	∅ de trabajo [mm]	1,890	1,890	-	-	-	-
	Vueltas rodillo tractor	2	2	0	0	0	0
10	∅ guía [mm]	2,800	2,800	-	-	-	-
	∅ de trabajo [mm]	1,780	-	-	-	-	-
	Vueltas rodillo tractor	2	-	-	-	-	-
11	∅ guía [mm]	-	-	-	-	-	-
	∅ de trabajo [mm]	1,625	1,780	<b>2,030</b>	2,273	2,640	3,050
	Vueltas rodillo tractor	3	3	4	4	5	7

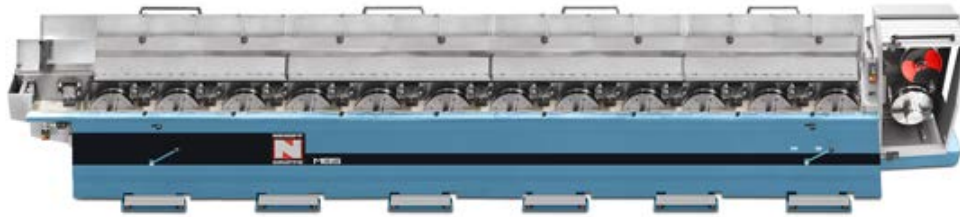


Figura 4.65 Trefiladora *Niehoff M85* (*Maschinenfabrik Niehoff GmbH & Co.*).

La máquina de trefilado *Niehoff M85* es una desbastadora mono-filar en línea (Figura 4.65) que tracciona el alambre mediante un principio de deslizamiento controlado y permite reducir el diámetro del alambro desde un diámetro inicial de 8 milímetros hasta un mínimo de 1,60 milímetros, en un máximo de 11 etapas.

La técnica de deslizamiento controlado consiste en ajustar la velocidad lineal en los rodillos, o cabrestantes de tracción, ligeramente por encima (en torno al 1%) de la velocidad lineal de salida real del hilo, en cada una de las etapas de la secuencia multi-etapa de trefilado. De esta manera se provoca un deslizamiento controlado en todos y cada uno de las bobinas de tracción, que compensa el incremento de longitud que tiene lugar en el hilo estirado como consecuencia de la reducción de sección correspondiente en todas y cada una de las etapas.

Este sistema, además de mantener la tensión en el alambre, implica una tensión de retroceso a la entrada de cada una de las etapas que va a ser función del número de vueltas alrededor del cabrestante inmediatamente anterior.

En la Tabla 4.56 se puede consultar, en color rojo y en negrita, la secuencia empleada habitualmente para obtener un diámetro de alambre en desbaste de 2 milímetros que posteriormente se empleará como materia prima en el proceso secuencial de trefilado multi-etapa de acabado. Esta es la secuencia que se estudiará más adelante aplicando la metodología propuesta en el presente trabajo.

En la Tabla 4.57 se muestra una caracterización de la secuencia multi-etapa empleada en para realizar la reducción desde los 8 milímetros hasta 2 milímetros de diámetro y en la cual no se aplica recocido intermedio “on-line” alguno:

Tabla 4.57 Secuencia de trefilado de desbaste del cobre (*Cunext Copper Industries S.L.*).

<b>Etapa</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$d_f$ [mm]	8,000	6,676	5,621	4,734	3,987	3,250	2,730	2,340	2,030	-	-
$\epsilon$	-	0,36	0,36	0,36	0,36	0,40	0,36	0,31	0,29	-	-
$\Delta\epsilon$	-	0,36	0,71	1,05	1,39	1,80	2,15	2,46	2,74	-	-
$\alpha$ [°]	-	18	18	18	18	18	18	18	18	-	-
$r$	-	0,30	0,30	0,30	0,30	0,33	0,30	0,27	0,25	-	-
$\Delta$	-	2,74	2,74	2,74	2,74	2,44	2,74	3,11	3,40	-	-
<b>Recocido</b>	-	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	-	-

*Cunext Copper Industries S.L.* utiliza hileras con núcleo de diamante policristalino y soporte de carburo de tungsteno para el proceso de desbaste que son suministradas por su proveedor de hileras de estirado *Esteves Group*, miembro de la multinacional holandesa *Diamond Tools Group* dedicada a la producción de todo tipo de herramientas de precisión en diamante y carburo de tungsteno (metal duro).

Según recomendaciones de su proveedor y utilizando el software para el diseño de hileras *Drawing Die Wizard* suministrado por este, *Cunext Copper* monta hileras con un ángulo total  $\alpha=18^\circ$  en el cono de reducción, siendo la longitud en la zona de calibración de la hilera igual a la mitad del valor del diámetro de salida  $L_c=0,50.d_f$  en todas las etapas de la secuencia multi-etapa en la cual se constituye el proceso de trefilado. Se aplica en torno al 21% de alargamiento/etapa en toda la secuencia de desbaste del cobre, desde  $\varnothing 8$  mm hasta  $\varnothing 2$  mm.

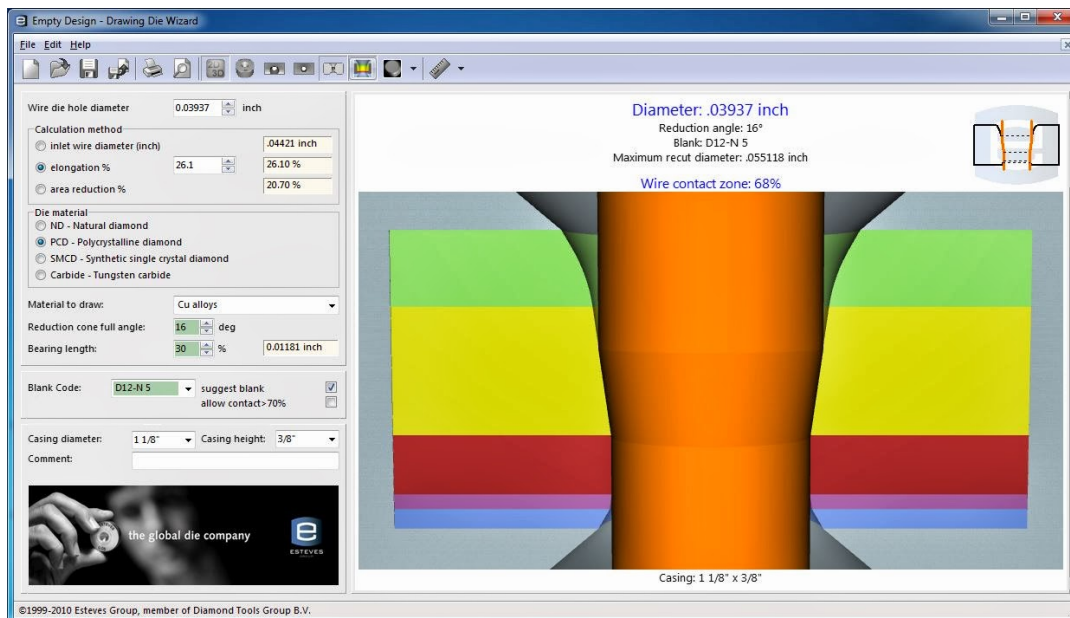


Figura 4.66 Interfaz del software de análisis y diseño de hileras *Drawing Die Wizard*.

(<http://www.estevesgroup.com/es/index.php>, 2016).

El software *Drawing Die Wizard*, cuya pantalla principal de muestra en la Figura 4.72, es una práctica aplicación informática que permite realizar la selección de una hilera y un estudio detallado de las condiciones de trabajo de ésta. Este programa es capaz de simular gráficamente el desgaste de la hilera, en las condiciones establecidas para su selección y diseño. El usuario debe indicar el metal que se a estirar, el material utilizado en la construcción de la hilera e introducir los valores de: diámetro de salida de la hilera, % de reducción de área a aplicar, ángulo principal del cono de reducción y longitud de calibración.

La célula flexible de trefilado en desbaste para el trefilado de desbaste secuencial multi-etapa instalada en *Cunext Copper Industries S.L.* continúa el proceso llevando el

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

alambre estirado, cuya sección se ha reducido hasta 2 milímetros de diámetro, a través de un horno de recocido “on-line” de tipo vertical modelo *R-501* de la marca *Niehoff*.

El proceso que tiene lugar dentro de este tipo de horno de recocido consiste en hacer pasar el cobre trefilado entre unas poleas sometidas a un elevado potencial eléctrico (poleas de paso), creando una corriente de cortocircuito en el mismo, incrementando la temperatura del hilo estirado gracias al denominado efecto Joule. Si se alcanza la temperatura adecuada, el cobre será recocido, recuperando de esta forma sus propiedades electromecánicas originales. La velocidad del hilo entre las dos poleas mencionadas va a ser determinante a la hora de poder controlar el resultado del tratamiento térmico al igual que el potencial eléctrico a que es sometido.

Una vez recocido, el cobre es estirado a una velocidad de producción  $v_f = 25$  m/s y es bobinado automáticamente en bobinas, que pueden ser de hasta 2500kg. En la Tabla 4.58 se presenta la gama de productos trefilados, así como de formatos de embalaje, que ofrece la empresa *Cunext Copper Industries S. L.* para el alambre o hilo de cobre.

Tabla 4.58 Gama de producto mono-filar trefilado de cobre (*Cunext Copper Industries S.L.*).

SECCIÓN DE PRODUCTO MONOFILAR [mm]				EMBALAJE	PESO [kg]
<0,30	0,30-0,75	0,75-1,30	>1,30		
√				BOBINA	25
	√			BOBINA	225
		√		BOBINA	500
		√	√	BOBINA	700
		√	√	BOBINA	2500
			√	CAJA	2250

El alambre semi-elaborado mediante el proceso de estirado secuencial multi-etapa hasta los 2 milímetros de diámetro, recocido y bobinado (véase Figura 4.67), se destina a la venta a otros fabricantes y, además, abastece los procesos de trefilado de acabado a diámetros inferiores que se desarrollan en *Cunext Copper Industries S.L.*, que se describen en el siguiente apartado.



Figura 4.67 Bobinador de alambre de cobre (*Cunext Copper Industries S.L.*).

**4.5.3 Descripción del proceso de trefilado en acabado**

El proceso de trefilado secuencial multi-etapa, mediante el cual se produce el hilo de cobre en un diámetro y calidad de acabado de entre 0,20 y 0,50 milímetros de diámetro, se realiza en una máquina trefiladora en línea de tipo multi-filar del fabricante *Sictra*. Generalmente, el proceso de trefilado de acabado que *Cunext Copper Industries S.L.* tiene en producción comienza a partir del alambre de cobre obtenido en el anterior proceso de trefilado en desbaste, con una sección circular de cobre de 2 milímetros de diámetro y que es recocido al final del proceso de desbaste.

Partiendo siempre de alambre recocido de 2 milímetros de diámetro en el sistema de acabado, que se describe en la Tabla 4.59 (apartados 1 y 2), permite conseguir los diferentes diámetros de salida en el producto final estirado. Se quitarán las hileras que no sean necesarias para la secuencia del proceso montando la hilera correspondiente al diámetro final deseado siempre en la posición de la última estación o etapa.

Tabla 4.59-1 Secuencias en el acabado multi-filar en la trefiladora *Sictra* (*Cunext Copper Industries S.L.*).

%R <sub>s</sub> Nº		Elemento	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>
BLOQUE I (Reducción de sección ≈ 25%).	1	Ø de trabajo [mm]	1,757	<b>1,757</b>	1,757	1,757	1,757	1,757	1,757	1,757	1,757	1,757
		Vueltas rodillo tractor		3								
	2	Ø de trabajo [mm]	1,550	<b>1,550</b>	1,550	1,550	1,550	1,550	1,550	1,550	1,550	1,550
		Vueltas rodillo tractor		3								
	3	Ø de trabajo [mm]	1,376	<b>1,376</b>	1,376	1,376	1,376	1,376	1,376	1,376	1,376	1,376
		Vueltas rodillo tractor		3								
	4	Ø de trabajo [mm]	1,226	<b>1,226</b>	1,226	1,226	1,226	1,226	1,226	1,226	1,226	1,226
		Vueltas rodillo tractor		3								
	5	Ø de trabajo [mm]	1,092	<b>1,092</b>	1,092	1,092	1,092	1,092	1,092	1,092	1,092	1,092
		Vueltas rodillo tractor		3								
	6	Ø de trabajo [mm]	0,973	<b>0,973</b>	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973
		Vueltas rodillo tractor		3								
	7	Ø de trabajo [mm]	0,867	<b>0,867</b>	0,867	0,867	0,867	0,867	0,867	0,867	0,867	0,867
Vueltas rodillo tractor			3									
8	Ø de trabajo [mm]	0,772	<b>0,772</b>	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	0,772	
	Vueltas rodillo tractor		3									
9	Ø de trabajo [mm]	0,687	<b>0,687</b>	0,687	0,687	0,687	0,687	0,687	0,687	0,687	0,687	
	Vueltas rodillo tractor		3									
10	Ø de trabajo [mm]	0,612	<b>0,612</b>	0,612	0,612	0,612	0,612	0,612	0,612	0,612	0,612	
	Vueltas rodillo tractor		3									
11	Ø de trabajo [mm]	0,545	<b>0,545</b>	0,545	0,545	0,545	0,545	0,545	0,545	0,545	0,545	
	Vueltas rodillo tractor		3									
12	Ø de trabajo [mm]	0,486	<b>0,486</b>	0,486	0,486	0,486	0,486	0,486	0,486	-	-	
	Vueltas rodillo tractor		2									
13	Ø de trabajo [mm]	0,433	<b>0,433</b>	0,433	0,433	0,433	0,433	0,433	0,433	-	-	
	Vueltas rodillo tractor		2									

**Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa**

Tabla 4.59-2 Secuencias en el acabado multi-filar en la trefiladora *Sictra*, continuación (*Cunext Copper Industries S.L.*).

BLOQUE II (Reducción de sección ≈ 19,23%)	20,77	14	∅ de trabajo [mm]	0,394	<b>0,394</b>	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	-	-	-	-
			Vueltas rodillo tractor		2									
	20,44	15	∅ de trabajo [mm]	0,359	<b>0,359</b>	0,359	0,359	0,359	0,359	0,359	-	-	-	-
			Vueltas rodillo tractor		2									
	21,27	16	∅ de trabajo [mm]	0,326	<b>0,326</b>	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	-	-	-	-
			Vueltas rodillo tractor		2									
	21,29	17	∅ de trabajo [mm]	0,296	<b>0,296</b>	0,296	0,296	0,296	-	-	-	-	-	-
			Vueltas rodillo tractor		2									
	21,08	18	∅ de trabajo [mm]	0,269	<b>0,269</b>	0,269	-	-	-	-	-	-	-	-
			Vueltas rodillo tractor		2									
	21,54	19	∅ de trabajo [mm]	0,244	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			Vueltas rodillo tractor											
	21,89	20	∅ de trabajo [mm]	0,221	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			Vueltas rodillo tractor											
	22,10	21	∅ de trabajo [mm]	0,200	<b>0,250</b>	0,252	0,261	0,268	0,303	0,404	0,413	0,502	0,512	
			Vueltas rodillo tractor		2									

Tabla 4.60 Secuencia de trefilado de acabado del cobre (*Cunext Copper Industries S.L.*).

Etapa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_f$ [mm]	2,000	1,757	1,550	1,376	1,226	1,092	0,973	0,867	0,772	0,687	0,612
$\epsilon$	-	0,259	0,250	0,238	0,230	0,231	0,230	0,230	0,232	0,233	0,231
$\Delta\epsilon$	-	0,259	0,509	0,747	0,978	1,210	1,441	1,671	1,903	2,137	2,368
$\alpha$ [°]	-	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
$r$	-	0,228	0,221	0,211	0,206	0,206	0,201	0,210	0,207	0,208	0,206
$\Delta$	-	3,53	3,54	3,57	3,58	3,58	3,59	3,57	3,57	3,57	3,58
Recocido	-	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Etapa	-	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$d_f$ [mm]	-	0,545	0,486	0,433	0,394	0,359	0,326	0,296	0,269	0,250	-
$\epsilon$	-	0,231	0,229	0,230	0,188	0,186	0,192	0,193	0,191	0,146	-
$\Delta\epsilon$	-	2,600	2,829	3,060	3,249	3,435	3,628	3,820	4,010	4,150	-
$\alpha$ [°]	-	12	12	12	12	12	12	12	12	12	-
$r$	-	0,206	0,204	0,206	0,172	0,169	0,175	0,175	0,174	0,136	-
$\Delta$	-	3,58	3,58	3,65	3,65	3,64	3,64	3,64	3,72	3,58	-
Recocido	-	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	-

En la Tabla 4.59, se señala (en rojo) la caracterización de la secuencia multi-etapa, definida para realizar la reducción desde los 2 milímetros hasta 0,25 milímetros de diámetro, en la cual no se aplica tratamiento de recocido intermedio “on-line” alguno. Las características de esta secuencia se presentan a continuación en la Tabla 4.60, de manera más detallada.

Tal y como se puede apreciar en la Tabla 4.59, la secuencia de trefilado se divide en dos bloques. El primer bloque de la máquina casi siempre completa todas sus estaciones, mientras que en el segundo bloque se van a quitar hileras, dejando estaciones vacías cuando se desee obtener un diámetro final estirado mayor de 0,20 milímetros.

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

Cunext Copper Industries S.L. realiza un proceso de trefilado secuencial multi-etapa multi-filar para el acabado del producto final a 0,25 milímetros de diámetro. El proceso se inicia partiendo de 8 bobinas de alambre de cobre recocido de  $\varnothing 2$  mm. Los 8 alambres alimentan la trefiladora multi-filar, la cual está equipada con 8 líneas que trabajan en paralelo con idéntico juego de 19 hileras.

Un primer bloque de trefilado, desde la etapa inicial hasta la etapa decimotercera, es accionado mediante un motor único que hace girar cada uno de los cabrestantes de tracción a una velocidad lineal un 1% superior a la velocidad lineal de salida del hilo estirado cada una de estas 13 estaciones. Mediante este sistema se consigue un efecto de deslizamiento cada uno de los cabrestantes inmediatamente anteriores a cada hilera, efecto que compensará el incremento de longitud que tiene lugar en el hilo estirado como consecuencia de la reducción de sección correspondiente en todas las etapas.

El objetivo es conseguir que el hilo no se combe antes de su entrada en cada una de las hileras, ya que si esto ocurre se producirán tirones en el alambre o hilo. La diferencia de velocidad entre cabrestantes consecutivos y el número de vueltas que el alambre o hilo se enrolla en cada cabrestante están calculados para que así sea.

En un segundo bloque de trefilado, el accionamiento se hace mediante un segundo motor que hace girar los cabrestantes de tracción desde la etapa 14 hasta la última, hilera que se monta siempre en la posición vigesimoprimera que corresponde al último cabrestante de la máquina. Al final de la línea, el proceso finaliza con el recocido del producto final trefilado (véase Figura 4.68).



Figura 4.68 Trefiladora Sictra TM-25 y horno de recocido (Cunext Copper Industries S.L.).

Los ocho cabrestantes de tracción de este segundo bloque también giran, cada uno de ellos, a una velocidad lineal en torno a un 1% superior a la velocidad lineal de salida del hilo estirado en todas y cada una de estas últimas estaciones con el propósito anteriormente descrito de mantener la tensión en el hilo a la entrada de todas las

## **Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa**

hileras gracias al efecto de deslizamiento que se produce en el cabrestante inmediatamente anterior, siendo la velocidad a la cual se obtendrá el producto final estirado o velocidad de producción  $v_f = 25$  m/s.

Según recomendaciones de su proveedor, y utilizando el software para el diseño de hileras *Drawing Die Wizard* suministrado por este, *Cunext Copper* monta hileras con un ángulo total  $\alpha=12^\circ$  en el cono de reducción y con longitud de calibración  $L_c=0,5.d_f$  en todas las etapas de la secuencia de trefilado de acabado, aplicando entre un 30% y un 20% de reducción de sección por etapa en las 19 etapas que constituyen la secuencia de acabado, desde los 2 milímetros de diámetro hasta  $\emptyset 0,25$  mm.

*Drawing Die Wizard* permite al usuario (véase Figura 4.69), a partir de la introducción de la información necesaria sobre la herramienta, el material a estirar, geometría, etc... realizar un estudio detallado de las condiciones de trabajo de dicha hilera e incluso simular el futuro desgaste de la misma.

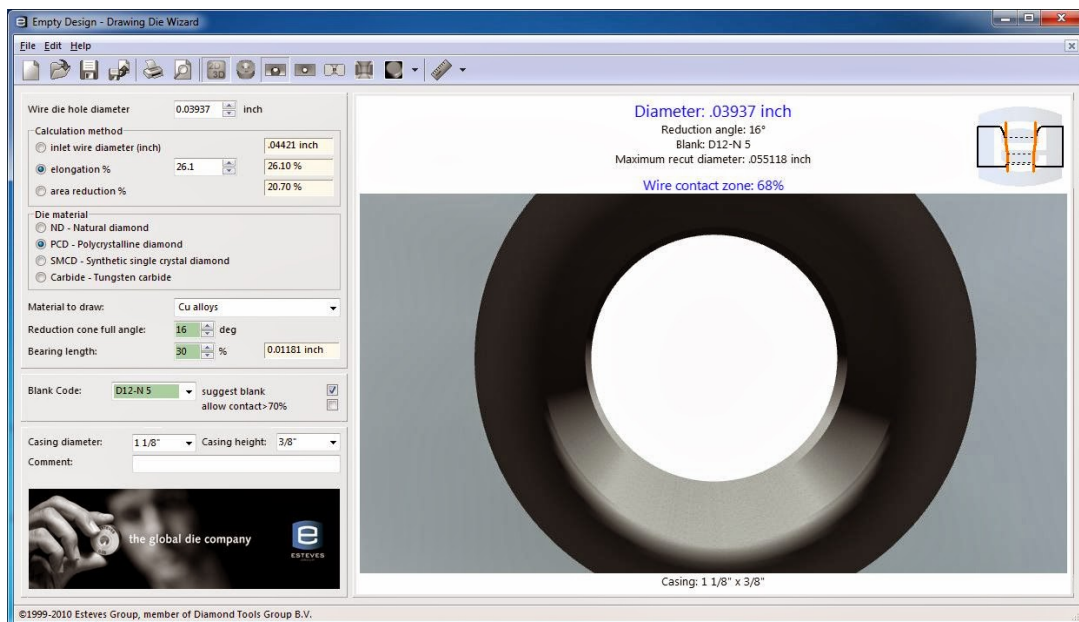


Figura 4.69 Vista del interior de la hilera de estirado en *Drawing Die Wizard*.

(<http://www.estevesgroup.com/es/index.php>, 2016).

Actualmente el uso de hileras de metal duro en el trefilado de cobre no se aconseja ya que ofrecen unas cualidades frente al desgaste muy inferiores a las de las de diamante y debido, fundamentalmente, a que las altas velocidades a las que permiten trabajar las modernas trefiladoras han hecho que las hileras de diamante sean indispensables para aumentar la productividad en el trefilado del cobre.

Generalmente el diamante policristalino puede utilizarse hasta 0,400 mm, mientras que las hileras de diamante monocristalino (natural o sintético) se emplean para tamaños inferiores o cuando se requiere una alta calidad de la superficie del producto final estirado.

#### **4.5.4 Caracterización del material empleado en el proceso de trefilado**

En los estudios previos realizados para los cinco casos anteriormente analizados en este capítulo, correspondientes al estirado secuencial multi-etapa de materiales como el acero, el latón, etc..., no ha sido considerado aún un factor tan importante como es la influencia del grado de deformación adquirido por el material durante la secuencia de estirado aplicada. En todos estos casos de verificación de la metodología propuesta se desconoce cómo evoluciona el valor de la tensión máxima de rotura  $\sigma_{UTS}$  y se ha implementado como valor límite el correspondiente al estado recocido del metal en todas y cada una de las etapas de las secuencias diseñadas en cada uno de los casos y supuestos estudiados.

La condición límite asumida va a exceder el límite inferior real en cada etapa de la secuencia, exceptuando la primera, ya que realmente este límite crece progresivamente como consecuencia del endurecimiento progresivo del metal. Es necesario, por tanto, conocer una función matemática que describa fielmente la evolución de dicho límite de rotura  $\sigma_{UTS}$  en función del grado de deformación aplicado.

La Figura 4.70, muestra la curva tensiones-deformaciones obtenida en el ensayo de tracción para un alambroón de Cu-ETP de  $\varnothing 8$  mm.

Tal y como se explica en el apartado sexto del capítulo segundo de este trabajo, el valor de las diferentes propiedades mecánicas de un metal va a evolucionar de manera notoria en función del grado de deformación aplicado.

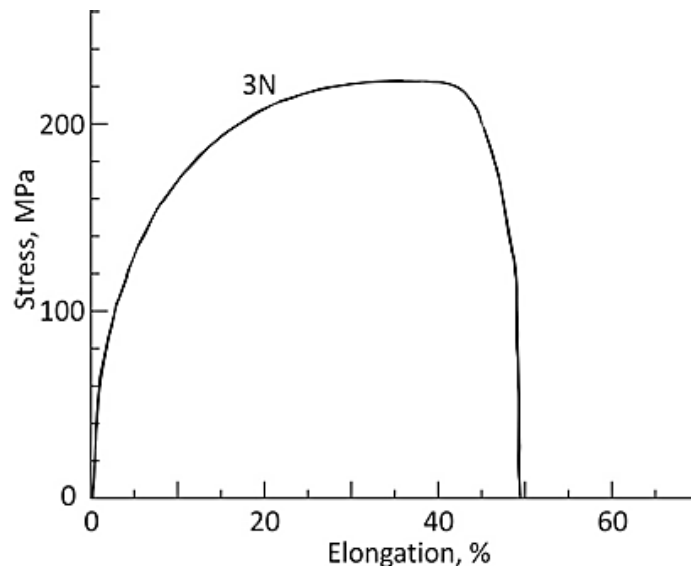


Figura 4.70 Curva tensión-deformación del Cu-ETP recocido,  $\varnothing 8$  mm [Fujiwara et al., 1993].

Se han realizado los correspondientes ensayos de tracción [UNE EN ISO 6892-1] para una serie de diámetros del alambre o hilo de cobre, representativos de una secuencia de estirado multi-etapa, para así conocer el comportamiento frente al endurecimiento

por deformación en frío de este metal. En la Figura 4.71, se muestran las gráficas correspondientes a los ensayos realizados en *Cunext Copper Industries S.L.*

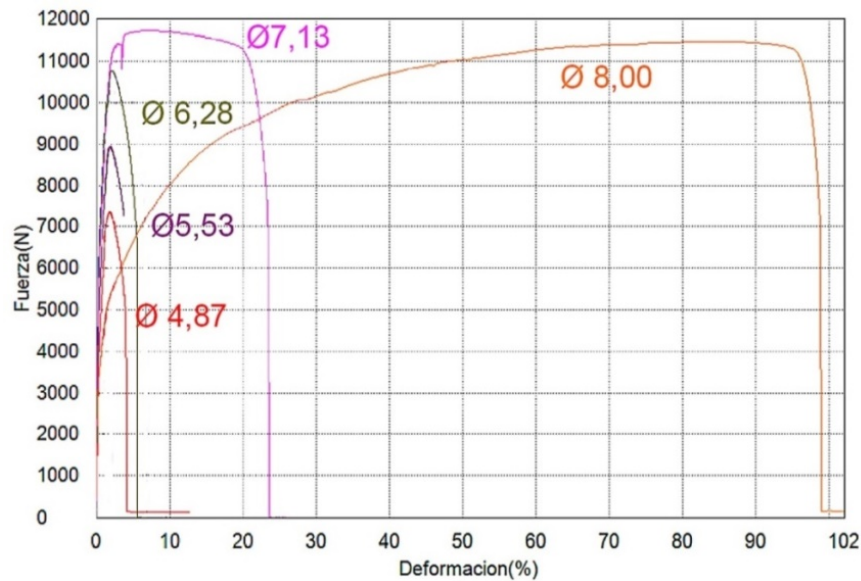


Figura 4.71 Resultados obtenidos en los ensayos de tracción (*Cunext Copper Industries S.L.*).

En la Tabla 4.61 y en la Tabla 4.62, se presentan los valores obtenidos para las tensiones límite de rotura  $\sigma_{UTS}$  y límite de fluencia  $\sigma_y$ , en los ensayos realizados en la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*, para muestras correspondientes a la secuencia representativa del estudio realizado a partir de un alambroón recocido de  $\varnothing 8$  mm.

Tabla 4.61 Valores obtenidos para  $\sigma_{UTS}$  en el ensayo de tracción del Cu-ETP1 trefilado.

$\varnothing_{medio}$ [mm]	$S$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$\sigma_{UTS}$ [MPa]	$\%R_s$	$\Delta\%R_s$
8,00	51,78	11450,7	231,260	0	0,000
7,13	39,98	11705,5	293,660	20,57	20,567
6,28	31,00	10763,6	349,720	22,42	38,378
5,53	23,97	8942,13	377,064	22,46	52,217
4,87	18,55	7354,54	399,730	22,45	62,942

Tabla 4.62 Valores obtenidos para  $\sigma_y$  en el ensayo de tracción del Cu-ETP1 trefilado.

$\varnothing_{medio}$ [mm]	$S$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$\sigma_y$ [MPa]	$\%R_s$	$\Delta\%R_s$
8,00	51,78	4227,32	84,10	0	0,000
7,13	39,98	10656,56	266,90	20,57	20,567
6,28	31,00	10473,83	338,14	22,42	38,378
5,53	23,97	8628,04	359,23	22,46	52,217
4,87	18,55	7443,24	399,59	22,45	62,942

No obstante, estos datos han resultado insuficientes para poder realizar un estudio gráfico de regresión que permita conocer la función matemática que representa la evolución de ambos límites mecánicos, al haber considerado el rango de deformación que abarca únicamente del 0% al 63% de reducción del área acumulada  $\Delta\%R_s$ .

En la Figura 4.72 y la Figura 4.73 se presentan sendos estudios de tendencia, obtenidos a partir de la serie de datos correspondientes a los ensayos de tracción realizados, para cobre Cu-ETP1 trefilado desde  $\varnothing 8$  mm hasta  $\varnothing 0,5$  mm. Estos son representativos para un rango de  $\Delta\%R_s$  que alcanza prácticamente el 100%, [Walcovicz, 2012]:

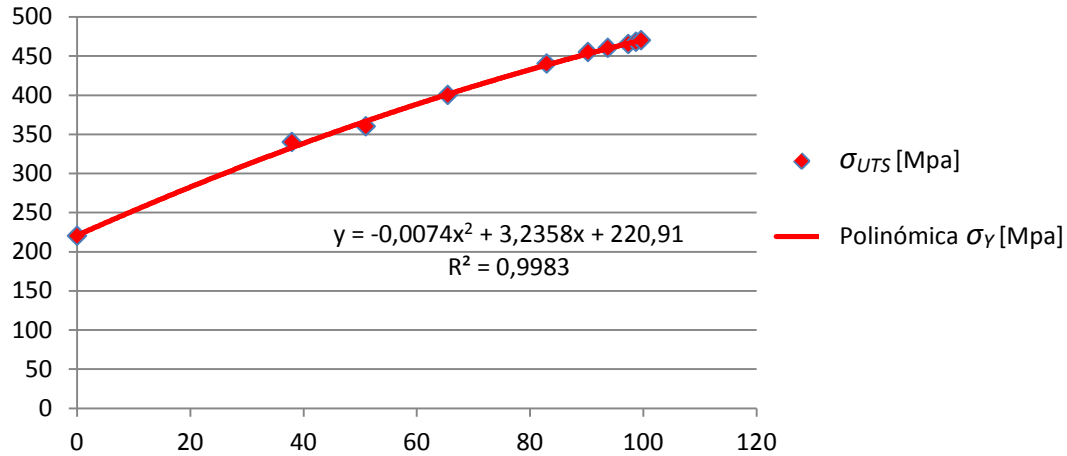


Figura 4.72 Grafica de regresión polinómica para valores obtenidos de  $\sigma_{UTS}$  vs.  $\Delta\%R_s$

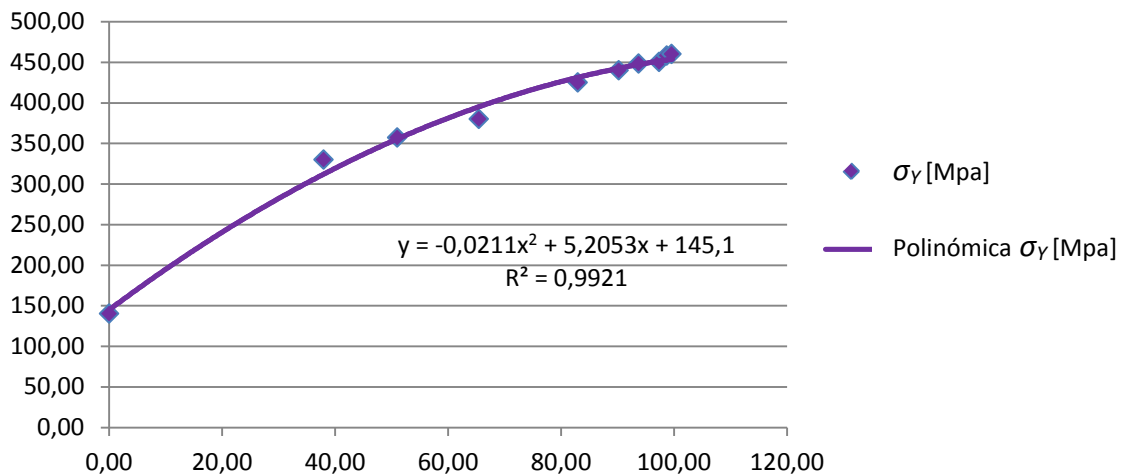


Figura 4.73 Grafica de regresión polinómica para valores obtenidos de  $\sigma_Y$  vs.  $\Delta\%R_s$

Tal y como se puede apreciar en las gráficas de la Figura 4.72, Figura 4.73 y Figura 4.74, la función de tipo polinómico es la que mejor representa la evolución de ambas propiedades mecánicas límite, tanto para la tensión límite de rotura  $\sigma_{UTS}$  como para la tensión límite de fluencia  $\sigma_Y$  en función del % de reducción de sección  $R_s$  acumulado en el alambre de cobre Cu-ETP1, que es conformado plásticamente en un proceso secuencial de estirado multi-etapa.

En la gráfica de la Figura 4.74, se puede ver cómo los valores de la tensión de rotura  $\sigma_{UTS}$  siempre están por encima de los correspondientes límite de fluencia  $\sigma_Y$ .

$$y = -0,0074x^2 + 3,2358x + 220,91 \text{ siendo } R^2 = 0,9983 \quad (4.1)$$

$$y = -0,0211x^2 + 5,2053x + 145,1 \text{ siendo } R^2 = 0,9921 \quad (4.2)$$

$$\sigma_{UTS}(\%R_s) = -0,0074 * (\%R_s)^2 + 3,2358 * \%R_s + 220,91 \quad (4.3)$$

$$\sigma_Y(\%R_s) = -0,0211 * (\%R_s)^2 + 5,2053 * \%R_s + 145,1 \quad (4.4)$$

$R^2$  es el coeficiente de determinación y se refiere a la proporción, entre cero y uno, de la variación que puede llegar a tener la variable “y” ( $\sigma_Y$  ó  $\sigma_{UTS}$ ), que es función de la variable “x” ( $R_s$ ). A mayor valor del coeficiente  $R^2$ , mejor será la predicción que representa la ecuación y, por lo tanto, se puede afirmar que las expresiones consideradas representan con gran fidelidad el comportamiento de las variables estudiadas, para este proceso y este material.

Las funciones (4.3) y (4.4) han sido implementadas en la aplicación informática *PullWorks*. Estas dos funciones representan la tendencia de las dos propiedades mecánicas fundamentales frente al  $\%R_s$  aplicado a medida que avanza el proceso, propiedades que son condiciones límite consideradas en la metodología propuesta para el estudio y análisis de los procesos secuenciales de estirado multi-etapa.

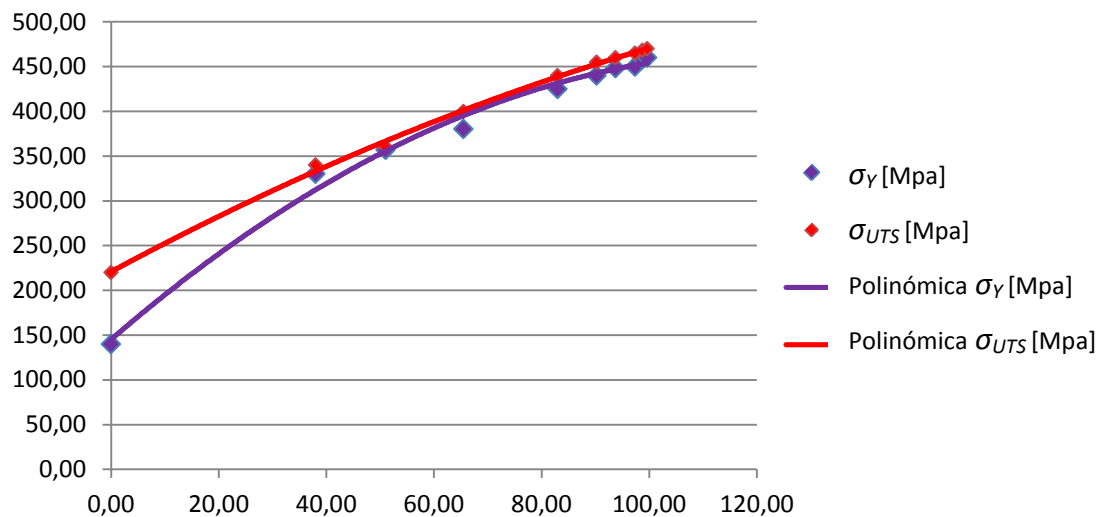


Figura 4.74 Grafica de regresión polinómica para las tensiones  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_{UTS}$  frente a  $\Delta\%R_s$

Estas expresiones describen la evolución del valor de ambas propiedades, a medida que el cobre es procesado en un estirado secuencial multi-etapa de forma que, gracias al este estudio, ha sido posible optimizar la metodología para diseño del proceso secuencial con los recocidos intermedios estrictamente necesarios, considerando el efecto que el endurecimiento tiene en las propiedades mecánicas del cobre como consecuencia de la deformación aplicada etapa tras etapa.

El cobre electrolítico puro Cu-ETP1 presenta una gran calidad con mínimas impurezas, una alta conductividad y un bajo riesgo de rotura en el proceso de estirado. Sus propiedades mecánicas en estado recocido y su composición química se presentan en la Tabla 4.63 y en la Tabla 4.64, respectivamente:

Tabla 4.63 Propiedades mecánicas Cu-ETP1 obtenido en la colada continua Contirod de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.* [Walcovicz, 2012].

Propiedad	Denominación	Valor
<i>E</i>	Módulo de Young	117000 [MPa]
<i>Y</i>	Límite de fluencia	140 [MPa]
<i>Rm</i>	Tensión de rotura	220 [MPa]
<i>C</i>	Coeficiente de resistencia a la deformación	255 [MPa]
<i>n</i>	Coeficiente de endurecimiento por deformación	0,26

Tabla 4.64 Composición química del cobre Cu-ETP1 C11000, [Fujiwara et al., 1993].

	Cu	S	As	Pb	Se	Ag	O	Sb	Bi	Te	Fe	Otros
% máx.	99,9	0,0015	0,0005	0,0005	0,0002	0,0025	0,04	0,0004	0,0002	0,0002	0,001	0,0065

#### 4.5.5 Condiciones tribológicas del proceso de trefilado del cobre en Cunext

Como se ha mencionado anteriormente, es importante indicar que en el proceso secuencial de trefilado multi-etapa de desbaste del cobre, desde los 8 mm hasta los 2 mm de diámetro, se emplearán hileras de diamante policristalino.

El diamante policristalino (*PCD*) ofrece un menor coeficiente de fricción que el diamante monocristalino (*MCD*) y el valor de este coeficiente va a ser tanto menor cuanto más fino sea el grado o calidad de sinterizado de la placa de *PCD*.

El diamante monocristalino, sin embargo, va a dar un mejor acabado superficial en la superficie del producto estirado y ofrece un coeficiente de rozamiento ligeramente superior al del diamante policristalino en las mismas condiciones de trabajo.

No obstante, ambos materiales, con base de diamante y comúnmente empleados en la construcción de hileras de estirado de materiales como el cobre, requieren de una buena lubricación, que *Cunext Copper Industries S.L.* aplica mediante lubricante de tipo graso emulsionado en agua, con el objetivo de conseguir una mejor calidad en el producto trefilado y mayor durabilidad de la hilera.

Tabla 4.65 Condiciones tribológicas para trefilado de cobre [Wright, 2011].

Proceso	Hileras	Lubricante	$\mu$
desbaste	diamante policristalino	emulsión	0,045
acabado	diamante monocristalino	emulsión	0,075

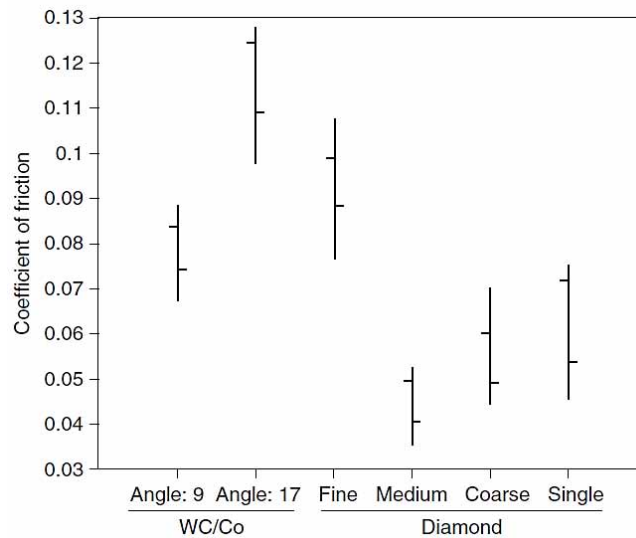


Figura 4.75 Influencia del material de la hilera en el valor del coeficiente de rozamiento para el estirado del cobre Cu-ETP [Wright, 2011].

En la Figura 4.75 y en la Tabla 4.65, se muestra el valor del coeficiente de fricción para el diamante policristalino y monocristalino, materiales comúnmente empleados en la fabricación de hilera de estirado de cobre [Baker et al., 1992] [Wright, 2011].

En *Cunext Copper Industries S.L.*, tanto en la máquina de desbaste como en la empleada para el acabado, el alambre de cobre se enrolla un número de vueltas determinado en cada cabrestante o rodillo de tracción. Estos rodillos son de carburo de tungsteno con un fino recubrimiento cerámico (óxido de zirconio) que mejora su resistencia al desgaste. Cabrestante, cobre y lubricante empleado forman un sistema tribológico secundario en el proceso de trefilado en este tipo de máquinas.

Cuando el hilo o alambre de cobre se mantiene en deslizamiento constante sobre la superficie del cabrestante o bobina de tracción, se produce una adhesión de partículas metálicas en la superficie de este creando un sistema tribológico combinado con características intermedias entre el tipo material cabrestante-cobre y el tipo cobre-cobre, sistema que implica unas condiciones de fuerte desgaste y un alto valor del coeficiente de fricción, en torno a  $\mu=0,40$  [ASM International Handbook Committee, 1992]. Se ha estimado que mediante una correcta lubricación en la superficie de contacto permite un coeficiente sobre  $\mu=0,10$  en los cabrestantes de tracción, para este tipo de materiales.

En las trefiladoras mono-filar *Niehoff M85* y multi-filar *Sictra TM-25*, tal y como se ha explicado en apartados anteriores, se consigue mantener una mínima tensión en el tramo de alambre entre cada hilera y el cabrestante inmediatamente anterior, gracias al efecto de deslizamiento del hilo enrollado sobre el cabrestante y sin necesidad de un sistema regulador de tensión, de manera que, en este tipo de máquinas, el valor de la tensión de retroceso es nulo en todas las etapas del proceso secuencial.

**4.5.6 Estudio de optimización del proceso secuencial de trefilado multi-etapa de desbaste**

Considerando todos los parámetros que caracterizan el proceso de trefilado secuencial multi-etapa de desbaste realizado en las instalaciones de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*, se ha realizado el estudio y análisis de un nuevo diseño de la secuencia de etapas del mismo, diseño obtenido utilizando la herramienta informática *PullWorks* desarrollada en esta tesis.

Como punto de partida para dicho estudio se ha tomado la de trefilado multi-etapa que se realiza para el desbaste en la empresa *Cunext Copper Industries S.L.* y que se presenta en la Tabla 4.66.

Tabla 4.66 Caracterización geométrica del trefilado de desbaste del Cu-ETP1 de *Cunext*.

<b>Etap</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b><math>d_f</math> [mm]</b>	8,000	6,676	5,621	4,734	3,987	3,250	2,730	2,340	2,030	-	-
<b><math>\epsilon_{efectiva}</math></b>	-	0,36	0,72	1,08	1,44	1,84	2,20	2,51	2,80	-	-
<b><math>\Delta\%R_s</math></b>	-	30,36	50,63	64,98	75,16	83,49	88,35	91,44	93,56	-	-
<b><math>\alpha</math> [°]</b>	-	18	18	18	18	18	18	18	18	-	-
<b><math>r</math></b>	-	0,30	0,30	0,30	0,30	0,33	0,30	0,27	0,25	-	-
<b><math>\Delta</math></b>	-	2,74	2,74	2,74	2,74	2,44	2,74	3,11	3,40	-	-

➤ **Diseño y estudio tecnológico de la secuencia de desbaste de *Cunext Copper Industries S.L.*, para  $\alpha=18^\circ$  y  $\Delta=2,80$  y realizado con la aplicación *PullWorks*.**

Para utilizar la aplicación *PullWorks* es necesario conocer las principales condiciones geométricas para la reducción secuencial multi-etapa que se desea realizar, las condiciones tribológicas en los sistemas hilera-cobre y cobre-cabrestante, las propiedades mecánicas y leyes de comportamiento frente al endurecimiento por deformación en frío del metal a procesar y su estado inicial, además de la velocidad de producción deseada del producto final trefilado a la salida de la última etapa.

Aplicando las condiciones iniciales del proceso, se ha obtenido un diseño, para la secuencia de etapas del proceso de trefilado multi-etapa, a partir de la metodología propuesta y con la aplicación *PullWorks* desarrollada para tal fin. Este diseño considera todas las condiciones y parámetros iniciales especificados para el proceso de trefilado en desbaste realizado en la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*

En el siguiente estudio se pretende diseñar un proceso secuencial de trefilado multi-etapa en desbaste, clonando las mismas condiciones de partida del proceso original realizado en *Cunext Copper Industries S.L.* con objeto de comparar la aproximación obtenida con *PullWorks* a la secuencia original de la máquina. Para ello se presentan a continuación los resultados de una primera aproximación obtenida para un juego de hileras con semiángulo único  $\alpha=18^\circ$  en todas ellas, con la ayuda de *PullWorks*,

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

aproximación que ha sido valorada y mejorada posteriormente utilizando un juego de hileras de diferentes ángulos.

En la Tabla 4.67 se presentan las condiciones iniciales para el primer supuesto de diseño que se pretende realizar.

Tabla 4.67 Resumen de las variables de entrada en *PullWorks* para el proceso de trefilado en desbaste del Cu-ETP1 (*Cunext Copper Industries S.L.*).

TIPO / DEFINICIÓN	VARIABLE	VALOR	UNIDAD
<b>GEOMÉTRICAS</b>			
Diámetro inicial de entrada	$d_0$	8,00	[mm]
Diámetro final del producto	$d_f$	2,00	[mm]
Semi-ángulo cono reducción (todas las hileras)	$\alpha$	18	[°]
Longitud de calibración (todas las hileras)	$L_c$	$0,5 \cdot d_f$	[mm]
Factor de forma (todas las hileras)	$\Delta$	2,80	-
<b>TRIBOLÓGICAS</b>			
Fricción hilera(PCD)-metal / emulsión	$\mu_{PCD-COBRE}$	0,045	-
Fricción cabrestante-metal / emulsión	$\mu_{WC-COBRE}$	0,10	-
Vueltas enrolladas / cabrestante	$n_b$	4 y 3	vueltas
Sistema regulador tensión backpull	-	-	-
<b>MATERIAL</b>			
Cobre electrolítico recocido (Cunext)	Cu-ETP1	Recocido	-
Límite de fluencia	$Y_0$	69 / Hollomon	[Mpa]
Tensión de rotura	$R_m$	221 / polinómica	[Mpa]
Resistencia a la deformación	$C$	255	[Mpa]
Endurecimiento por deformación	$n$	0,26	-
<b>PROCESO</b>			
Velocidad de producción	$v_f$	25	[m/s]

En la Figura 4.76 se ve que, para obtener los resultados deseados con la aplicación *PullWorks*, ha sido necesario asignar un valor constante  $\Delta=2,80$  para el factor de forma de las hileras a utilizar en la secuencia multi-etapa.

Etapa i	d0i [mm]	ε0i	Recocido	LÍMITE DEFORMACIÓN HOMOGÉNEA				REDUCCIÓN SECCIÓN		REDUCCIÓN RATIO		DEFORMACIONES		
				εf máx i	Δ ε máx i	d f min i [mm]	d f i [mm]	%R <sub>a</sub>	Δ %R <sub>a</sub>	r <sub>i</sub>	Δ r <sub>i</sub>	Δ ε i	ε f i	Δ
1	8	0	SI	1,54	1,54	3,70	6,41	35,80	35,80	0,36	0,36	0,44	0,44	2,80
2	5,41	0,44	NO	1,74	1,30	3,35	5,14	35,70	58,72	0,36	0,71	0,44	0,88	2,80
3	5,14	0,88	NO	2,09	1,21	2,81	4,12	35,75	73,48	0,36	1,07	0,44	1,32	2,80
4	4,12	1,32	NO	2,47	1,15	2,32	3,30	35,84	82,98	0,36	1,43	0,44	1,76	2,80
5	3,30	1,76	NO	2,88	1,12	1,85	2,64	36,00	89,11	0,36	1,79	0,45	2,21	2,80
6	2,64	2,21	NO	3,31	1,10	1,52	2,12	35,51	92,88	0,36	2,15	0,44	2,65	2,80
7	2,12	2,65	NO	3,74	1,08	1,23	2	11,00	93,75	0,11	2,26	0,12	2,77	2,80

Figura 4.76 Diseño de la secuencia de desbaste con *PullWorks* (*Cunext Copper Ind. S.L.*).

Los valores geométricos que caracterizan el diseño del nuevo proceso secuencial de trefilado en desbaste propuesto se pueden ver en la Tabla 4.68 y han sido obtenidos a

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

partir de los datos observados en la ventana mostrada en la Figura 4.76. Esta ventana muestra los resultados del cálculo de la secuencia de etapas del proceso realizados con la aplicación informática *PullWorks*.

Tabla 4.68 Caracterización geométrica del trefilado de desbaste del Cu-ETP1, *PullWorks*.

Etapa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_f$ [mm]	8,00	6,41	5,14	4,12	3,30	2,64	2,12	2,00	-	-	-
$\Delta\%R_s$	-	35,80	58,72	73,48	82,98	89,11	92,98	93,75	-	-	-
$\epsilon_{efectiva}$	-	0,44	0,88	1,32	1,76	2,21	2,65	2,77	-	-	-
$\alpha$ [°]	-	18	18	18	18	18	18	18	-	-	-
$r$	-	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,11	-	-	-
$\Delta$	-	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	10,79	-	-	-
Recocido	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	-	-	-

El objetivo de este nuevo diseño es obtener, mediante la aplicación *PullWorks*, una secuencia que mejore a la que se utiliza en la trefiladora de desbaste, modelo *Niehoff M85*, de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*

Tabla 4.69 Datos tecnológicos del trefilado de desbaste diseñado con *PullWorks* para *Cunext*.

Etapa	$d_o$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$F$ [N]	$P$ [W]
1	8,00	6,41	1,56	2,43	222,20	304,41	164,81	5318,77	12945,88
2	6,41	5,14	2,43	3,79	341,20	378,00	252,52	5239,74	19832,41
3	5,14	4,12	3,79	5,89	395,83	413,65	293,28	3909,89	23033,19
4	4,12	3,30	5,89	9,18	422,71	431,76	313,85	2684,40	24650,80
5	3,30	2,64	9,18	14,35	436,58	441,40	325,29	1780,60	25548,00
6	2,64	2,12	14,35	22,25	444,03	446,67	327,25	1155,15	25702,17
7	2,12	2,00	22,25	25,00	447,16	447,65	171,70	539,42	13485,56

Etapa	Tratamiento Recocido	Análisis Local cruz+ordh [MPa]	Retroceso cbp [MPa]	W redundante odi [MPa]	Calibración ocal [MPa]	Tensión Estirado $\sigma$ [MPa]	Fluencia media $Y_m$ [MPa]	Fluencia salida $Y_f$ [MPa]	Fuerza Estirado $F$ [N]	Potencia Estirado $P$ [W]
1	SI	108,7394	0	55,57835	0,499957	164,81778	222,20327	304,40655	5318,77	12945,88
2	NO	166,4072	0	85,34309	0,767707	252,51808	341,20322	377,99990	5239,74	19832,41
3	NO	193,3816	0	99,00588	0,890611	293,27813	395,82731	413,65473	3909,89	23033,19
4	NO	207,1742	0	105,7286	0,951086	313,85401	422,70506	431,75539	2684,40	24650,80
5	NO	215,1065	0	109,1982	0,982297	325,28708	436,57658	441,39778	1780,60	25548,00
6	NO	215,1855	0	111,0635	0,999076	327,24816	444,03398	446,67017	1155,15	25702,17
7	NO	58,85183	0	111,8451	1,006107	171,70308	447,15891	447,64765	539,42	13485,56

Figura 4.77 Datos tecnológicos del trefilado de desbaste diseñado con *PullWorks* para *Cunext*.

Para una velocidad de producción final  $v_f = 25$  m/s, la aplicación informática *PullWorks* permite calcular los valores de las diferentes variables tecnológicas del proceso, que se presentan en la en la Figura 4.77 y están reflejados en la Tabla 4.69.

Al no existir recocido intermedio en ninguna de las etapas de la secuencia diseñada, el valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$  se incrementa a medida que se avanza en el proceso multi-etapa, alcanzando su mayor valor en la penúltima etapa.

Representando gráficamente los valores de la tensión de estirado  $\sigma_e$  y las tensiones de fluencia  $Y_f$ , así como los correspondientes al límite de rotura  $R_m$  del cobre estirado, en la Figura 4.78, se aprecia la evolución de estos parámetros tecnológicos y el margen que aún se dispone para reducir el número de etapas de la secuencia sin recocidos.

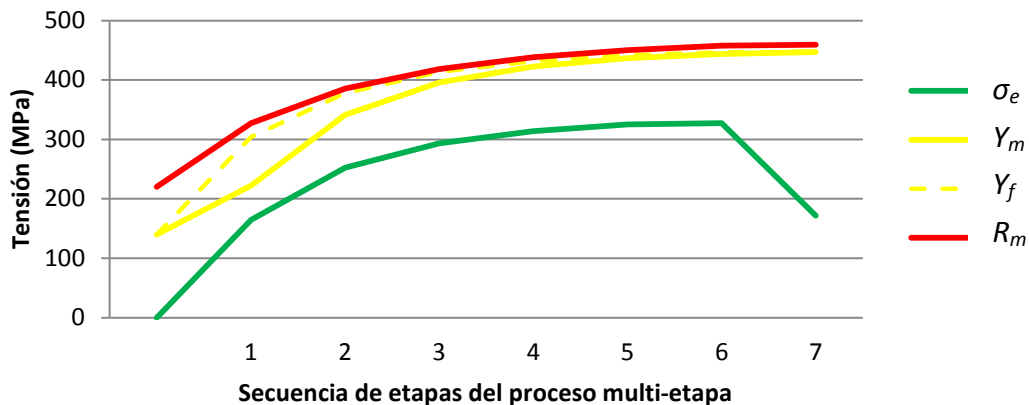


Figura 4.78 Gráfica de evolución de las tensiones principales en el proceso secuencial de trefilado multi-etapa en desbaste del Cu-ETP1 diseñado con *PullWorks*.

En la Figura 4.78, se deduce que es posible reducir el número de etapas de la secuencia de desbaste, de 11 a 7 etapas. El valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$  se mantiene bajo límites y su tendencia es creciente pero de forma suave y progresiva.

En estudios revisados se confirma que la ley de Hollomon no es siempre la que mejor representa el comportamiento real del metal frente al endurecimiento por deformación en frío aplicado, en el caso del cobre puro [Torres et al., 2004].

Para que la metodología desarrollada ofrezca los mejores resultados es necesario implementar una ley de endurecimiento precisa, que permita conocer de manera fiable la evolución de las propiedades mecánicas a medida que el metal es conformado en el proceso secuencial de estirado multi-etapa.

La mejor forma de conocer el comportamiento del metal y la evolución de sus propiedades durante el estirado es planteando un estudio experimental del material para definir la expresión matemática que representa la tendencia del valor de la tensión límite de fluencia de la forma más fiable, implementando esta expresión en la metodología propuesta.

Los datos tecnológicos del proceso diseñado se reflejan en la Tabla 4.69, mientras que en la Tabla 4.70 se muestra un desglose detallado de las distintas componentes que constituyen la tensión de estirado  $\sigma_e$ .

Tabla 4.70 Componentes de  $\sigma_e$  trefilado de desbaste diseñado con *PullWorks* para *Cunext*.

Etapa	$\sigma_{dh+roz}$ [MPa]	$\sigma_{bp}$ [MPa]	$\sigma_{di}$ [MPa]	$\sigma_{cal}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
1	108,74	0,00	55,58	0,50	164,82
2	166,41	0,00	85,34	0,77	252,52
3	193,38	0,00	99,01	0,89	293,28
4	207,17	0,00	105,73	0,95	313,85
5	215,11	0,00	109,20	0,98	325,29
6	215,19	0,00	111,06	1,00	327,25
7	58,85	0,00	111,85	1,01	171,70

➤ **Diseño y estudio tecnológico de la secuencia alternativa de desbaste de *Cunext Copper Industries S.L.*, realizado con la aplicación *PullWorks* considerando  $\alpha_{12}=18^\circ$ ,  $\alpha_{34}=16^\circ$ ,  $\alpha_{56}=14^\circ$ ,  $\alpha_{78}=12^\circ$  y  $\Delta=2,80$ .**

Se presenta el desarrollo del estudio realizado para conocer el diseño correspondiente a la propuesta de mejora de la secuencia de etapas para el proceso de trefilado secuencial multi-etapa de desbaste, en base a las condiciones de la Tabla 4.71:

Tabla 4.71 Resumen de las variables de entrada en *PullWorks* para el proceso de trefilado gemelo del desbaste del Cu-ETP1 (*Cunext Copper Industries S.L.*).

TIPO / DEFINICIÓN	VARIABLE	VALOR	UNIDAD
<b>GEOMÉTRICAS</b>			
Diámetro inicial de entrada	$d_0$	8,00	[mm]
Diámetro final del producto	$d_f$	2,00	[mm]
Semi-ángulo cono reducción	$\alpha_{12}$	18	[°]
Semi-ángulo cono reducción	$\alpha_{34}$	16	[°]
Semi-ángulo cono reducción	$\alpha_{56}$	14	[°]
Semi-ángulo cono reducción	$\alpha_{78}$	12	[°]
Longitud de calibración (todas las hileras)	$L_c$	$0,5 \cdot d_f$	[mm]
Factor de forma (todas las hileras)	$\Delta$	2,80	-
<b>TRIBOLÓGICAS</b>			
Fricción hilera(PCD)-metal / emulsión	$\mu_{PCD-COBRE}$	0,045	-
Fricción cabrestante-metal /emulsión	$\mu_{ZrO2-COBRE}$	0,10	-
Vueltas enrolladas / cabrestante	$n_b$	4 y 3	vueltas
Sistema regulador tensión backpull	-	-	-
<b>MATERIAL</b>			
Cobre electrolítico recocido ( <i>Cunext</i> )	Cu-ETP1	Recocido	-
Límite de fluencia	$Y_0$	69 / polinómica	[Mpa]
Tensión de rotura	$R_m$	221 / polinómica	[Mpa]
Resistencia a la deformación	$C$	255	[Mpa]
Endurecimiento por deformación	$n$	0,26	-
<b>PROCESO</b>			
Velocidad de producción	$v_f$	25	[m/s]

Puesto que el diseño obtenido en un primer supuesto, donde  $\alpha$  es constante en toda la secuencia de desbaste, ha dado un resultado algo inferior aunque muy similar en número de etapas a la secuencia del trefilado multi-etapa real realizado en las

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

instalaciones de *Cunext Copper Industries S.L.*, se ha creído conveniente realizar un nuevo diseño con intención de que éste se asimile mejor al real. En este segundo supuesto, lo que se persigue es diseñar una secuencia que se puede considerar geométrica y tecnológicamente equivalente a la secuencia real.

Para conseguir esta mejora se ha realizado un segundo estudio de diseño con la ayuda de la aplicación *PullWorks*, en la cual se implementa la metodología propuesta. En este caso se han considerado diferentes valores para el semi-ángulo  $\alpha$  de las hileras que se han de emplear en las etapas del proceso secuencial.

Considerando el aspecto señalado, el diseño optimizado de la nueva secuencia de etapas obtenida esta vez coincide en número de etapas con la secuencia del proceso real realizado en la planta productiva, tal y como se puede apreciar en los resultados que se muestran en la Figura 4.79 y que se presentan en la Tabla 4.72:

Tabla 4.72 Caracterización geométrica del trefilado alternativo del proceso secuencial de desbaste del Cu-ETP1 obtenida con *PullWorks* ( $\alpha$  variable).

Etapa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_f$ [mm]	8,00	6,41	5,14	4,22	3,46	2,91	2,45	2,11	2,00	-	-
$\Delta\%R_s$	-	35,80	58,72	72,17	81,29	86,77	90,62	93,04	93,75	-	-
$\epsilon_{efectiva}$	-	0,44	0,88	1,27	1,67	2,02	2,36	2,66	2,77	-	-
$\alpha$ [°]	-	18	18	16	16	14	14	12	12	-	-
$r$	-	0,36	0,36	0,33	0,33	0,29	0,29	0,26	0,10	-	-
$\Delta$	-	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	7,83	-	-
Recocido	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	-	-



Figura 4.79 Diseño alternativo realizado con *PullWorks* (trefilado desbaste,  $\alpha$  variable, *Cunext Copper Ind. S.L.*).

Para una velocidad de producción final  $v_f = 25$  m/s aplicada a la salida de la 8ª y última etapa, la aplicación *PullWorks* arroja los resultados que caracterizan tecnológicamente el proceso secuencial de trefilado multi-etapa diseñado. A continuación, la Figura 4.80 y la Tabla 4.73 muestran los resultados mencionados.

Etapa	Tratamiento Recocido	Análisis Local $\sigma_{dh+roz}$ [MPa]	Retroseso $\sigma_{bp}$ [MPa]	W redundante $\sigma_{di}$ [MPa]	Calibración $\sigma_{cal}$ [MPa]	Tensión Estirado $\sigma_e$ [MPa]	Fluencia media $Y_m$ [MPa]	Fluencia salida $Y_f$ [MPa]	Fuerza Estirado $F$ [N]	Potencia Estirado $P$ [W]
1	SI	115,2095	0	55,57835	0,833262	171,62118	222,20327	304,40685	5538,32	13480,27
2	NO	176,3209	0	85,34309	1,279512	262,94358	341,20322	377,99990	5456,07	20651,21
3	NO	186,4884	0	87,06719	1,479143	275,03476	394,43815	410,87641	3846,83	21599,97
4	NO	199,7894	0	92,67574	1,574424	294,03958	419,84643	428,81644	2764,71	23093,59
5	NO	185,3558	0	83,17576	1,625091	270,15671	433,35778	437,89911	1796,77	21218,06
6	NO	187,4174	0	84,58805	1,652685	273,65822	440,71602	443,53292	1290,12	21493,47
7	NO	170,7799	0	72,83733	1,669289	245,28656	445,14385	446,75479	857,69	19264,54
8	NO	61,29922	0	85,83278	1,677004	148,80901	447,20122	447,64765	467,50	11687,46

Figura 4.80 Datos tecnológicos del trefilado alternativo de desbaste diseñado con *PullWorks* para *Cunext* ( $\alpha$  variable).

Como se observa en la Tabla 4.73, el valor de la tensión  $\sigma_e$  necesaria para el estirado se va incrementando a medida que se avanza en el proceso multi-etapa, alcanzando su máximo en la última etapa. En esta última etapa, el cobre trefilado presenta su grado de deformación efectiva máximo en la secuencia sin recocidos.

Tabla 4.73 Datos tecnológicos del trefilado alternativo de desbaste diseñado con *PullWorks* para *Cunext* ( $\alpha$  variable).

Etapa	$d_o$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$F$ [N]	$P$ [W]
1	8,00	6,41	1,56	2,43	222,20	304,41	171,62	5538,32	13480,27
2	6,41	5,14	2,43	3,79	341,20	378,00	262,94	5456,07	20651,21
3	5,14	4,22	3,79	5,62	394,44	410,88	275,03	3846,83	21599,97
4	4,22	3,46	5,62	8,35	419,85	428,82	294,04	2764,71	23093,59
5	3,46	2,91	8,35	11,81	433,36	437,90	270,16	1796,77	21218,06
6	2,91	2,45	11,81	16,66	440,72	443,53	273,66	1290,12	21493,47
7	2,45	2,11	16,66	22,46	445,14	446,75	245,29	857,69	19264,54
8	2,11	2,00	22,46	25,00	447,20	447,65	148,81	467,50	11687,46

Tabla 4.74 Componentes de  $\sigma_e$  trefilado alternativo de desbaste diseñado con *PullWorks* para *Cunext* ( $\alpha$  variable).

Etapa	$\sigma_{dh+roz}$ [MPa]	$\sigma_{bp}$ [MPa]	$\sigma_{di}$ [MPa]	$\sigma_{cal}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
1	115,21	0,00	55,58	0,83	171,62
2	176,32	0,00	85,34	1,28	262,94
3	186,49	0,00	87,07	1,48	275,03
4	199,79	0,00	92,68	1,57	294,04
5	185,36	0,00	83,18	1,63	270,16
6	187,42	0,00	84,59	1,65	273,66
7	170,78	0,00	72,84	1,67	245,29
8	61,30	0,00	85,83	1,68	148,81

La Tabla 4.74 muestra un desglose de los valores de las distintas componentes de la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$ , valores obtenidos con la ayuda de la aplicación informática *PullWorks* desarrollada en este trabajo.

Representando gráficamente los valores de la tensión de estirado  $\sigma_e$  y de las tensiones de fluencia  $Y_f$  y límite de rotura  $R_m$  del cobre estirado se puede observar la evolución y tendencia que sigue cada uno de estos parámetros.

De los resultados obtenidos y reflejados en la Figura 4.81 se puede afirmar que las mejoras aplicadas en el diseño del proceso, obtenido mediante la aplicación *PullWorks*, son satisfactorias.

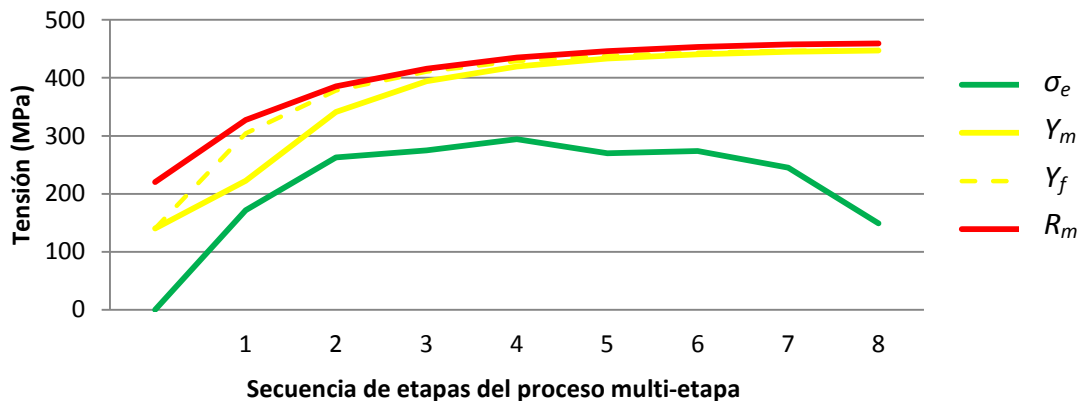


Figura 4.81 Gráfica de evolución de las tensiones principales en el proceso secuencial de trefilado multi-etapa en desbaste del Cu-ETP1 diseñado con *PullWorks*.

El proceso secuencial multi-etapa diseñado está constituido en 8 etapas de estirado sin recocidos intermedios, tal y como el diseño del proceso original realizado en la trefiladora *Niehoff M85* de la empresa. En este nuevo diseño se reduce ligeramente el valor de las tensiones en todas y cada una de las etapas.

➤ **Diseño optimizado y estudio tecnológico de la secuencia de desbaste de *Cunext Copper Industries S.L.*, realizado con la aplicación *PullWorks* considerando  $\alpha=18^\circ$  y  $\Delta=2,00$ .**

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el diseño geométrico y tecnológico de una tercera alternativa para la mejora del proceso de trefilado multi-etapa en desbaste. El objetivo de este nuevo análisis es el de conseguir una secuencia alternativa que optimice el proceso al máximo, reduciendo su número de etapas, con la única condición de continuar evitando la necesidad de recocidos intermedios. Se establece un valor único  $\alpha=18^\circ$  para todas las hileras de estirado y un factor  $\Delta=2$ , con el fin de optimizar el diseño.

El estudio, realizado para conocer el diseño correspondiente a la propuesta de mejora de la secuencia de etapas para el proceso de trefilado secuencial multi-etapa de desbaste de la empresa *Cunext Copper Industries, S.L.*, se ha desarrollado en las condiciones indicadas en la Tabla 4.75:

**Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa**

Tabla 4.75 Resumen de las variables de entrada en *PullWorks* para el proceso de trefilado optimizado para desbaste del Cu-ETP1 (*Cunext Copper Industries S.L.*).

TIPO / DEFINICIÓN	VARIABLE	VALOR	UNIDAD
<b>GEOMÉTRICAS</b>			
Diámetro inicial de entrada	$d_0$	8,00	[mm]
Diámetro final del producto	$d_f$	2,00	[mm]
Semi-ángulo cono reducción	$\alpha$	18	[°]
Longitud de calibración (todas las hileras)	$L_c$	$0,5 \cdot d_f$	[mm]
Factor de forma (todas las hileras)	$\Delta$	2,00	-
<b>TRIBOLÓGICAS</b>			
Fricción hilera(PCD)-metal / emulsión	$\mu_{PCD-COBRE}$	0,045	-
Fricción cabrestante-metal / emulsión	$\mu_{ZrO2-COBRE}$	0,10	-
Vueltas enrolladas / cabrestante	$n_b$	4 y 3	vueltas
Sistema regulador tensión backpull	-	-	-
<b>MATERIAL</b>			
Cobre electrolítico recocido (Cunext)	Cu-ETP1	Recocido	-
Límite de fluencia	$Y_0$	69 / polinómica	[Mpa]
Tensión de rotura	$R_m$	221 / polinómica	[Mpa]
Resistencia a la deformación	$C$	255	[Mpa]
Endurecimiento por deformación	$n$	0,26	-
<b>PROCESO</b>			
Velocidad de producción	$v_f$	25	[m/s]

Considerando los datos de entrada indicados se consiguió un diseño optimizado para la secuencia de desbaste, tal y como se puede apreciar en los resultados que se muestran en la Figura 4.7982 y presentados en la Tabla 4.72.



Figura 4.82 Diseño optimizado con *PullWorks* (trefilado desbaste, *Cunext Copper Ind. S.L.*).

Tabla 4.76 Caracterización geométrica del trefilado optimizado del proceso secuencial de desbaste del Cu-ETP1 obtenida con *PullWorks*.

Etapa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_f$ [mm]	8,00	5,86	4,29	3,14	2,30	2,00	-	-	-	-	-
$\Delta \%R_s$	-	46,34	71,24	84,59	91,73	93,75	-	-	-	-	-
$\epsilon_{efectiva}$	-	0,62	1,24	1,86	2,48	2,76	-	-	-	-	-
$\alpha$ [°]	-	18	18	18	18	18	-	-	-	-	-
$r$	-	0,46	0,46	0,46	0,46	0,24	-	-	-	-	-
$\Delta$	-	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	-	-	-	-	-
Recocido	SI	NO	NO	NO	NO	NO	-	-	-	-	-

Etapa i	Tratamiento Recocido	Análisis Local $\sigma_{z+dH}$ [MPa]	Retroceso obp [MPa]	W redundante odi [MPa]	Calibración local [MPa]	Tensión Estirado $\sigma$ [MPa]	Fluencia media $Y_m$ [MPa]	Fluencia salida $Y_f$ [MPa]	Fuerza Estirado $F$ [N]	Potencia Estirado $P$ [W]
1	SI	163.3320	0	60.15702	0.541144	224.03017	240.50888	341.01777	6042.17	17594.79
2	NO	255.0678	0	93.77969	0.843599	349.69112	374.93292	408.84807	5054.64	27466.90
3	NO	287.0236	0	105.4636	0.948702	393.43598	421.64558	434.44310	3046.66	30899.25
4	NO	298.6543	0	109.9904	0.989423	409.63418	439.74371	445.04431	1701.93	32173.36
5	NO	139.3293	0	111.6418	1.004278	251.97542	446.34598	447.64765	791.61	19790.15

Figura 4.83 Parámetros tecnológicos del trefilado optimizado de desbaste (Cunext Copper Industries S.L.).

En la figura Figura 4.83 se muestra la ventana de *PullWorks* en la que se pueden consultar los resultados del análisis tecnológico de la secuencia diseñada. Estos resultados se desglosan a continuación, en la Tabla 4.77:

Tabla 4.77 Parámetros tecnológicos del trefilado optimizado del Cu-ETP (Cunext Copper Industries S.L.).

Etapa	$d_o$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$F$ [N]	$P$ [W]
1	8,00	5,86	1,56	2,91	240,51	341,02	224,03	6042,17	17594,79
2	5,86	4,29	2,91	5,43	374,93	408,85	361,83	5054,64	27466,90
3	4,29	3,14	5,43	10,14	421,65	434,44	412,39	3046,66	30899,25
4	3,14	2,30	10,14	18,90	439,74	445,04	430,97	1701,93	32173,36
5	2,30	2,00	18,90	25,00	446,35	447,65	295,61	791,61	19790,15

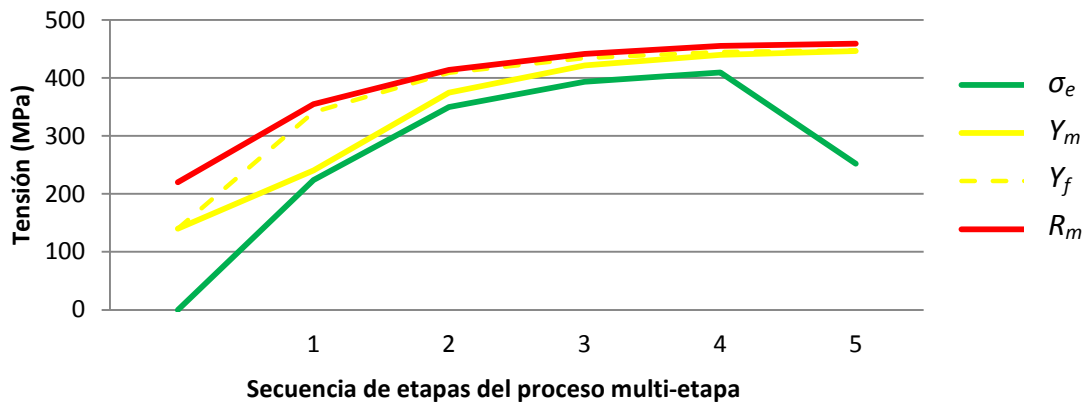


Figura 4.84 Representación gráfica de los parámetros tecnológicos en el trefilado secuencial multi-etapa de desbaste optimizado.

En la gráfica de la Figura 4.84, se aprecia que la tensión de estirado  $\sigma_e$  no supera los límites de deformabilidad del cobre, establecidos en los valores de  $Y_f$  y  $R_m$  para cada una de las 5 etapas del diseño optimizado que se propone con *PullWorks*. Esto indica que la secuencia diseñada es viable, ya que no se producirá la rotura aún no habiendo sido necesario recocido intermedio alguno en todo el proceso de trefilado secuencial multi-etapa. El proceso secuencial de trefilado multi-etapa de desbaste de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.* podría mejorarse, reduciendo la secuencia de 8 a 5 etapas, con el consiguiente ahorro de hileras necesarias para realizar la reducción.

A continuación se ha planteado el estudio mediante el MEF, con objeto de confirmar la viabilidad del diseño y verificar la validez de los valores obtenidos en la tensión de estirado efectiva  $\sigma_e$  mediante la aplicación informática *PullWorks* propuesta en esta tesis. Más adelante se han comparado los resultados obtenidos por ambos métodos para poder evaluar la sensibilidad de la metodología propuesta en este trabajo.

Para realizar este análisis se ha empleado la aplicación informática *Deform2D*. Para ello se consideran las condiciones descritas anteriormente, para los procesos de trefilado secuencial multi-etapa de desbaste de los diseños analizados en los apartados anteriores. Se han comparado los resultados obtenidos por una y otra metodologías, verificando la viabilidad de ambos diseños y evaluando la fiabilidad de la metodología propuesta en esta tesis.

Es importante señalar que, para todas las simulaciones numéricas realizadas y ante la imposibilidad de implementar en *Deform2D* la expresión obtenida del análisis de material, presentado en el apartado correspondiente de este estudio, se ha considerado que el alambión de cobre electrolítico Cu-ETP1, empleado como materia prima para el trefilado en la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*, presenta un comportamiento frente al endurecimiento por deformación plástica en frío descrito por la expresión general:

$$Y_i = 140 + 255 \cdot (\varepsilon_i)^{0,26} \quad (4.5)$$

➤ **Estudio tecnológico de la secuencia alternativa de desbaste de *Cunext Copper Industries S.L.*, mediante el método de los elementos finitos y considerando  $\alpha_{12}=18^\circ$ ,  $\alpha_{34}=16^\circ$ ,  $\alpha_{56}=14^\circ$ ,  $\alpha_{78}=12^\circ$  y  $\Delta=2,80$ .**

Los resultados obtenidos con el software de simulación numérica *Deform2D*, para tensión, deformación y fuerza de estirado en cada etapa del proceso diseñado, se presentan en la Tabla 4.78:

Tabla 4.78 Resultados del MEF aplicado al proceso de desbaste (*Cunext Copper Industries S.L.*).

Etapa	$d_0$ [mm]	$d_f$ [mm]	$\alpha$ [°]	Rec.	$\varepsilon_{efect. P1}$	$\sigma_{efect.P1}$ [Mpa]	$\sigma_{efect.máx.}$ [Mpa]	$F$ [N]
<b>1</b>	8,00	6,41	18	SI	0,49	227	368	7370
<b>2</b>	6,41	5,14	18	NO	0,92	292	438	5520
<b>3</b>	5,14	4,22	16	NO	1,32	286	422	3440
<b>4</b>	4,22	3,46	16	NO	1,69	242	438	2500
<b>5</b>	3,46	2,91	14	NO	2,06	228	451	1650
<b>6</b>	2,91	2,45	14	NO	2,43	240	464	1250
<b>7</b>	2,45	2,11	12	NO	2,75	221	474	850
<b>8</b>	2,11	2,00	12	NO	2,79	126	478	520

En la Figura 4.85, se representan gráficamente estos resultados observando que los valores de la tensión de estirado o tensión efectiva  $\sigma_e$  a la salida de la hilera en cada etapa, obtenida en las simulaciones realizadas con *Deform2D*, son similares a los obtenidos mediante la aplicación informática *PullWorks*. No obstante, el valor de esta tensión se incrementa en las etapas iniciales de la secuencia para estabilizarse al final.

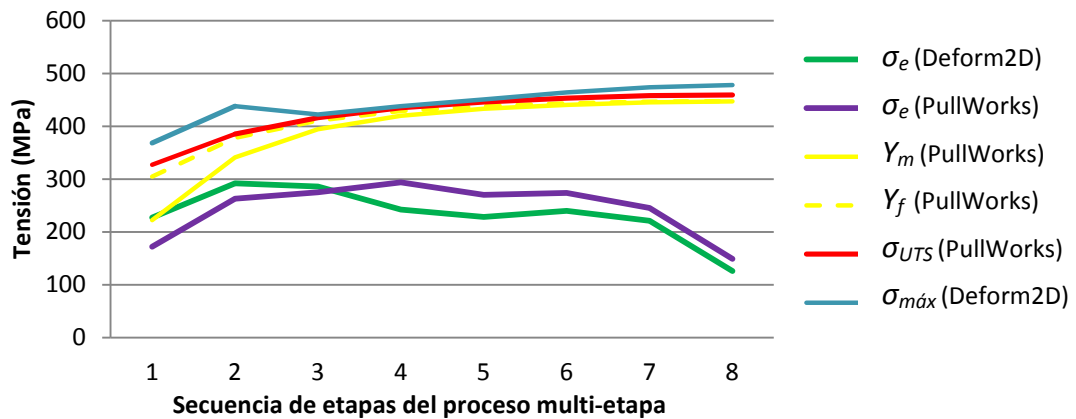


Figura 4.85 Tensión estirado  $\sigma_e$  obtenida con *PullWorks* y *Deform2D* para el trefilado en desbaste (*Cunext Copper Industries S.L.*).

El límite de fluencia del metal se rebasa en la zona de deformación, sin llegar a alcanzarse el límite de rotura a tracción del alambre estirado. Esto permite la deformación plástica del material en el interior de la hilera de estirado. No obstante, cabe señalar que esta máxima tensión supera ligeramente el límite de rotura debido a que en la zona de deformación existe una componente importante de compresión.

En las simulaciones realizadas con el software *Deform2D*, se ha considerado la expresión de *Ludwik-Hollomon* como la ley que determina la evolución de las propiedades mecánicas del material frente al endurecimiento por deformación. Este software no permite implementar las expresiones que se obtuvieron y que describen la evolución de las propiedades mecánicas del cobre Cu-ETP1. Cabe señalar que los valores, para los límites de fluencia y rotura en cada una de las etapas simuladas en *Deform2D*, serán diferentes a los obtenidos en la aplicación *PullWorks*.

La tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$ , necesaria para realizar el estirado en cada etapa, no llega a alcanzar el límite de fluencia del material estirado en ninguna de las etapas del proceso secuencial de estirado multi-etapa diseñado. Esta condición garantiza que no se producirán deformaciones indeseadas en el producto estirado.

➤ **Estudio del diseño optimizado propuesto para la secuencia de desbaste de *Cunext Copper Industries S.L.*, mediante el método de los elementos finitos y considerando  $\alpha=18^\circ$  y  $\Delta=2,00$ .**

La secuencia de trefilado en desbaste a partir de alambroón en estado recocido y desde  $\varnothing 8$  mm hasta  $\varnothing 2$  mm. Una secuencia alternativa, optimizada mediante la aplicación

*PullWorks*, se propuso en el apartado anterior con el fin de mejorar el proceso reduciendo su número de etapas al máximo y evitando recocidos intermedios.

Para las simulaciones realizadas se ha considerado que el alambrión de cobre, en estado recocido, presenta un comportamiento frente al endurecimiento por deformación definido por la ecuación 4.5, ley de *Hollomon-Ludwik* cuyos parámetros tienen los valores definidos en dicha ecuación.

Los resultados obtenidos tras realizar dichas simulaciones con el software numérico *Deform2D*, para las tensiones, deformaciones y fuerzas de estirado en cada una de las 5 etapas que constituyen la propuesta optimizada para el proceso secuencial de trefilado multi-etapa de desbaste de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.* se presentan en la Tabla 4.79.

Tabla 4.79 Resultados de la simulación del proceso optimizado de desbaste (*Cunext Copper Industries S.L.*).

Etapa	$d_0$ [mm]	$d_f$ [mm]	$\alpha$ [°]	Rec.	$\epsilon_{efect. P1}$	$\sigma_{efect.P1}$ [Mpa]	$\sigma_{efect.máx.}$ [Mpa]	$F$ [N]
1	8,00	5,86	18	SI	0,76	303	403	7730
2	5,86	4,29	18	NO	1,52	377	458	5070
3	4,29	3,14	18	NO	2,28	384	460	2770
4	3,14	2,30	18	NO	3,06	403	478	1550
5	2,30	2,00	18	NO	3,47	246	494	759

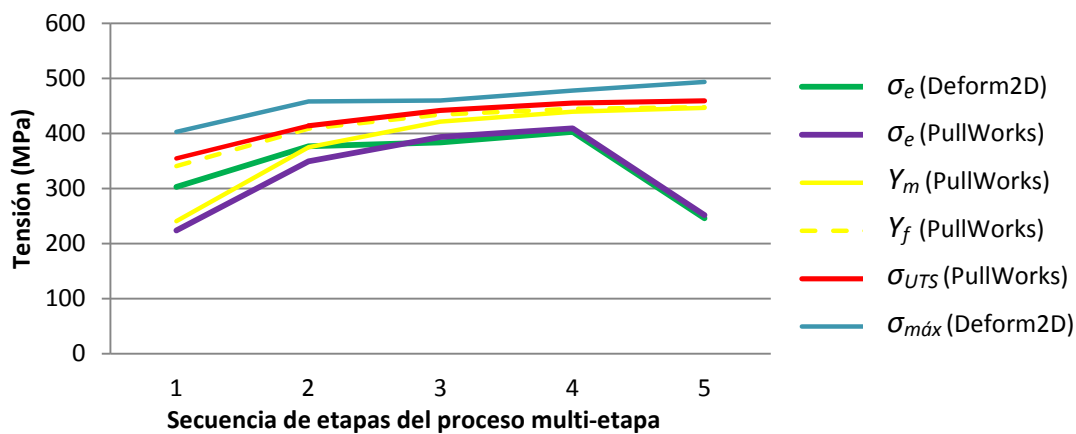


Figura 4.86 Tensión estirado  $\sigma_e$  obtenida para el trefilado optimizado en desbaste (*Cunext Copper Industries S.L.*).

En la gráfica de la Figura 4.86, se puede observar que los valores de la tensión de estirado  $\sigma_e$ , definidos a partir de las simulaciones realizadas con *Deform2D*, son bastante acordes a los obtenidos mediante la aplicación informática *PullWorks*.

En la gráfica se observa cómo todas las etapas de la secuencia optimizada mantienen un valor de  $\sigma_e$  por debajo de los límites de fluencia a la salida y de rotura en el proceso secuencial. El límite de fluencia del metal se ve superado en la zona de deformación,

en el interior del cono en la hilera de estirado, sin llegar a alcanzarse el límite de rotura por la componente axial de dicha tensión  $\sigma_{m\acute{a}x}$ . Esta condición permite la deformación plástica sin que se rompa el material en el interior de la hilera de estirado.

Estudiando y analizando los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas, se ha podido corroborar que los diseños realizados con *PullWorks* son satisfactorios. Las simulaciones realizadas para las 5 etapas han arrojado resultados muy similares a los obtenidos con la aplicación desarrollada, lo cual ha demostrado que secuencia multi-etapa optimizada que se propone es técnicamente viable.

#### **4.5.7 Estudio de optimización del proceso secuencial de trefilado multi-etapa de acabado**

En este apartado se presenta el correspondiente estudio y análisis pormenorizado del proceso secuencial de trefilado multi-etapa realizado en la empresa visitada, con la intención de diseñar y estudiar una nueva alternativa para mejorarlo.

➤ **Diseño y estudio tecnológico de la secuencia de acabado de *Cunext Copper Industries S.L.* para  $\alpha=12^\circ$  y  $\Delta=3,65$  realizado con la aplicación *PullWorks*.**

En el caso del proceso de estirado secuencial multi-etapa de acabado del cobre Cu-ETP1 realizado en la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*, se han considerado las condiciones iniciales, presentadas en la Tabla 4.80, para el diseño y análisis del mismo.

Tabla 4.80 Inputs para el trefilado/acabado del Cu-ETP1 (*Cunext Copper Industries S.L.*).

TIPO / DEFINICIÓN	VARIABLE	VALOR	UNIDAD
<b>GEOMÉTRICAS</b>			
Díámetro inicial de entrada	$d_0$	2,00	[mm]
Díámetro final del producto	$d_f$	0,25	[mm]
Semi-ángulo cono reducción	$\alpha$	12	[°]
Longitud de calibración (todas las hileras)	$L_c$	$0,5 \cdot d_f$	[mm]
Factor de forma (todas las hileras)	$\Delta$	3,65	-
<b>TRIBOLÓGICAS</b>			
Fricción hilera( MCD)-metal / emulsión	$\mu_{PCD-COBRE}$	0,075	-
Fricción cabrestante-metal / emulsión	$\mu_{ZrO2-COBRE}$	0,10	-
Vueltas enrolladas / rodillo tracción	$n_b$	3 y 2	vueltas
Sistema regulador tensión backpull	-	-	-
<b>MATERIAL</b>			
Cobre electrolítico recocido ( <i>Cunext</i> )	Cu-ETP1	Recocido	-
Límite de fluencia	$Y_0$	69 / polinómica	[Mpa]
Tensión de rotura	$R_m$	221 / polinómica	[Mpa]
Resistencia a la deformación	$C$	255	[Mpa]
Endurecimiento por deformación	$n$	0,26	-
<b>PROCESO</b>			
Velocidad de producción	$v_f$	25	[m/s]

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

Se pretende obtener, partiendo del alambre de  $\varnothing 2$  mm obtenido en el proceso previo de trefilado en desbaste, un producto final trefilado de 0,25 mm de diámetro. El alambre semielaborado es recocado a su salida de la máquina de desbaste y almacenado en bobinas con las que se alimenta la máquina de trefilado en acabado.

Más adelante se presenta una nueva propuesta para mejorar y optimizar esta secuencia, diseñada con la ayuda de la aplicación desarrollada en el presente trabajo. Con el estudio de este diseño secuencial multi-etapa se pretende conocer lo más fielmente posible las condiciones y parámetros tecnológicos que lo caracterizan para, posteriormente, poder realizar un análisis comparativo con la propuesta mejorada.

Tabla 4.81 Secuencia de trefilado de acabado del cobre obtenida con *PullWorks* (Cunext Copper Industries S.L.).

<b>Etapas</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$d_f$ [mm]	2,00	1,78	1,59	1,42	1,27	1,13	1,01	0,90	0,80	0,71	0,63
$\Delta\%R_s$	-	20,79	36,80	49,59	59,68	68,08	74,50	79,75	84,00	87,40	90,08
$\epsilon_{efectiva}$	-	0,23	0,46	0,69	0,91	1,14	1,36	1,59	1,83	2,07	2,31
$\alpha$ [°]	-	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
$r$	-	0,23	0,23	0,23	0,22	0,23	0,22	0,23	0,24	0,24	0,24
$\Delta$	-	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65
<b>Recocido</b>	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
<b>Etapas</b>	<b>-</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
$d_f$ [mm]	-	0,56	0,50	0,45	0,40	0,36	0,32	0,29	0,26	0,25	-
$\Delta\%R_s$	-	92,16	93,75	94,94	96,00	96,76	97,44	97,90	98,31	98,44	-
$\epsilon_{efectiva}$	-	2,55	2,78	2,99	3,23	3,44	3,68	3,88	4,10	4,18	-
$\alpha$ [°]	-	12	12	12	12	12	12	12	12	12	-
$r$	-	0,20	0,20	0,19	0,21	0,19	0,21	0,18	0,20	0,08	-
$\Delta$	-	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	-
<b>Recocido</b>	-	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	-

En la Tabla 4.81 se puede ver que, una vez implementadas en la aplicación todas las condiciones iniciales consideradas en referencia al proceso real realizado en la planta de producción, el diseño obtenido mediante *PullWorks* está constituido en 19 etapas consecutivas. En las etapas de esta secuencia se aplica un  $\%R_s \approx 20\%$  y se observa que el proceso secuencial de trefilado multi-etapa no requiere de recocidos.

En la Figura 4.87, se muestra una imagen de la ventana en la cual *PullWorks* presenta los resultados correspondientes al diseño de la secuencia de etapas obtenido para las condiciones y la reducción total especificadas anteriormente.

El software que se ha desarrollado en el presente trabajo ofrece la posibilidad de calcular secuencias de hasta un máximo de 30 etapas de estirado, para lo cual el usuario debe indicar datos geométricos, tribológicos, propiedades del metal al inicio del proceso y tipo de proceso (continuo o discontinuo) en los apartados correspondientes de la aplicación.

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa



Figura 4.87 Diseño realizado con *PullWorks* (trefilado acabado, *Cunext Copper Industries S.L.*).

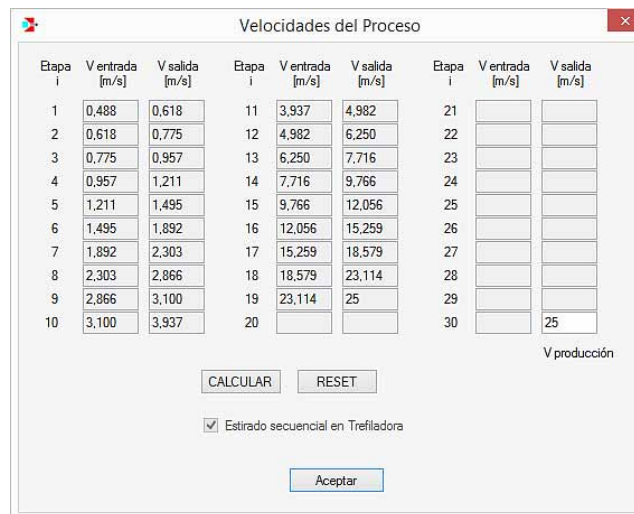


Figura 4.88 Cálculo de velocidades del trefilado multi-etapa con *PullWorks*.

Para una velocidad de producción  $v_f = 25$  m/s, a la salida de la decimonovena y última etapa, la aplicación *PullWorks* presenta todas las velocidades parciales en la ventana mostrada en la Figura 4.88.

Cabe recordar que, en el proceso real, y según lo descrito en el apartado anterior correspondiente de este mismo punto, la trefiladora de acabado multi-filar que está en funcionamiento en la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*, modelo *TM-25* de la marca *Sictra*, se divide en dos bloques, siendo  $\%R_5 \approx 25\%$  en las 13 primeras etapas correspondientes al primero de los bloques y  $\%R_5 \approx 20\%$  en las del 2º bloque de hileras

en función de las hileras suprimidas según la secuencia correspondiente a la obtención de cada  $\phi$  final deseado (véase Tabla 4.59).

Etapa	Tratamiento Recocido	Análisis Local $\sigma_{z+odh}$ [MPa]	Retroceso $\sigma_{bp}$ [MPa]	W redundante $\sigma_d$ [MPa]	Calibración local [MPa]	Tensión Estirado $\sigma$ [MPa]	Fluencia media $Y_m$ [MPa]	Fluencia salida $Y_f$ [MPa]	Fuerza Estirado F [N]	Potencia Estirado P [W]
1	SI	58,14611	0	31,43251	0,720371	90,298992	192,09912	244,19825	224,71	138,87
2	NO	81,06464	0	45,18299	1,035505	127,28312	276,13495	308,07144	252,73	195,87
3	NO	96,95467	0	53,94879	1,236400	152,13988	254,0625	351,34238	240,94	230,58
4	NO	106,30031	0	59,88207	1,372380	167,65767	365,96802	380,59366	212,26	257,04
5	NO	118,6503	0	63,99993	1,466753	184,11708	391,13427	401,67485	184,65	276,05
6	NO	119,3644	0	66,87859	1,532726	187,77579	408,72715	415,77942	150,44	284,64
7	NO	126,1187	0	68,87078	1,578383	196,56793	420,90238	426,02535	125,05	287,99
8	NO	131,4157	0	70,31758	1,611541	203,34492	429,74447	433,4636	102,21	292,94
9	NO	135,0757	0	71,36776	1,635609	208,07908	436,16259	438,86155	82,38	255,39
10	NO	136,7351	0	72,12963	1,653070	210,51789	440,81876	442,77593	65,62	258,36
11	NO	135,8338	0	72,68160	1,665720	210,18121	444,19213	445,60832	51,77	257,91
12	NO	131,6174	0	73,08017	1,674854	206,37252	446,62799	447,64765	40,52	253,26
13	NO	123,1833	0	73,36593	1,681404	198,23064	448,37440	449,10114	31,53	243,26
14	NO	137,5261	0	73,58712	1,686473	212,79979	449,72617	450,3512	26,74	261,16
15	NO	123,8452	0	73,76015	1,690438	199,29580	450,78366	451,21612	20,29	244,57
16	NO	138,0969	0	73,89254	1,693472	213,68300	451,59272	451,96935	17,19	262,23
17	NO	116,3589	0	73,99472	1,695814	192,04954	452,21724	452,46513	12,69	235,68
18	NO	128,7265	0	74,07124	1,697568	204,49538	452,68485	452,90457	10,86	250,96
19	NO	47,40987	0	74,11819	1,698644	123,22671	452,97176	453,03895	6,05	151,22

Figura 4.89 Datos tecnológicos del trefilado de acabado diseñado con *PullWorks* para *Cunext*.

Los resultados mostrados en la Figura 4.89, definen tecnológicamente el proceso diseñado y muestran que el valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$  se incrementa en el proceso, como consecuencia del progresivo endurecimiento por deformación en frío del metal estirado. Esta tensión de estirado  $\sigma_e$  alcanza su mayor valor en la última etapa, en la cual el cobre trefilado presenta el grado de deformación efectiva máximo.

Tabla 4.82 Datos tecnológicos del trefilado de acabado diseñado con *PullWorks* para *Cunext*.

Etapa	$d_o$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	F [N]	P [W]
1	2,00	1,78	0,49	0,62	192,10	244,20	90,30	224,71	138,87
2	1,78	1,59	0,62	0,77	276,13	308,07	127,28	252,73	195,87
3	1,59	1,42	0,77	0,96	329,71	351,34	152,14	240,94	230,58
4	1,42	1,27	0,96	1,21	365,97	380,59	167,56	212,26	257,04
5	1,27	1,13	1,21	1,49	391,13	401,67	184,12	184,65	276,05
6	1,13	1,01	1,49	1,89	408,73	415,78	187,78	150,44	284,64
7	1,01	0,90	1,89	2,30	420,90	426,03	196,57	125,05	287,99
8	0,90	0,80	2,30	2,87	429,74	433,46	203,34	102,21	292,94
9	0,80	0,71	2,87	3,10	436,16	438,86	208,08	82,38	255,39
10	0,71	0,63	3,10	3,94	440,82	442,78	210,52	65,62	258,36
11	0,63	0,56	3,94	4,98	444,19	445,61	210,18	51,77	257,91
12	0,56	0,50	4,98	6,25	446,63	447,65	206,37	40,52	253,26
13	0,50	0,45	6,25	7,72	448,37	449,10	198,23	31,53	243,26
14	0,45	0,40	7,72	9,77	449,73	450,35	212,80	26,74	261,16
15	0,40	0,36	9,77	12,06	450,78	451,22	199,30	20,29	244,57
16	0,36	0,32	12,06	15,26	451,59	451,97	213,68	17,19	262,23
17	0,32	0,29	15,26	18,58	452,22	452,47	192,05	12,69	235,68
18	0,29	0,26	18,58	23,11	452,68	452,90	204,50	10,86	250,96
19	0,26	0,25	23,11	25,00	452,97	453,04	123,23	6,05	151,22

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

En la Tabla 4.82 se presentan los valores correspondientes a todos los parámetros tecnológicos, para cada una de las etapas, en el proceso secuencial de trefilado de acabado propuesto y que ha sido diseñado mediante la aplicación *PullWorks*.

El diamante policristalino (PCD) ofrece menor coeficiente de fricción que el diamante monocristalino (MCD), mientras que este último permite obtener un mejor acabado superficial del producto estirado, aunque implica mayor coeficiente de fricción al del PCD bajo las mismas condiciones de trabajo.

Para el trefilado secuencial multi-etapa de acabado, realizado en la trefiladora *Sictra* TM-25 de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*, se utiliza un juego de hileras con núcleo de diamante monocristalino (MCD).

En definitiva, *PullWorks* ha dado como resultado un diseño equivalente a un solo bloque de trefilado constituido en 19 etapas, diseño muy similar al proceso secuencial multi-etapa aplicado en la planta de producción de *Cunext*.

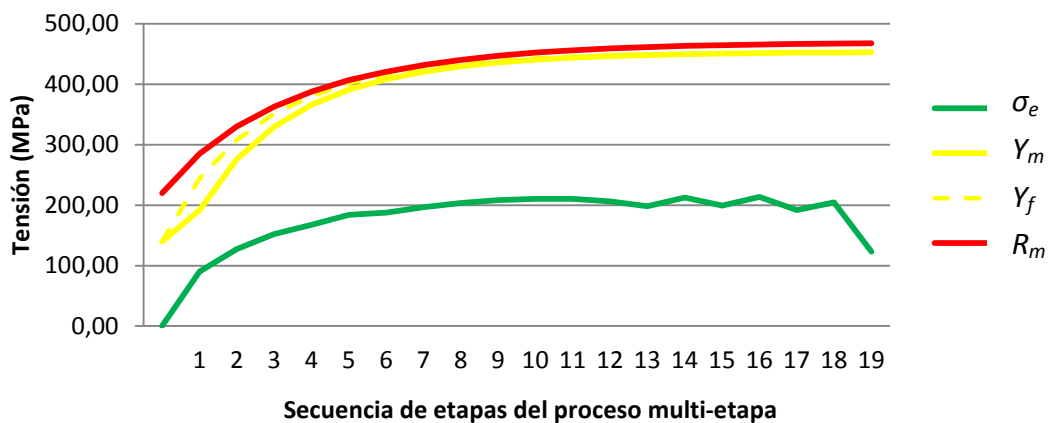


Figura 4.90 Gráfica de evolución de las tensiones principales en el proceso secuencial de trefilado multi-etapa de acabado del Cu-ETP1 diseñado con *PullWorks*.

En la Figura 4.90 se representa la evolución del valor de cada una de las tensiones que representan el comportamiento mecánico del cobre, durante el proceso secuencial de estirado, poniendo en evidencia la tendencia que sigue cada uno de estos parámetros tecnológicos frente al valor de la tensión efectiva necesaria en el estirado de cada una de las etapas del proceso diseñado.

De los resultados reflejados en esta gráfica, se puede afirmar que el nuevo diseño del proceso, obtenido con la ayuda de la aplicación *PullWorks*, es perfectamente aplicable en la práctica. Presenta una buena estabilidad y no se alcanzan los límites mecánicos del metal en ninguna de las 19 etapas en las que se constituye.

Se ha obtenido una secuencia muy bien equilibrada para el proceso de estirado multi-etapa. Se trata de una secuencia muy similar a la realizada en la práctica en la máquina

de trefilado multi-filar *Sictra TM-25*, en la planta de producción de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*

Tabla 4.83 Componentes de  $\sigma_e$  trefilado de acabado diseñado con *PullWorks* para *Cunext*.

<b>Etapa</b>	<b><math>\sigma_{dh+roz}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{bp}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{di}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{cal}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_e</math> [MPa]</b>
<b>1</b>	58,15	0,00	31,43	0,72	90,30
<b>2</b>	81,06	0,00	45,18	1,04	127,28
<b>3</b>	96,95	0,00	53,95	1,24	152,14
<b>4</b>	106,30	0,00	59,88	1,37	167,56
<b>5</b>	118,65	0,00	64,00	1,47	184,12
<b>6</b>	119,36	0,00	66,88	1,53	187,78
<b>7</b>	126,12	0,00	68,87	1,58	196,57
<b>8</b>	131,42	0,00	70,32	1,61	203,34
<b>9</b>	135,08	0,00	71,37	1,64	208,08
<b>10</b>	136,74	0,00	72,13	1,65	210,52
<b>11</b>	135,83	0,00	72,68	1,67	210,18
<b>12</b>	131,62	0,00	73,08	1,67	206,37
<b>13</b>	123,18	0,00	73,37	1,68	198,23
<b>14</b>	137,53	0,00	73,59	1,69	212,80
<b>15</b>	123,85	0,00	73,76	1,69	199,30
<b>16</b>	138,10	0,00	73,89	1,69	213,68
<b>17</b>	116,36	0,00	73,99	1,70	192,05
<b>18</b>	128,73	0,00	74,07	1,70	204,50
<b>19</b>	47,41	0,00	74,12	1,70	123,23

En la Tabla 4.83 se muestran las diferentes componentes de la tensión de estirado  $\sigma_e$ , valores que representan la influencia de los diferentes factores geométricos y tecnológicos asumidos en la definición inicial para el proceso de trefilado secuencial multi-etapa diseñado.

La deformación homogénea, el rozamiento en la zona de contacto cobre-hilera y el efecto de la distorsión interna que sufre el metal al ser deformado por estirado, son los factores que mayor influencia tienen en el valor final de la tensión de estirado  $\sigma_e$ , tensión necesaria para hacer pasar el alambre o hilo a través de cada una de las 19 hileras del proceso multi-etapa de trefilado del cobre.

➤ **Diseño optimizado y estudio tecnológico de la secuencia de acabado de *Cunext Copper Industries S.L.* para  $\Delta=2,50$  y  $\alpha=12^\circ$ , realizado con la aplicación *PullWorks*.**

Se pretende realizar la nueva secuencia de acabado, a partir del producto semielaborado obtenido en la secuencia optimizada propuesta para el desbaste previo, que consta de 5 etapas partiendo de un diámetro de 8mm y finalizó con un grado de deformación acumulada  $\epsilon_f = 2,77$ , además de una reducción de sección

**Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa**

acumulada  $\%R_s=93,75$ . Estos datos se han utilizado en el apartado “Recocido inicial / Estado suministro” en la aplicación informática *PullWorks*.

Tabla 4.84 Inputs para el trefilado/acabado del Cu-ETP1 (*Cunext Copper Industries S.L.*).

TIPO / DEFINICIÓN	VARIABLE	VALOR	UNIDAD
<b>GEOMÉTRICAS</b>			
Diámetro inicial de entrada	$d_o$	2,00	[mm]
Diámetro final del producto	$d_f$	0,25	[mm]
Semi-ángulo cono reducción	$\alpha$	12	[°]
Longitud de calibración (todas las hileras)	$L_c$	$0,5 \cdot d_f$	[mm]
Factor de forma (todas las hileras)	$\Delta$	2,50	-
<b>TRIBOLÓGICAS</b>			
Fricción hilera( MCD)-metal / emulsión	$\mu_{PCD-COBRE}$	0,075	-
Fricción cabrestante-metal / emulsión	$\mu_{ZrO2-COBRE}$	0,10	-
Vueltas enrolladas / cabrestante	$n_b$	3 y 2	vueltas
Sistema regulador tensión backpull	-	-	-
<b>MATERIAL</b>			
Cobre electrolítico desbastado (Cunext)	$\emptyset$ inicial desd.	8,00	mm
Cobre electrolítico desbastado (Cunext)	$\epsilon_0$	2,77	-
Límite de fluencia (recocido)	$Y_0$	69 / polinómica	[Mpa]
Tensión de rotura (recocido)	$R_m$	221 / polinómica	[Mpa]
Resistencia a la deformación (recocido)	$C$	255	[Mpa]
Endurecimiento por deformación (recocido)	$n$	0,26	-
<b>PROCESO</b>			
Velocidad de producción	$v_f$	25	[m/s]

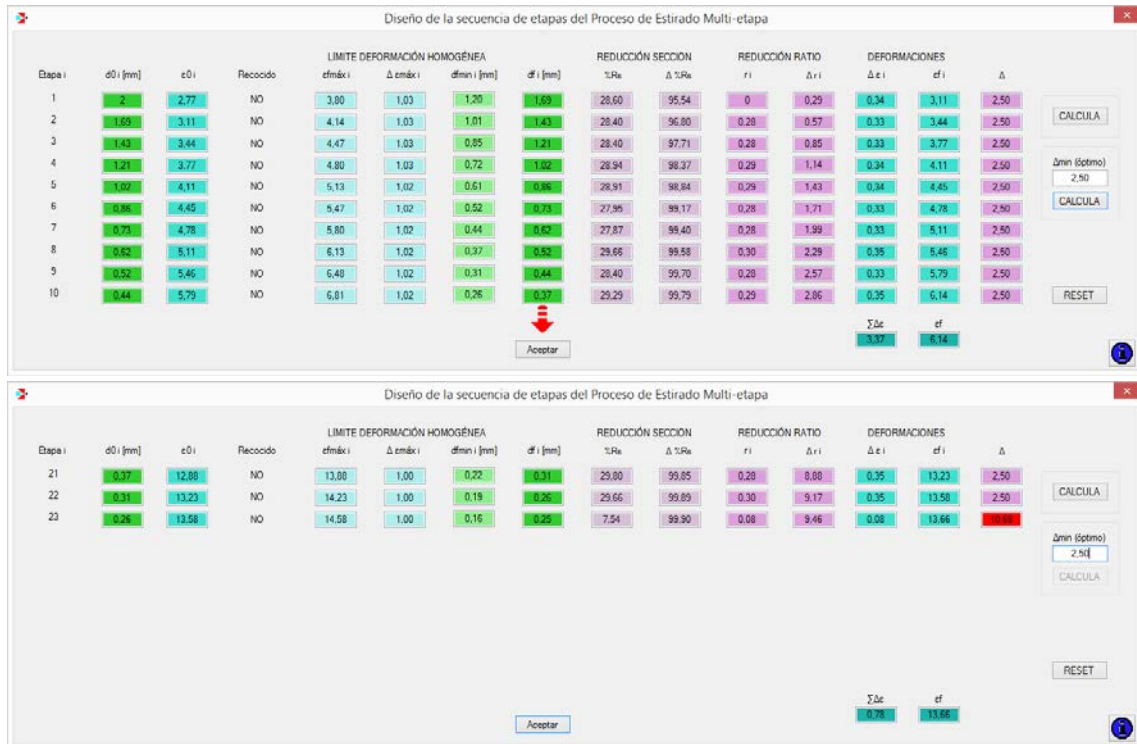


Figura 4.91 Diseño optimizado con *PullWorks* (trefilado acabado, *Cunext Copper Ind. S.L.*).

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

Para esta nueva propuesta para el proceso de estirado secuencial multi-etapa de acabado de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*, se han considerado las condiciones iniciales presentadas en la Tabla 4.84, para el diseño y análisis del mismo mediante la metodología propuesta e implementada en el programa *PullWorks*.

Tabla 4.85 Propuesta optimizada con *PullWorks* (trefilado acabado, *Cunext Copper Ind. S.L.*).

Etapa	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_f$ [mm]	2,00	1,69	1,43	1,21	1,02	0,86	0,73	0,62	0,52	0,44	0,37
$\Delta\%R_s$	93,75	95,54	96,80	97,71	98,37	98,84	99,17	99,40	99,58	99,70	99,79
$\epsilon_{efectiva}$	2,77	3,11	3,44	3,77	4,11	4,45	4,78	5,11	5,46	5,79	6,14
$\alpha$ [°]	-	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
$r$	-	0,29	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28	0,3	0,28	0,29
$\Delta$	-	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Recocido	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Etapa	-	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$d_f$ [mm]	-	0,31	0,26	0,25	-	-	-	-	-	-	-
$\Delta\%R_s$	-	99,85	99,89	99,90	-	-	-	-	-	-	-
$\epsilon_{efectiva}$	-	6,49	6,84	6,92	-	-	-	-	-	-	-
$\alpha$ [°]	-	12	12	12	-	-	-	-	-	-	-
$r$	-	0,3	0,3	0,08	-	-	-	-	-	-	-
$\Delta$	-	2,5	2,5	10,68	-	-	-	-	-	-	-
Recocido	-	NO	NO	NO	-	-	-	-	-	-	-

Considerando los datos de entrada indicados, se consiguió un diseño optimizado para la secuencia de acabado, que disminuye el número de etapas a realizar de 19 a 13 sin necesidad de aplicar ningún recocido intermedio, tal y como se puede apreciar en los resultados que se muestran en la Figura 4.91 y presentados en la Tabla 4.85, para esta nueva propuesta para el proceso de estirado secuencial multi-etapa de acabado de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.*, se han considerado las condiciones iniciales presentadas en la Tabla 4.84, para el diseño y análisis del mismo mediante la metodología propuesta e implementada en el programa *PullWorks*.

Etapa	Tratamiento Recocido	Análisis Local $\sigma_{oz} + \sigma_{dh}$ [MPa]	Retraceso $\sigma_{bp}$ [MPa]	W redundante $\sigma_i$ [MPa]	Calibración $\sigma_{cal}$ [MPa]	Tensión Estirado $\sigma$ [MPa]	Fluencia media $Y_m$ [MPa]	Fluencia salida $Y_f$ [MPa]	Fuerza Estirado F [N]	Potencia Estirado P [W]
1	NO	192.7974	0	73.42415	1.682738	267.9043	448.73019	449.81273	600.96	417.06
2	NO	192.0970	0	73.72021	1.689523	267.50681	450.53956	451.26640	429.63	424.05
3	NO	192.6199	0	73.92089	1.694122	268.23498	451.76597	452.26554	308.44	329.11
4	NO	197.0748	0	74.06047	1.697321	272.83263	452.61902	452.97251	222.94	334.86
5	NO	197.1266	0	74.15845	1.699566	272.98464	453.21784	453.46318	158.57	335.06
6	NO	189.9564	0	74.22574	1.701109	265.88332	453.62906	453.79495	111.28	326.28
7	NO	189.4594	0	74.27216	1.702172	265.43378	453.91277	454.03058	80.14	325.75
8	NO	203.2439	0	74.30611	1.702951	279.25293	454.12026	454.20994	59.31	342.67
9	NO	193.6876	0	74.33061	1.703512	263.72172	454.26998	454.33001	41.01	331.01
10	NO	200.5110	0	74.34765	1.703903	276.56255	454.37414	454.41827	29.74	339.38
11	NO	202.9970	0	73.80612	1.691492	278.43470	451.06461	454.48157	21.02	341.76
12	NO	203.4155	0	74.36884	1.704388	279.48872	454.50363	454.52563	14.84	342.99
13	NO	47.57292	0	74.37309	1.704486	123.65051	454.52963	454.53357	6.07	151.74

Figura 4.92 Parámetros tecnológicos del trefilado optimizado de acabado (*Cunext Copper Industries S.L.*).

## Aplicación de la metodología al proceso secuencial de estirado multi-etapa

De los resultados obtenidos con el programa y mostrados a continuación, se puede ver que no será necesario realizar recocido alguno del material semielaborado con el cual se alimenta el proceso multi-etapa diseñado y tampoco es necesaria ninguna estación de recocido intermedio “on-line” en toda la secuencia. Se podría afirmar que la decimotercera y última etapa realiza un rectificado final de la geometría deseada con el que se mejorará el acabado superficial sin alterar las propiedades mecánicas del producto final. En la figura Figura 4.92, se muestra la ventana del software *PullWorks* en la que se pueden consultar los resultados del análisis tecnológico de la secuencia diseñana.

Tabla 4.86 Parámetros tecnológicos del trefilado optimizado de acabado (*Cunext Copper Industries S.L.*).

Etapa	$d_0$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\bar{Y}$ [MPa]	$Y_f$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$F$ [N]	$P$ [W]
1	2,00	1,69	0,49	0,69	448,73	449,81	267,90	600,96	417,06
2	1,69	1,43	0,69	0,99	450,54	451,27	267,51	429,63	424,05
3	1,43	1,21	0,99	1,07	451,77	452,27	268,23	308,44	329,11
4	1,21	1,02	1,07	1,50	452,62	452,97	272,83	222,94	334,86
5	1,02	0,86	1,50	2,11	453,22	453,46	272,98	158,57	335,06
6	0,86	0,73	2,11	2,93	453,63	453,79	265,88	111,28	326,28
7	0,73	0,62	2,93	4,06	453,91	454,03	265,43	80,14	325,75
8	0,62	0,52	4,06	5,78	454,12	454,21	279,25	59,31	342,67
9	0,52	0,44	5,78	8,07	454,27	454,33	269,72	41,01	331,01
10	0,44	0,37	8,07	11,41	454,37	454,42	276,56	29,74	339,38
11	0,37	0,31	11,41	16,26	451,06	454,48	278,49	21,02	341,76
12	0,31	0,26	16,26	23,11	454,50	454,53	279,49	14,84	342,99
13	0,26	0,25	23,11	25,00	454,53	454,53	123,65	6,07	151,74

Todos los resultados del análisis de los principales parámetros tecnológicos de la secuencia diseñana se desglosan en la Tabla 4.86:

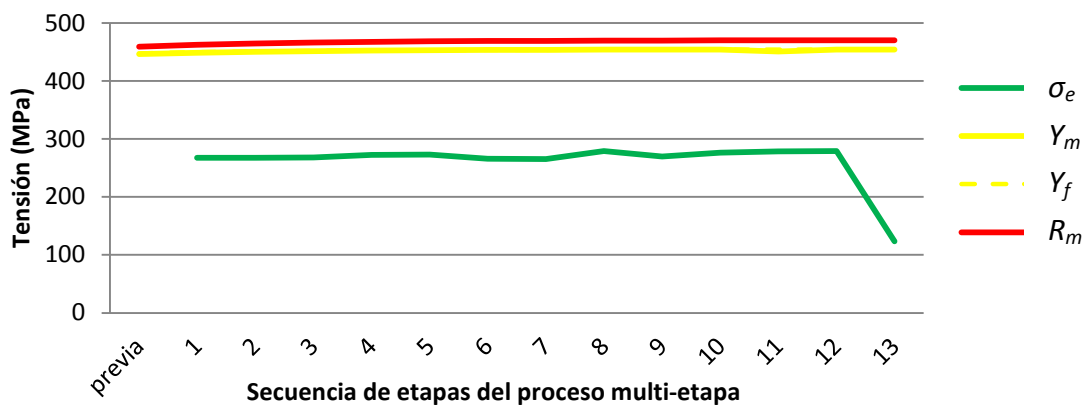


Figura 4.93 Representación gráfica de los parámetros tecnológicos en el trefilado secuencial multi-etapa de acabado optimizado.

En la gráfica de la Figura 4.93 se aprecia que la tensión de estirado  $\sigma_e$  se mantiene bajo los límites de deformabilidad establecidos por los valores de  $Y_f$  y  $R_m$ , para cada una de

las 5 etapas del diseño optimizado que se propone, durante toda la secuencia. La secuencia diseñada es viable y no se producirá rotura como consecuencia de la acritud del material, aún no habiendo sido necesario aplicar recocido intermedio alguno.

En la gráfica anterior, se observa que se trata una continuación natural del proceso anterior, es decir, teóricamente se podría realizar toda la reducción incluida en el desbaste (5 etapas sin recocido intermedio) y acabado (13 etapas sin recocido intermedio) en una sola secuencia de trefilado de 18 etapas. No obstante, en la práctica, esto no es viable debido a que la potencia requerida en las etapas de desbaste es notablemente superior a la requerida en las restantes. Este hecho justifica la utilización de dos máquinas de trefilado de diferentes características técnicas como son la *Niehoff M85* y la *Sictra TM-25*, trefiladoras empleadas en *Cunext Copper*.

El proceso secuencial de trefilado multi-etapa de acabado de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.* podría mejorarse, reduciendo la secuencia de 19 a 13 etapas, con el consiguiente ahorro de hileras necesarias para realizar la reducción. Además, al no necesitarse estaciones de recocido intermedio “on-line” se ahorran costes derivados del consumo energético de la máquina y la construcción de la máquina de trefilado sería más económica, al no necesitar dicha tecnología.

➤ **Estudio tecnológico de la secuencia de acabado de *Cunext Copper Industries S.L.*, para  $\alpha=12^\circ$  y  $\Delta=3,65$ , mediante el método de los elementos finitos.**

Para las simulaciones realizadas con el software *Deform2D*, se considera que el alambre de cobre electrolítico Cu-ETP1, de  $\varnothing$  2 mm., en estado recocido, presenta un comportamiento frente al endurecimiento por deformación plástica en frío descrito por la expresión general de *Ludwik-Hollomon*, definida mediante los coeficientes y valores reflejados en la siguiente expresión:

$$Y_i = 140 + 255. (\varepsilon_i)^{0,26} \quad (4.5)$$

*Deform2D* ha permitido simular todas y cada una de las 13 etapas del proceso secuencial de trefilado de acabado propuesto. Se han trasladado al post-procesador del este simulador las geometrías y las condiciones de contorno fijadas para el proceso que se diseñó con *PullWorks*, etapa por etapa, obteniendo los resultados que han permitido conocer la distribución de tensiones, deformaciones y la fuerza de estirado requerida en cada una de ellas para poder validar el diseño optimizado propuesto.

Como se puede observar en la Figura 4.94, se supera el límite de fluencia en la zona de deformación en el interior del cono en la hilera de estirado, sin llegar a alcanzarse el límite de rotura, produciéndose la deformación plástica en dicha zona. La tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$  necesaria no llega a alcanzar el límite de fluencia del material estirado en ninguna de las etapas del proceso secuencial de estirado multi-etapa

diseñado. Estas condiciones evitan la rotura y garantizan la ausencia de deformaciones indeseadas durante el estirado y en el producto final estirado.

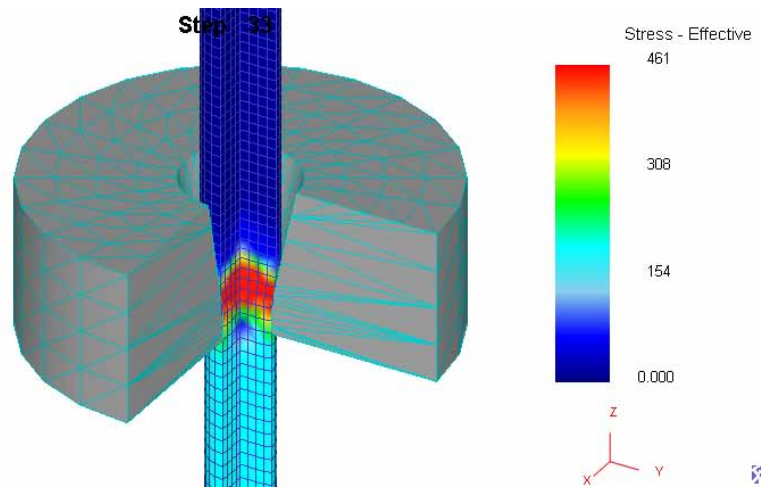


Figura 4.94 Simulación 3D de la distribución de tensiones (etapa 10ª) de acabado.

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas mediante el método de los elementos finitos se presentan en la Tabla 4.87:

Tabla 4.87 Resultados de la simulación del proceso de acabado (*Cunext Copper Industries S.L.*).

Etapa	$d_o$ [mm]	$d_f$ [mm]	$\alpha$ [°]	Rec.	$\epsilon_{efect. P1}$	$\sigma_{efect. P1}$ [Mpa]	$\sigma_{efect. máx.}$ [Mpa]	$F$ [N]
1	2,00	1,78	12	SI	0,25	126	326	310
2	1,78	1,59	12	NO	0,46	134	359	270
3	1,59	1,42	12	NO	0,72	162	383	256
4	1,42	1,27	12	NO	0,92	160	395	204
5	1,27	1,13	12	NO	1,16	180	411	183
6	1,13	1,01	12	NO	1,37	188	422	154
7	1,01	0,90	12	NO	1,63	206	433	132
8	0,90	0,80	12	NO	1,86	191	443	96
9	0,80	0,71	12	NO	2,05	185	448	75
10	0,71	0,63	12	NO	2,34	205	461	65
11	0,63	0,56	12	NO	2,60	244	470	60
12	0,56	0,50	12	NO	2,80	213	476	42
13	0,50	0,45	12	NO	2,97	170	480	28
14	0,45	0,40	12	NO	3,29	248	490	30
15	0,40	0,36	12	NO	3,45	226	494	23
16	0,36	0,32	12	NO	3,70	225	501	18
17	0,32	0,29	12	NO	3,82	152	502	11
18	0,29	0,26	12	NO	4,20	273	513	14
19	0,26	0,25	12	NO	4,21	122	513	6

La tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$  se incrementa con el grado de deformación acumulado y a medida que se avanza en el proceso secuencial, aspecto que se observa

en la tabla mencionada. Se puede ver que el valor de la fuerza de estirado  $F$  requerida decae progresivamente conforme se avanza en la secuencia de etapas del proceso multi-etapa de acabado diseñado.

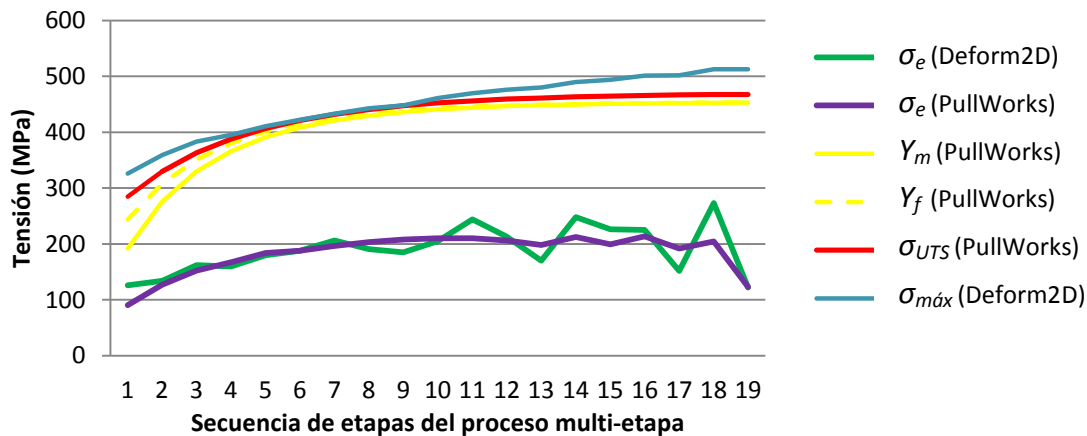


Figura 4.95 Tensión de estirado  $\sigma_e$  obtenida con *PullWorks* y *Deform2D* para el trefilado en acabado (*Cunext Copper Industries S.L.*).

En la gráfica de la Figura 4.95 se presenta una comparativa de los resultados para la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$ , valores obtenidos mediante el método numérico con el software *Deform2D* y el método analítico implementado en la aplicación *PullWorks*, además de los valores límite obtenidos en esta última mencionada.

Los valores obtenidos por el método numérico son ligeramente superiores a los obtenidos por el método analítico propuesto, aunque se puede apreciar cómo la tendencia en la evolución de estos valores de  $\sigma_e$  es muy parecida.

Tanto para las simulaciones correspondientes a las etapas del proceso de desbaste como para el de acabado, se han aplicado diferentes criterios para la determinación de la tensión de fluencia a la salida de cada etapa, propiedad que repercute de manera directa en la magnitud de la tensión necesaria para conseguir el estirado.

*Deform2D* utiliza la expresión de *Ludwik-Hollomon* (4.5) para simular la evolución de las propiedades del metal estirado. *Deform2D* ha ofrecido valores de  $\sigma_e$  que son muy parecidos a los obtenidos con *PullWorks*. Ambos métodos presentan curvas de evolución similares para el valor de este parámetro.

➤ **Estudio del diseño optimizado propuesto para la secuencia de acabado de *Cunext Copper Industries S.L.*, para  $\alpha=12^\circ$  y  $\Delta=3,65$ , mediante el método de los elementos finitos.**

En las simulaciones de las etapas del proceso de acabado propuesto en el anterior apartado, se ha asumido un comportamiento frente al endurecimiento por deformación en frío definido por la ecuación (4.5) de *Hollomon-Ludwik*:

$$Y_i = 140 + 255. (\varepsilon_i)^{0,26} \quad (4.5)$$

Tabla 4.88 Resultados de la simulación del proceso de acabado (*Cunext Copper Industries S.L.*).

<b>Etapa</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>d_f</math> [mm]</b>	<b><math>\alpha</math> [°]</b>	<b>Rec.</b>	<b><math>\varepsilon_{efect. P1}</math></b>	<b><math>\sigma_{efect. P1}</math> [Mpa]</b>	<b><math>\sigma_{efect. máx.}</math> [Mpa]</b>	<b>F [N]</b>
<b>1</b>	2,00	1,69	12	NO	3,17	273	482	580
<b>2</b>	1,69	1,43	12	NO	3,50	270	490	427
<b>3</b>	1,43	1,21	12	NO	3,85	273	500	311
<b>4</b>	1,21	1,02	12	NO	4,21	274	504	222
<b>5</b>	1,02	0,86	12	NO	4,53	255	500	159
<b>6</b>	0,86	0,73	12	NO	4,83	268	522	114
<b>7</b>	0,73	0,62	12	NO	5,21	286	530	85
<b>8</b>	0,62	0,52	12	NO	5,53	279	536	60
<b>9</b>	0,52	0,44	12	NO	5,80	279	540	45
<b>10</b>	0,44	0,37	12	NO	6,14	256	545	28
<b>11</b>	0,37	0,31	12	NO	6,55	274	554	22
<b>12</b>	0,31	0,26	12	NO	6,98	301	562	17
<b>13</b>	0,26	0,25	12	NO	6,95	127	563	7

El alambre de cobre Cu-ETP1 de  $\varnothing$  2 mm, empleado como materia prima para el proceso de trefilado secuencial multi-etapa de acabado, procede directamente del proceso de trefilado en desbaste que se propuso en el apartado anterior y presenta una deformación acumulada  $\varepsilon=2,77$  al inicio de este proceso de acabado.

Los resultados obtenidos tras realizar las simulaciones, correspondientes a cada una de las trece etapas de la secuencia que se propuso y diseñó anteriormente, con el software *Deform2D* han arrojado los valores de las tensiones, deformaciones y fuerzas de estirado presentados en la Tabla 4.88.

Todas las etapas de la secuencia optimizada presentan un valor de  $\sigma_e$  por debajo del límite de fluencia  $Y_f$  y del límite rotura  $\sigma_{UTS}$ , lo que indica que no se producirán roturas por tracción en ninguna de las etapas del proceso secuencial analizado.

El límite de fluencia del metal se ve superado sólo en el interior del cono de la hilera de estirado, zona en la que el valor de la tensión  $\sigma_{máx}$  presenta un valor superior al límite de fluencia en todas las etapas. Este hecho confirma que es en esta zona en la que se producirá la deformación plástica durante el estirado en cada etapa.

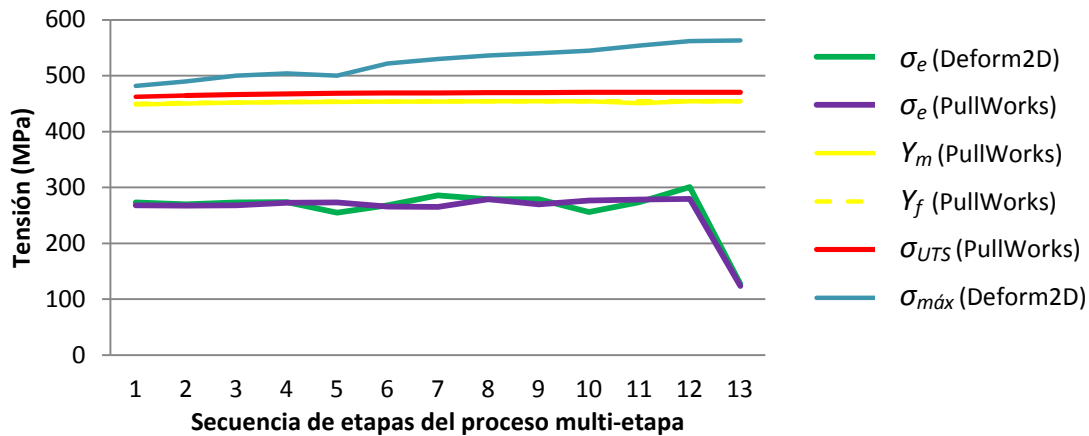


Figura 4.96 Tensión estirado  $\sigma_e$  obtenida para el trefilado optimizado en desbaste (*Cunext Copper Industries S.L.*).

En la Figura 4.96 se representan gráficamente los resultados obtenidos, para los valores medidos de la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$  obtenida en las simulaciones, así como los de la tensión máxima  $\sigma_{m\acute{a}x}$  alcanzada en la zona de deformación.

Se puede afirmar que el diseño de la secuencia de acabado multi-etapa propuesto es técnicamente viable, ya que los resultados obtenidos con *PullWorks* y la metodología propuesta así lo confirman. Además se ha comprobado mediante las simulaciones realizadas con el software *Deform2D*, aplicando el método de los elementos finitos al proceso en cuestión, que los resultados que ofrece *PullWorks* son muy semejantes a los obtenidos a partir de las mencionadas simulaciones, tal y como se puede ver en la gráfica de la Figura 4.96.

#### 4.5.8 Discusión de los resultados obtenidos

En base al análisis de los resultados obtenidos se deducen las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos para ambos procesos han confirmado que no es necesario recocido intermedio alguno. Esto se ha comprobado por el método analítico propuesto y en las simulaciones numéricas realizadas, para todas y cada una de las etapas de las secuencias diseñadas como alternativa de los mismos.
- Los diseños de las secuencias, correspondientes a los procesos de trefilado multi-etapa de desbaste y acabado, obtenidos en para un factor de forma  $\Delta$  equiparado al indicado en los procesos de la empresa, se han simulado con la aplicación de la metodología propuesta y con el método de los elementos finitos. La representación gráfica de la Figura 4.97 y la Figura 4.98 muestra la buena correspondencia de los valores obtenidos, por uno y otro método, para la tensión de estirado  $\sigma_e$ .

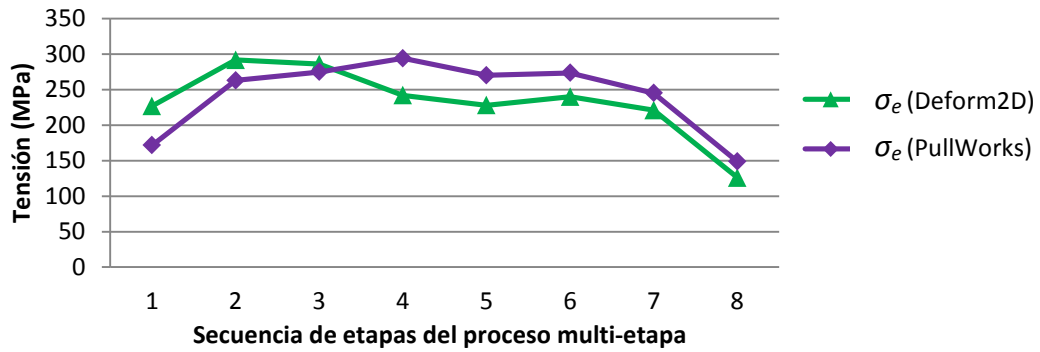


Figura 4.97 Evolución de  $\sigma_e$  para el proceso de trefilado en desbaste del cobre Cu-ETP1 de Cunext Copper Industries S.L., obtenido con PullWorks y Deform2D.

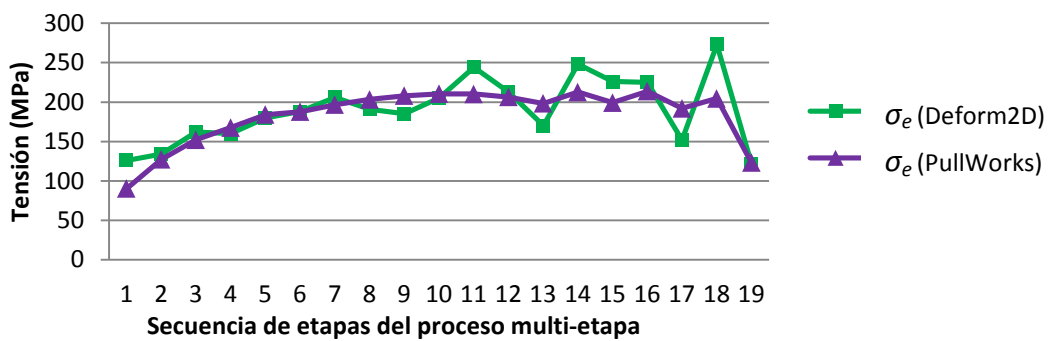


Figura 4.98 Evolución de  $\sigma_e$  para el proceso de trefilado en acabado del cobre Cu-ETP1 de Cunext Copper Industries S.L., obtenido con PullWorks y Deform2D.

- Los resultados obtenidos para  $\sigma_e$ , a partir de las simulaciones realizadas con el software *Deform2D*, permiten verificar la buena fiabilidad de la metodología propuesta aplicada al análisis del trefilado del metal caracterizado en este caso.
- La aplicación informática desarrollada, en base a la metodología analítica propuesta, da resultados satisfactorios en el diseño de la secuencia de etapas del proceso multi-etapa de estirado. Esta herramienta permite obtener los resultados, a partir de los que es posible estudiar la evolución de la tensión de estirado efectiva  $\sigma_e$ , y estudiar la viabilidad tecnológica de este tipo de procesos.

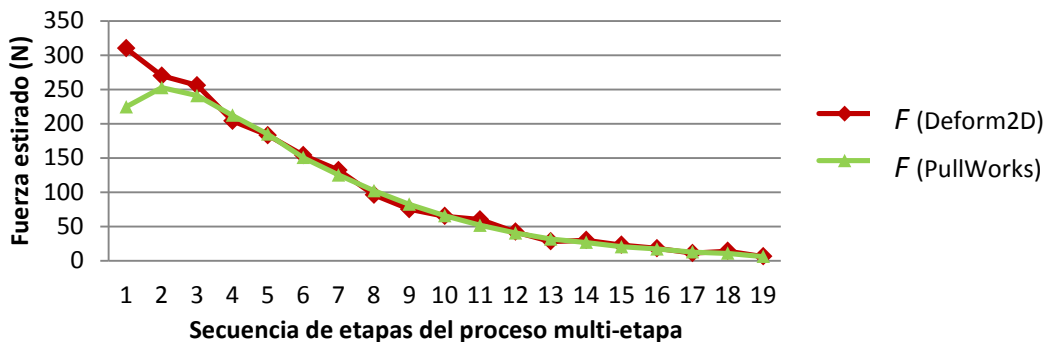


Figura 4.99 Evolución de la fuerza de estirado en la secuencia de desbaste del cobre diseñada para Cunext Copper Industries S.L., obtenido con PullWorks y Deform2D.

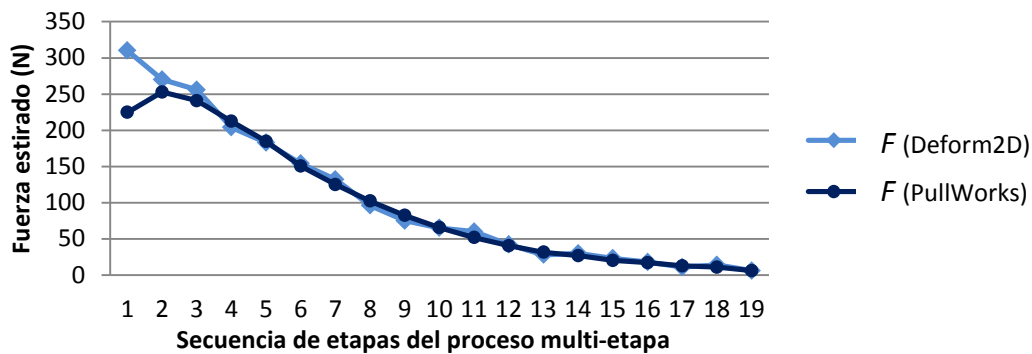


Figura 4.100 Evolución de la fuerza de estirado en la secuencia de acabado del cobre diseñada para *Cunext Copper Industries S.L.*, obtenido con *PullWorks* y *Deform2D*.

- En dichas representaciones gráficas (Figura 4.99 y Figura 4.100) se puede ver que, aunque el valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$  sigue una evolución creciente como consecuencia del endurecimiento del material al ser deformado plásticamente, el valor de la fuerza de estirado  $F$  va disminuyendo, siendo menor a medida que la sección se reduce a lo largo de la secuencia multi-etapa de trefilado. Además, en ambas gráficas se puede observar la buena correspondencia en los valores obtenidos por ambos métodos para la fuerza  $F$  de estirado.
- En una propuesta alternativa se ha conseguido optimizar el proceso secuencial de trefilado multi-etapa, pasando de 8 etapas a 5 y sin necesidad de incluir recocido intermedio alguno. De esta forma se necesitan menos hileras de estirado y el proceso podría realizarse en una máquina más pequeña, con el consiguiente ahorro económico en su construcción.

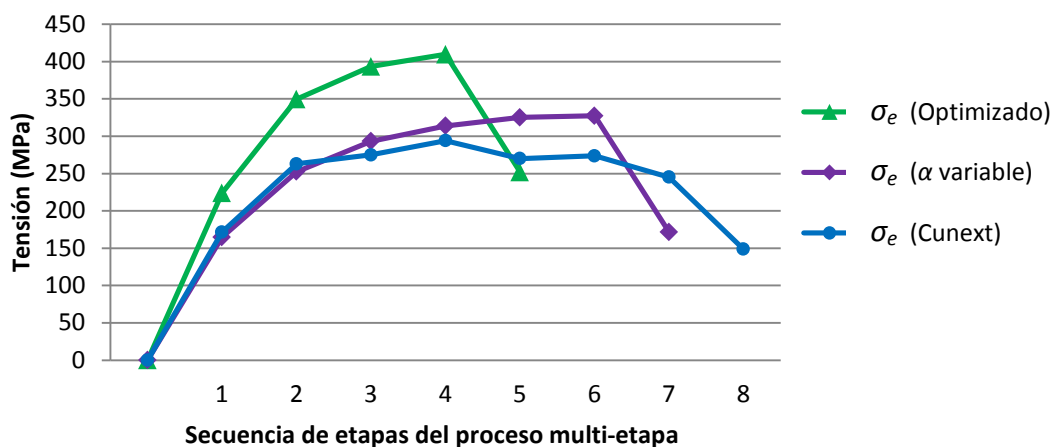


Figura 4.101 Comparativa gráfica de los tres procesos diseñados para el trefilado de desbaste (*Cunext Copper Industries, S.L.*).

- En la gráfica comparativa de la Figura 4.101 se observa la evolución de la tensión de estirado efectiva  $\sigma_e$  en los tres procesos diseñados y analizados para el trefilado secuencial de desbaste multi-etapa. Se puede ver que el diseño de 5 etapas es el

más ajustado por debajo de los límites del proceso y por tanto el más óptimo desde el punto de vista técnico y económico. Esta afirmación se justifica en que, manteniendo un proceso sin necesidad de recocidos intermedios, un menor número de etapas se traducirá en menor necesidad de hileras de trefilado y en la posibilidad de diseñar una nueva máquina de trefilado más pequeña y económica. No obstante, se debe tener en cuenta que las características mecánicas del producto semielaborado obtenido dependen en gran medida del grado de endurecimiento por deformación en frío adquirido por el cobre trefilado.

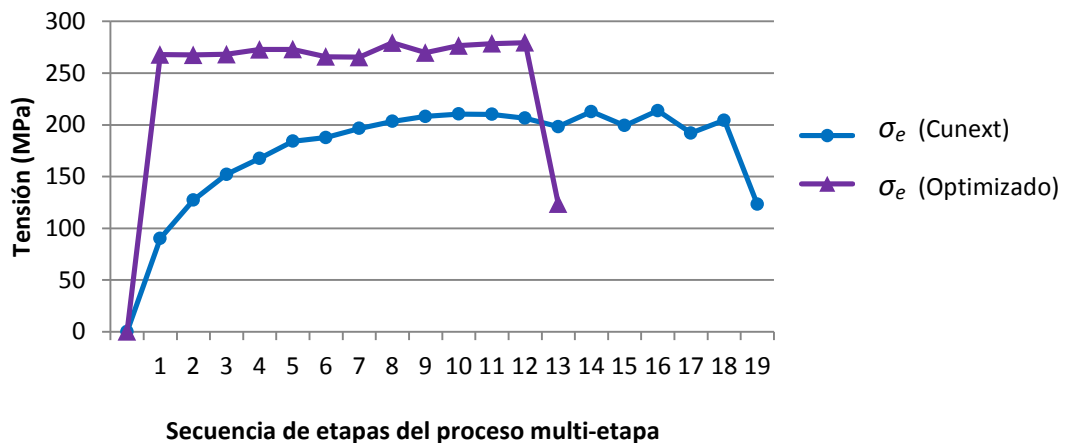


Figura 4.102 Comparativa gráfica de los dos procesos diseñados para el trefilado de acabado (sin recocidos intermedios).

- En la gráfica comparativa de la Figura 4.102 se observa la evolución del valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$ , en el proceso de 19 etapas que emula la secuencia multi-etapa original de acabado. Se puede ver que la propuesta alternativa reduce el número de etapas necesarias a 13, con el consiguiente ahorro de hileras. Las propiedades mecánicas del producto final obtenido dependen en gran medida del grado de endurecimiento por deformación en frío adquirido por el cobre trefilado.
- En los estudios y análisis realizados por los métodos analítico y numérico, se han obtenido resultados que en ningún caso presentan valores que superen los límites establecidos por las condiciones límite en la metodología propuesta. Estos están siempre por debajo del valor de la tensión de rotura  $R_m$ ,  $\sigma_{UTS}$  y la tensión de fluencia  $Y$ ,  $\sigma_Y$ .
- Las simulaciones realizadas con el software *Deform2D* han permitido verificar que no se produce rotura ni deformaciones indeseadas en el producto estirado, en ninguna de las etapas y en todas las propuestas diseñadas y analizadas, para ambos procesos de desbaste y acabado.
- Cabe señalar que los valores, tanto del coeficiente de resistencia a la deformación  $C$  como del coeficiente de endurecimiento por deformación  $n$ , son valores que van a

evolucionar a medida que el metal es deformado plásticamente en frío. Ambos coeficientes presentan su valor máximo cuando el material es recocido hasta alcanzar su estado de mayor ductilidad.

- Se han considerado unos valores fijos para coeficiente de resistencia a la deformación  $C$  y el coeficiente de endurecimiento por deformación  $n$ , valores que aplicados a todos los cálculos correspondientes al análisis tecnológico del proceso. Este aspecto ha sido simplificado para facilitar la programación de los cálculos en la aplicación informática *PullWorks* desarrollada en este trabajo.
- Para poder implementar la ecuación de *Ludwik-Hollomon*, se hace imprescindible definir los valores adecuados de los coeficientes de resistencia y endurecimiento, a partir de los ensayos de tracción de las muestras obtenidas.

## **4.6 Recapitulación**

Se han presentado una serie de casos del proceso secuencial de estirado multi-etapa aplicado a diferentes metales, empleando la metodología propuesta para realizar su diseño y análisis, y en función de la variación de una u otra variable.

Se han procesado diversas aleaciones, de propiedades mecánicas dispares y representativas de los metales empleados como materia prima en este tipo de proceso, considerado la influencia de todas las variables consideradas en dicho proceso, con el doble objetivo de comprobar y depurar el funcionamiento de la metodología desarrollada y la aplicación informática *PullWorks*, en un rango de materiales y condiciones amplio y representativo, y estudiando la influencia de diferentes parámetros que intervienen el proceso secuencial de estirado multi-etapa.

Este capítulo cierra el trabajo de investigación en esta tesis, completando el apartado de aplicación con un completo y minucioso estudio del proceso de trefilado secuencial multi-etapa en marcha en la empresa cordobesa *Cunext Copper Industries S. L.*



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## CAPÍTULO 5

### Conclusiones finales

---



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

### **5.1 Introducción**

Para el desarrollo del presente capítulo se han revisado los resultados obtenidos para diferentes casos del proceso de estirado secuencial multi-etapa, casos estudiados y analizados con la ayuda de la metodología propuesta. En el mismo, se hace una amplia revisión de los objetivos iniciales con el fin de conocer el grado en que éstos han sido satisfechos.

Esta reflexión sobre el trabajo realizado permite detectar y señalar las aportaciones del mismo desde la observación de una serie de ejemplos representativos del proceso secuencial de estirado multi-etapa.

El objetivo de esta tarea crítica es la evaluación final del funcionamiento de la metodología y de la herramienta informática en la que esta ha sido implementada, con la pretensión de conocer su sensibilidad en función de la variabilidad en las diferentes condiciones del proceso objeto de estudio, determinando sus limitaciones y mostrando las posibilidades de mejora y desarrollo futuro.

Este capítulo se desglosa en tres apartados bien diferenciados. En primera instancia, se presentan una serie de puntos que corresponden con aquellas conclusiones de carácter general, conclusiones mediante las que se pretende determinar el grado de consecución en los objetivos principales planteados al inicio. Posteriormente, en las conclusiones particulares se incluyen aquellos otros logros y observaciones que, si bien no forman parte de los objetivos iniciales, han sido necesarios y han puesto al descubierto aspectos que, a la postre, han sido importantes. Finalmente, de cara al futuro, se sugieren diversas posibilidades para dar opciones de continuidad al trabajo realizado. Resulta interesante, a la finalización de un trabajo de estas características, procurar las posibles futuras líneas de desarrollo y sugerir las propuestas adecuadas para la continuación o las mejoras en la propuesta presentada.

### **5.2 Conclusiones generales**

- Se ha realizado una propuesta metodológica, basada en un método analítico genérico, para la caracterización geométrica y tecnológica del proceso de estirado secuencial multi-etapa de productos de sección circular, aportando una nueva opción implementable a cualquier otro proceso de estirado e incluso a muchos otros procesos en el ámbito del conformado por deformación plástica en frío.
- El tratamiento individual de cada una de las variables del proceso objeto de estudio y el particular, enfocado a cada una de las distintas aleaciones metálicas elegidas como representativas, ha permitido identificar los detalles y aspectos problemáticos de la propuesta metodológica. Se ha comprobado que es fundamental conocer los coeficientes que definen el endurecimiento por deformación en frío  $C$  y  $n$ , además del valor de tensión de fluencia  $Y$  y tensión límite de rotura  $Rm$  que presenta el

metal en su estado recocido, en todos los casos, para que la ley de endurecimiento de *Hollomon-Ludwik* sea precisa en sus resultados.

- Se han identificado los límites fundamentales que rigen el funcionamiento del sistema desarrollado. El valor de la tensión de fluencia  $Y$  del metal a la salida en cada etapa será el límite que la tensión de estirado  $\sigma_e$  nunca podrá superar mientras que, por otro lado, el valor de la tensión de rotura  $Rm=\sigma_{UTS}$  tampoco podrá alcanzarse. Cuando el valor de la tensión de estirado  $\sigma_e$  en una etapa determinada alcanza o supera dicho valor se producirá la rotura del alambre o barra y, por lo tanto, esto indicará que el metal ha perdido su deformabilidad plástica en frío y debe recocerse antes de iniciar dicha etapa. El sistema garantiza un diseño secuencial multi-etapa que cumple con estas restricciones, indicando cuando es necesario aplicar el recocido.
- Se ha conseguido realizar un amplio estudio comparativo, a pesar de la gran cantidad de variables de entrada del proceso y la complejidad para aglutinar dichos datos. Esto ha sido posible mediante la acotación de los rangos de variabilidad de los diferentes parámetros significativos, considerando la caracterización de éstos mediante valores genéricos, generalmente de origen empírico, que han sido rescatados de la bibliografía y la documentación de referencia.
- Además del tratamiento de teorías y leyes conocidas, el trabajo realizado ha puesto al descubierto la necesidad de un conocimiento detallado del comportamiento del metal y de la evolución de sus propiedades mecánicas durante el proceso, para que los resultados obtenidos con el sistema propuesto sean óptimos.
- Diversos estudios consultados y revisados durante el desarrollo de esta tesis, constatan que el comportamiento frente al endurecimiento por deformación en frío que presenta el metal procesado afecta particularmente a las características y funcionalidad del producto final estirado.
- Un análisis de los resultados obtenidos, para los distintos casos de aplicación desarrollados aquí, ha puesto de manifiesto lo indispensable que es un completo y detallado estudio previo del metal a procesar y de las condiciones tribológicas del sistema hilera-metal estirado, para poder implementar coeficientes y leyes de comportamiento eficaces y precisas en la metodología desarrollada.
- Se ha constatado la existencia de diversos estudios previos sobre el proceso secuencial de estirado multi-etapa, trabajos que persiguen conocer la influencia de los diferentes parámetros característicos de éste en su funcionamiento y/o en las propiedades finales del metal procesado. La documentación previa ha permitido el desarrollo de una metodología práctica y completa para el diseño y análisis de este tipo de procesos, considerando todos los factores evaluados.

### **5.3 Conclusiones particulares**

- Se ha implementado una aplicación denominada *PullWorks*, con el objetivo de agilizar los cálculos derivados de la aplicación de la metodología propuesta en todos los casos que se han diseñado y analizado.
- La metodología desarrollada y la aplicación *PullWorks* arrojan resultados muy similares a los obtenidos con el método de los elementos finitos, para el caso de un acero dúctil. Existe una gran similitud en la evolución en el valor de la tensión de estirado para las etapas del proceso de estirado secuencial multi-etapa en el trefilado del acero ER 70S-6 [AWS A5.18/A5.18M:2005], valor obtenido mediante la metodología analítica propuesta y con el método numérico o MEF.
- En el estirado secuencial multi-etapa de un acero dúctil se aprecia una muy buena concordancia en los valores de la tensión de estirado  $\sigma_e$  obtenidos en la práctica experimental frente a aquellos obtenidos mediante la propuesta implementada en *PullWorks*, así como en la evolución de éstos tal y como se puede ver en los resultados obtenidos para esta característica.
- El acero dúctil ER 70S-6 presenta un elevado grado de endurecimiento durante su conformado plástico por trefilado, hecho que se refleja perfectamente en los resultados obtenidos con la ayuda del sistema desarrollado en el presente trabajo. *PullWorks* refleja fielmente el efecto del endurecimiento por deformación en el caso estudiado, habiendo tomado los valores de los coeficientes de endurecimiento consultados en el documento tomado como referencia para el estudio del proceso de trefilado multi-etapa de este tipo de acero [Celentano et al., 2009].
- Para los casos estudiados mediante la metodología propuesta del estirado secuencial multi-etapa del acero dúctil ER 70S-6, se aprecia que los valores de la tensión de estirado  $\sigma_e$ , obtenidos como resultado en el programa *PullWorks*, son ligeramente inferiores a los obtenidos mediante el método de análisis de los elementos finitos, aplicado con el software *Deform2D*. Este aspecto puede ser debido a que, como se expuso en los capítulos segundo y tercero, la metodología desarrollada no tiene en cuenta el posible efecto de la temperatura que se produce en la zona de deformación como consecuencia del rozamiento entre metal e hilera.
- Para un proceso de estirado secuencial multi-etapa realizado en un determinado número de etapas, sin modificar ninguno de los parámetros geométricos en las hileras utilizadas, las condiciones de refrigeración y lubricación de la zona de contacto van a influir directamente en el proceso. Estas condiciones deben ser tales que minimicen la influencia de la temperatura y del rozamiento en la zona de contacto entre herramienta y metal conformado.

## Conclusiones Finales

---

- Los valores de la tensión efectiva  $\sigma_e$ , obtenidos para las secuencias diseñadas en los casos de estudio del estado multi-etapa del cobre y obtenidos mediante la herramienta *PullWorks*, son sólo ligeramente inferiores a los arrojados en las simulaciones realizadas con la herramienta numérica *Deform2D*.
- El estudio realizado para el trefilado de aluminio AA 7075-O (*Aluminum Association*), denominado también AW 7075-O [UNE EN 755-2:2016], ha constatado que la implicación del denominado factor de forma  $\Delta$  en la metodología es muy acertada. La libertad de jugar con el valor de este factor ha permitido diseñar secuencias de trefilado totalmente distintas y en las cuales se obtienen productos de aluminio estirado con características muy diferentes.
- Para los procesos de estirado secuencial multi-etapa de aluminio diseñados, se observa una buena concordancia en los resultados obtenidos en el valor de la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$  con *PullWorks* y a partir de las simulaciones realizadas con *Deform2D*. La validez de la metodología propuesta se confirma, considerando las condiciones geométricas y tecnológicas descritas, en estos casos.
- En el caso de estudio del trefilado del aluminio AA 7075-O, se ha podido comprobar la enorme mejora que supone la aplicación de la metodología propuesta, basada en un análisis tensional que considera la influencia del trabajo de deformación homogénea, el trabajo debido al rozamiento y el trabajo adicional debido a la distorsión interna que acumula el material estirado, en comparación con otros métodos que únicamente consideran el trabajo de deformación homogénea y no consideran estos otros factores tan determinantes.
- El estudio y diseño de un proceso de trefilado secuencial multi-etapa del latón C26000 ASTM B846-11a], denominado también CW505L [UNE EN 1412:1996], ha corroborado la gran influencia del semiángulo  $\alpha$  del cono de reducción de las hileras utilizadas en el diseño de la secuencia de etapas, las características del proceso secuencial de estirado y en las propiedades finales del metal procesado.
- En los procesos de estirado multi-etapa del latón presentados se ha verificado que la evolución de los valores de la tensión efectiva de estirado  $\sigma_e$ , obtenidos mediante la herramienta informática *PullWorks*, se mantienen generalmente en valores muy similares, aunque algo inferiores a los obtenidos con ayuda del software numérico *Deform2D*.
- En el caso de estudio del trefilado del latón, se ha podido comprobar una vez más la enorme mejora que supone la aplicación de la metodología propuesta en comparación con otros métodos que únicamente consideran el trabajo de deformación homogénea.

## **Conclusiones Finales**

---

- Se ha podido comprobar para la mayoría de los casos estudiados que los valores obtenidos para la tensión de estirado  $\sigma_e$ , mediante el procedimiento analítico implementado en el sistema desarrollado, están en el mismo rango o ligeramente por debajo de los obtenidos en el análisis numérico posterior, aunque siempre por debajo de los valores experimentales.
- En el estudio de los procesos de trefilado de la empresa *Cunext Copper Industries S.L.* se ha podido confirmar que existe buena correlación en los resultados obtenidos mediante el método analítico implementado en la metodología propuesta y los obtenidos a partir de las simulaciones realizadas mediante el método numérico.
- A mayor valor del factor de forma  $\Delta$ , para un mismo valor del semi-ángulo  $\alpha$  del cono de reducción, la ratio de reducción se reduce en la secuencia. Al reducirse el ratio y mantenerse el valor de dicho semi-ángulo, el sistema desarrollado va a arrojar siempre una secuencia multi-etapa más larga.
- El término correspondiente a la tensión de estirado consecuencia del rozamiento en la zona de contacto se ve reducido, de forma importante, al incrementar el número de etapas de la secuencia de estirado multi-etapa, para una misma reducción total y bajo las mismas condiciones de lubricación utilizando idéntico semiángulo en las hileras de estirado. La superficie de contacto en la hilera es mayor en forma exponencial cuanto mayor es el ratio de reducción aplicado en una etapa concreta, con lo cual se corrobora el hecho mencionado.
- Mayor longitud de secuencia implica una menor influencia del fenómeno de endurecimiento por deformación, para una misma reducción total de sección a realizar. Por el contrario, menor longitud de secuencia implica una influencia mucho más acusada del fenómeno de endurecimiento por deformación. Este hecho ha podido constatarse tras el correspondiente análisis de los casos estudiados.
- Ambos factores, rozamiento y endurecimiento por deformación en frío, ven reducida su influencia en el proceso cuando éste se diseña con un carácter multi-etapa. La metodología permite diseñar procesos secuenciales de estirado multi-etapa realizables y mediante su aplicación es posible mejorarlos observando el grado de influencia de estos parámetros, la cual se refleja en la evolución de las propiedades del material trefilado y de las distintas componentes de la tensión de estirado necesaria en cada etapa.
- El método de análisis local de tensiones, en el cual se fundamenta la metodología aplicada en el presente trabajo, no permite conocer de ninguna forma la distribución de tensiones en la sección del producto estirado. Por lo tanto, el

sistema desarrollado trata el valor de la deformación considerándolo como un valor de distribución uniforme en toda la sección de dicho producto.

- La utilización del sistema *PullWorks* permite al usuario interactuar para realizar nuevos diseños, aplicando diferentes valores del factor de forma  $\Delta$  de las hileras. Esta opción permite obtener diferentes soluciones de diseño para un mismo proceso, de manera que ofrece la posibilidad de conseguir un producto trefilado con propiedades muy diferentes en cada caso. El programa realizará los cálculos necesarios para integrar los recocidos intermedios adecuadamente, en el caso en que estos sean necesarios, evitando que el límite de rotura del metal a la salida de la hilera se alcance o supere en ninguna de las etapas del proceso diseñado.
- Observando los resultados del análisis tecnológico de los diferentes diseños realizados mediante la metodología propuesta y la aplicación *PullWorks* desarrollada, se puede afirmar que el factor de forma  $\Delta$  lleva implícita tanto la influencia del rozamiento como de la distorsión interna del material en el estirado (véase en el apartado 4 del capítulo 2 referido a los parámetros fundamentales de la geometría de la hilera de estirado).
- Una vez concluido el análisis los resultados obtenidos en cada uno de los procesos estudiados en este trabajo, con la ayuda del sistema desarrollado para el diseño y el análisis tecnológico, se concluye que el valor óptimo del factor de forma  $\Delta$  está generalmente entre 1,5 y 3,20. Los valores considerados, en los diferentes casos estudiados, para el semiángulo  $\alpha$  están entre los 5° y los 11° y el factor de forma adquiere un valor dentro del intervalo óptimo mencionado en todos ellos.
- Los estudios realizados han confirmado los valores óptimos o admisibles para el % de reducción de sección aplicable en el estirado secuencial del acero, el cobre o el aluminio, que han sido consultados en la bibliografía [Tschaetsch, 2005] y corroborados a partir del análisis de los diseños realizados en los procesos de los artículos de investigación consultados, que se han tomado como referencia para los correspondientes estudios de aplicación en dichos casos.
- En un proceso de estirado secuencial multi-etapa realizado en un determinado número de etapas, sin modificar ninguno de los parámetros geométricos en las hileras utilizadas, el valor del coeficiente de rozamiento repercute en el valor de la tensión de estirado necesaria en cada etapa. *PullWorks* permite comprobar que a mayor coeficiente de rozamiento, mayor será la tensión de estirado. Además, este hecho puede significar que, para mantener el número de etapas, sea necesario incluir uno o varios recocidos intermedios.

## Conclusiones Finales

---

- El sistema desarrollado *PullWorks* es capaz de proporcionar el diseño de la secuencia de estaciones de recocido intermedio "on-line", estaciones intercaladas en la secuencia de etapas de reducción del proceso de estirado multi-etapa.
- La implicación del factor de forma  $\Delta$  y el planteamiento de dejar su valor a elección del usuario han permitido desarrollar un sistema experto abierto, que permite obtener múltiples diseños de secuencia para una misma reducción total a realizar.
- El sistema desarrollado e implementado en la aplicación informática *PullWorks*, permite diseñar un proceso con unas determinadas características en cuanto al número de etapas de estirado y la secuencia necesaria de recocidos "en línea" que deben integrarse en ella. Esta característica facilita el proceso apropiado para conseguir un producto estirado que presente las propiedades mecánicas deseadas. Observando los valores obtenidos con la aplicación *PullWorks*, para la deformación efectiva acumulada  $\epsilon$ , el límite de fluencia y el límite de rotura en el producto final estirado, es posible un análisis que ofrece una muy buena aproximación de las características finales que presentará el producto obtenido, permitiendo valorar sus aptitudes para una determinada aplicación o función.
- La ley de *Ludwik-Hollomon* ha ofrecido buenos resultados en la estimación de la influencia que el fenómeno de endurecimiento por deformación en frío tiene en el valor del límite de fluencia del metal estirado. Esta propiedad influye directamente en el valor de la tensión de estirado mínima necesaria en cada etapa de la secuencia de estirado multi-etapa.
- En base a la documentación y la bibliografía consultada, se ha considerado la tensión de fluencia como límite para el diseño de la secuencia de etapas del proceso de estirado multi-etapa. Gracias a los estudios realizados, ha sido posible confirmar un buen comportamiento de este límite en los diseños realizados
- Se ha considerado necesario establecer un límite para que el sistema experto desarrollado sea capaz de realizar un diseño de etapas de recocido intermedio, en paralelo con el diseño de estirado secuencial multi-etapa. Para este menester, el límite de rotura se ha impuesto como límite para poder establecer entre qué etapas de reducción debe de aplicarse este tratamiento "en línea".
- Los estudios realizados inicialmente, además de los ensayos mecánicos realizados para diferentes muestras correspondientes al cobre en diferentes grados de reducción de sección conseguidos mediante estirado, han puesto de manifiesto la necesidad de establecer una ley matemática que permita conocer la evolución del valor de esta tensión de rotura. Se ha comprobado experimentalmente, tal y como se indica en muchos de los documentos de investigación consultados, que este

límite se incrementa en su valor a medida que se incrementa el grado de reducción de sección acumulado durante el proceso de estirado secuencial multi-etapa.

- La herramienta metodológica propuesta y la aplicación informática *PullWorks* en la que esta se ha implementado han permitido realizar un estudio completo de los procesos de trefilado secuenciales multi-etapa de desbaste y de acabado que se realizan en la empresa Cunext Copper Industries, S.L. y se han desarrollado sendas propuestas de mejora y optimización de ambos casos.
- Se ha propuesto un procedimiento alternativo, para diseñar y estudiar el proceso de estirado secuencial multi-etapa de productos de sección circular, que constituye una herramienta complementaria y útil para la ayuda en el diseño de las máquinas, utillajes y herramientas para el estirado secuencial multi-etapa, ofreciendo una serie de datos tecnológicos que pueden servir en la definición y la comprobación adecuada de los distintos componentes mecánicos y eléctricos necesarios en la construcción de las máquinas empleadas en este tipo de proceso.

### **5.4 Estado actual y posibles líneas de desarrollo futuro**

La herramienta informática desarrollada en esta tesis facilita, junto con las soluciones y las conclusiones obtenidas en el estudio del proceso secuencial de estirado multi-etapa, un conjunto de elementos que significan un sólido punto de partida para el desarrollo de nuevas líneas de investigación, nuevas aportaciones que mejoren, completen o incluso amplíen la capacidad de aplicación a un enfoque más generalista en el ámbito tratado.

Debe tenerse en cuenta que el proceso estudiado en este trabajo puede presentar infinidad de variaciones en la geometría de la sección del producto estirado. Además, las bases y fundamentos teóricos considerados en el desarrollo metodológico realizado son aplicables a muchos otros procesos de conformado por deformación plástica diferentes al estudiado.

De la misma manera que en cualquier estudio de las características del presentado, el campo abierto a la finalización de este trabajo de investigación muestra un amplio abanico de posibilidades imposibles de abarcar en un único trabajo. Por este motivo se ha creído conveniente presentar un elenco representativo con las opciones más interesantes para el futuro desarrollo de una línea investigadora en el ámbito que nos compete:

- La inclusión de otros tipos de geometría de sección del producto, obtenido por estirado secuencial, implementando idéntica metodología y ampliando así el campo de aplicabilidad de la herramienta informática creada en este trabajo.

## ***Conclusiones Finales***

---

- La consideración otros procesos de conformado por deformación plástica para los que sea posible la aplicación de los criterios y métodos utilizados. El desarrollo e implementación de la metodología propuesta en este trabajo, aplicada a otro u otros procesos de conformado por deformación plástica que presenten viabilidad al respecto.
- La consideración de otros métodos y/o criterios y su inclusión dentro de la propuesta metodológica y de la aplicación informática desarrollada, aspecto que permitiría la comparación y la evaluación de los resultados obtenidos según estas diferentes reglas, permitiendo aplicar la mejor solución a cada caso.
- El desarrollo de un estudio de aplicabilidad y uso del sistema desarrollado, definición de los métodos y sistemas alternativos a este, determinación de los procedimientos de trabajo, los criterios de comparación y la evaluación de resultados, así como de la posible problemática existente, orientados a su aplicación en el ámbito de la docencia y de la enseñanza sobre este tipo de procesos.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## REFERENCIAS

---



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Referencias

---

- [Adamczyk et al., 2012] Adamczyk J., Suliga M., Pilarczyk J. W., Burdek M., *"Bearing length influence wiredrawing"*, Archives of Metallurgy and Materials, vol. 57, 4, p. 1106-1110, 2012.
- [Allen, 2011] Allen P., *"Idea Man"*, Penguin Group, vol. 57, 4, p. 1-6, 2011.
- [Anchaluisa et al., 2012] Anchaluisa M.A., Serrano J.P., *"Determinación del proceso de producción por fundición de antenas alimentadoras de energía para el sistema integrado trolebús en la ciudad de Quito"*, Proyecto Fin de Carrera, Escuela Politécnica Nacional de Quito, p. 12-16, 2012.
- [Apraiz, 1949] Apraiz Barreiro J., *"Tratamientos térmicos de los aceros"*, CIE, p. 275-293, 1949.
- [ASM Handbook, 1990] ASM International Handbook Committee, *"ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials"*, ASM International Handbook Committee, vol. 2, p. 69 y 195, 1990.
- [ASM Handbook, 1992] ASM International Handbook Committee, *"ASM Handbook: Friction, lubrication and wear technology"*, ASM International Handbook Committee, vol. 18, p. 115, 1992.
- [Atienza, 2001] Atienza J.M., *"Tensiones Residuales en Alambres de Acero Trefilado"*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, p. 130-192, 2001.
- [Atienza et al., 2005] Atienza J.M., Ruiz J., Martínez M.L., Mompean F.J., García M., Elices M., *"Residual stresses in cold drawn pearlitic rods"*, Scripta Materialia, vol. 52, p. 1223-1228, 2005.
- [Atkins et al., 1968] Atkins A.G., Cadell R.M., *"The incorporation of work hardening and redundant work in rod-drawing analyses"*, International Journal of Mechanical Sciences, Pergamon Press, Vol. 10, p. 15-28. , 1968.
- [Attaway, 1999] Attaway S. W., *"The mechanics of friction in rope rescue"*, International Technical Rescue Symposium, p. 1-16, 1999.
- [Avitzur, 1964] Avitzur B., *"Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Large Cone Angle"*, Journal of Engineering for Industries, vol. 86, Nº 4, p. 305-314, 1964.

## ***Referencias***

---

- [Avitzur, 1968]** Avitzur B., *“Metal Forming: Process and Analysis”*, McGraw-Hill, 1968.
- [Avitzur, 1983]** Avitzur B., *“Handbook of Metal-Forming Processes”*, John Wiley, 1983.
- [Baker et al., 1992]** Baker G., Wright R. N., *“The influence of die material on the friction coefficient in the drawing of ETP Cu”*, Wire Journal International, vol. 25, nº 6, p. 67, 1992.
- [Betancourt et al., 1988]** Betancourt L. G., Guachamin J. P., *“Diseño y construcción de un equipo para el proceso de trefilado en frío de metales no ferrosos a ser implementado en laboratorio de máquinas y herramientas del departamento de ciencias de la energía y mecánica”*, Tesis Doctoral, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, p. 136, 2014.
- [Brücker et al., 1988]** Brücker M., Keller D., Reissner J., *“Computer-Aided Drawing of Profiles from Round and Square Bar”*, Annals of the The International Academy for Production Engineering (CIRP), vol. 37/1, p. 247-250, 1988.
- [Byon et al., 2011]** Byon S. M., Lee S. M., Lee D. W., Lee Y. H., Lee Y., *“Effect of coating material and lubricant on forming force and surface defects in wire drawing process”*, Transactions of non ferrous metals society of China, vol. 21, p. 104-110, 2011.
- [Callister, 2007]** Callister W. D., *“Materials Science and Engineering”*, John Wiley & Sons, p.192-193, 2007.
- [Caddell et al., 1971]** Cadell R. M, Atkins A. G., *“Redundant deformation in wire and rod drawing”*, Wire Ind., 38, p. 82-85, 1971.
- [Camacho, 2005]** Camacho A. M., *“Análisis por el método de los elementos finitos de los procesos estacionarios de conformado por deformación plástica”*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UNED), p. 139–150, 2005.
- [Camacho et al., 2005]** Camacho A., Domingo R., Rubio E., González C., *“Analysis of the influence of back-pull in drawing process by the finite element method”*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 164–165, p. 1167–1174, 2005.

## Referencias

---

- [Campos et al., 2005] Campos H. B., de Barros J., Lopes R. H., Pertence A. E., Cetlin P. R., *“Methodology for the determination of the optimum die angle in wire drawing”*, Proceedings of the 18th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo: ABCM, p. 1-8, 2005.
- [Castro de et al., 1996] Castro A. M. R. Campos H. B., Cetlin P. R., *“Influence of die semi-angle on mechanical properties of single and multiple pass drawn copper”*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 60, p. 179-182, 1996.
- [Celentano et al., 2009] Celentano D. J., Palacios A. M., Rojas E. L., Cruchaga M. A., Artigas A. A., Monsalve A. E., *“Simulation and experimental validation of multiple-step wire drawing processes”*, Finite Elements in Analysis and Design, vol. 45, p. 163-180, 2009.
- [Çetinarslan et al., 2012] Çetinarslan C. S., *“A study on influences of some process parameters on cold drawing of ferrous wires”*, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, vol. 19, p. 221-228, 2012.
- [Çetinarslan et al., 2013] Çetinarslan C. S., Güzey A., *“Tensile Properties Of Cold-Drawn Low-Carbon Steel Wires Under Different Process Parameters”*, Materials and technology, vol. 47, Is. 2, p. 245-252, 2013.
- [Chakrabarty, 2006] Chakrabarty J., *“Theory of Plasticity”*, Elsevier Butterworth-Heinemann, p. 56-66, 2006.
- [Changsun et al., 2012] Changsun M., Naksoo K., *“Analysis of wire-drawing process with friction and thermal conditions obtained by inverse engineering”*, Journal of Mechanical Science and Technology, vol.26, Is., p. 2903-2911, 2012.
- [Chen et al., 2007] Chen D. C., Huang J. Y., *“Ultra precision Machining Process Dynamics and Surface Quality Monitoring”*, Materials Science and Engineering-A, vol. 464, p. 135–140, 2007.
- [Cheng et al., 2015] Cheng C., Wang Z., Hung W., Bukkapatnam S.T.S, Komanduri R., *“Ultra-precision Machining Process Dynamics and Surface Quality Monitoring”*, Procedia Manufacturing, vol. 1, p. 1–12, 2015.

## Referencias

---

- [Chiduwa et al., 2013] Chiduwa A. C., Nyanga L., Mhlanga S., van der Merwe A. F., Kanyemba G., *“Investigation of the effects of lubricant content on drawn copper wires”*, SAIEE25 Proceedings, 9th- 11th of July 2013, p. 604 1-9, 2013.
- [Coelho et al., 2008] Coelho J., Miguel V., Ferrer C., Calatayud A., Martínez A., *“Ensayos de rozamiento plano sobre aceros inoxidable austeníticos con diferente acabado superficial. Determinación de las condiciones de adhesión en el rozamiento”*, Revista de Metalurgia, 2008.
- [Cunningham, 2008] Cunningham D.J., *“ Optimization of high speed wire drawing using finite element analysis”*, Pennsylvania State University, 2008.
- [Cunningham et al., 2011] Cunningham D. J., Wright R. N., *“Die design, die pressure & die wear”*, Wire & Cable Technology International, vol. 39, nº3, p. 72-75, 2011.
- [Cunningham et al., 2013] Cunningham D. J., Wright R. N., Keane J., *“Improved Wire Quality with Advanced TCHP Dies”*, Inter-wire 2013 Conference, Allomet Corporation, 2013.
- [Davis, 1944] Davis E. A., *“Theory of Wire Drawing”*, Journal of Applied Mechanics, vol. 11, p. 193-198, 1944.
- [Davis et al., 1988] Davis J. R., Semiatin S. L., American Society for Metals, *“Metals Handbook 9th Edition: Forming and Forging”*, ASM International, vol. 14, p. 715-739, 1988.
- [Dieter, 1961] Dieter G. E., *“Mechanical Metallurgy”*, McGraw-Hill, p. 148, 1961.
- [Dieter et al., 2003] Dieter G. E., Kuhn H. A., Semiatin S. L. , *“Handbook of workability and process design”*, ASM International, p. 14, 2003.
- [Dixit, 2014] Dixit P. M., *“Finite element modeling of metal forming processes”*, Directions, vol. 14, Nº 1, p. 16-30 , 2014.
- [Dubar et al., 2006] Dubar L., Dubois A., Dubar M., *“Friction and wear phenomena in cold metal forming: an integrated approach”*, Proceedings of the IMechE, vol. 220, p. 1-10, Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2006.

## Referencias

---

- [de Castro et al., 1996] de Castro A. L. R., Campos H. B., Cetlin P. R., *"Influence of die semi-angle on mechanical properties of single and multiple pass drawn copper"*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 60, p. 179-182, 1996.
- [Dubois et al., 2002] Dubois A., Lazzarotto L., Dubar L., Oudin J., *"A multi-step lubricant evaluation strategy for wire drawing-extrusion-cold heading sequence"*, Wear, vol. 249, p. 951-961, 2002.
- [El-Domiaty et al., 1998] El-Domiaty A., Kassab S. Z., *"Temperature rise in wiredrawing"*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 83, p. 72-83, 1998.
- [Esteves Group, 2008] Esteves Group, *"The e-Wizard. Su manual sobre hileras de estirado"*, Esteves Group, Diamond Tools Group BV, 2ª edición, p. 10-25, 2008.
- [Fabík, 2013] Fabík R., *"Influence Of Technological Conditions Of Drawing On Inhomogeneity Of Deformation Under Conditions Of Hydro-Dynamic Lubrication"*, Metal, 15, 2013.
- [Fluhrer, 2004] Fluhrer J., *"Deform 2D versión 8.1 User's Manual"*, Scientific Forming Technologies Corporation, p. 1-288, 2004.
- [Fujiwara et al., 1993] Fujiwara S., Nishino I., Kuramochi S., Oaky M., Nagata C., *"Properties and applications of high-purity copper"*, First International Conference on Processing Materials for Properties, The Minerals, Metals & Materials Society, November 7-10, 1993.
- [Gálvez et al., 2002] Gálvez F., Atienza J. M., Ruiz J., Elices M., *"El efecto de la velocidad de deformación en la rotura de alambres de acero durante el trefilado"*, Anales de Mecánica de la Fractura, vol. 19, p. 73-78, 2002.
- [Gifford, 2001] Gifford R., *"An investigation of product quality modification capabilities during wire drawing"*, Lehigh University (USA), p. 104-106, 2001.
- [Gowtham et al., 2012] Gowtham K., Srikanth K.V.N.S., Murty K.L.N., *"Simulation Of The Effect Of Die Radius On Deep Drawing Process"*, International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering, vol. 2, Is. 1, p. 12-17, 2012.

- [Groover, 2010] Groover M.P., *“Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems”*, John Wiley & Sons, Inc., 4<sup>th</sup> ed., p. 430-437, 2010.
- [Gur'yanov, 2008] Gur'yanov G. N., *“Evaluating the maximum draft and safety factor in wire drawing”*, Translated from Metallurg, No. 10, p. 73–75, 2008.
- [Gur'yanov, 2015] Gur'yanov G. N., *“Hydrodynamic Friction in the Drawing of Thin Wire”*, Steel in Translation, vol. 45, Nº 2, p. 145-152, 2015.
- [Haddi et al., 2011] Haddi A., Imad A., Vega G., *“On the analisis of Die Wear in Wire-Drawing Process”*, Tribology Transactions, vol. 55, Is. 4, p. 466-472, 2011.
- [Haddi et al., 2012] Haddi A., Imad A., Vega G., *“Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process”*, Materials and Design, 2011.
- [Haghighat et al., 2011] Haghighat H., Akhavan A., *“Drawing of Twisted Square Section Rod from Round Bar: An Analysis and Some Experiments”*, International Journal of Engineering & Applied Sciences, vol.3, Is. 2, p. 13-21, 2010.
- [Haghighat et al., 2010] Haghighat H., Allahveysi S. B., Akhavan A., *“Estimation Of Drawing Force In Drawing Of Twisted Square Section Rod From Round Bar”*, International Journal of Engineering & Applied Sciences, vol.3, Is. 1, p. 1-14, 2010.
- [Hassan et al., 2015] Hassan A. K., Hashim A. S., , *“Three Dimensional Finite Element Analysis of wire drawing process”*, Universal Journal of Mechanical Engineering, vol. 3, Nº 3, p. 71-82, 2015.
- [He et al., 2002] He S., Van Houtte P., Van Bael A., Mei F., Sarban A., Boesman P., Galvez F., Atienza J. M., *“Strain rate effect in high-speed wire drawing process”*, Modelling and Simulation in Materials Science Engineering, vol. 10 p. 267-276, 2002.
- [Hencky, 1923] Hencky H., *“Über einiger statisch bestimmte falle des gleichgewichts in plastischen korpern”*, Zeits. Angew. Math. Mech., 1923.

## **Referencias**

---

- [Hollomon, 1945]** Hollomon J. H., *“Metal Forming Mechanics and Metallurgy”*, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, vol. 162, p. 168-268, 1945.
- [Horna, 2014]** Horna M. A., *“Diseño de un banco de estirado para producir tubos de cobre de 1” de diámetro nominal”*, Pontificia Universidad Católica de Perú, p. 8-13, 2014.
- [Hosford et al., 2007]** Hosford W. F., Caddell R. M., *“Metal Forming Mechanics and Metallurgy”*, McGraw-Hill, p. 102-103, 2007.
- [Ikumapayi et al., 2015]** Ikumapayi O. M., Ojolo S. J., Afolalu S. A., *“Experimental and theoretical investigation of tensile stress distribution during aluminium wire drawing”*, European Scientific Journal, vol. 11, nº 18, p. 86-102.
- [Jindal et al., 2015]** Jinda H. I, Jindal A., *“Dies Management in Wire Drawing Industry”*, Wire & Cable India, p. 1-15, 2015.
- [Jo et al., 2002]** Jo, H.H., Lee, S.K., Kim, M.A., Kim, B.M., *“Pass schedule design system in the dry wire-drawing process of high carbon steel”*, Journal of Engineering Manufacture, vol. 216, part B, p. 365-373., 2002.
- [Johnson et al., 1978]** Johnson W., Mamalis A. G., *“Some force plane diagrams for plane strain slip-line fields”*, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 20, Is. 1, p. 47–56, 1978.
- [Jokovic et al., 2013]** Jokovic Z., Djapic N., *“Method developement for the calculation of the metal drawing passes schedule to which the Hollomon curve applies”*, University Politechnica of Bucharest Science Bulletin, series B, vol. 75, Is. 3, p. 165-174, 2013.
- [Kabayana et al., 2009]** Kabayana L. K., Taguchi S., Santana G. A., *“The Influence of Die Geometry on Stress Distribution by Experimental and FEM Simulation on Electrolytic Copper Wiredrawing”*, Materials Research, Vol. 12, No. 3, p. 281-285, 2009.
- [Kalpakjian, 2008]** Kalpakjian S., *“Manufacturing Processes for Engineering Materials”*, Pearson Education, 5th ed., p. 434-441, 2008.
- [Kampûs, 1999]** Kampûs Z., *“Analysis of factors influencing accuracy in the drawing of round rods”*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 87, p. 90–96, 1999.

- [kang D. A. I.,2014] kang D. A. I., *"Drawing art of ultrafine copper wires with bidirectional drawing dies"*, International Wire & Cable Symposium, Proceedings of the 63rd IWCS Conference, p. 697–705, 2014.
- [Kesavulu et al., 2014] Kesavulu P., Ravindra Reddy P., Sreedhar N., *"Finite Element Analysis of Concave and Convex Die contours in wiredrawing process"*, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 4, Is. 9, p. 477-480, 2014.
- [Kim et al., 1997] Kim H. C., Choi Y., Kim B. M., *"Prediction of die wear in the wire-drawing process"*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 65, p. 11–17, 1997.
- [Kim et al., 1999] Kim H. C., Choi Y., Kim B. M., *"Three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of non-steady-state shape drawing process"*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 39, Is. 7, p. 1135–1155, 1999.
- [Kristensen et al., 2004] Kristensen R., Larsson B., *"Optimization of the hardness gradient in the cold drawing process"*, Orebro University-Maskiningenjörprogrammet, p. 120, 2004.
- [Kocov et al., 2003] Kocov A., Lazarev I., *"FE Analysis of the stress-strain condition for the process of wiredrawing"*, Journal for Technology of Plasticity, vol. 28, nº 1-2, p. 32-39, 2003.
- [Korchunov et al., 2014] Korchunov A., Gennadiy G., Poliakova M., *"Recovery effect in drawing of steel bar for sizing"*, Procedia Engineering vol.81, p.676 – 681, 2014.
- [Kovács, 2013] Kovács S., Mertinger V., *"Examination of Complex Optimization Objective Functions of Parameters of Multi-Step Wire Drawing Technology"*, Acta Polytechnica Hungarica, vol. 10, nº 4, p. 27-44, 2013.
- [Kobayashi, 1989] Kobayashi S., Oh S. I., Altan T., *"Metal forming and the finite element method"*, Oxford University Press, p. 26-34, 1989.
- [Kuboki et al., 2005] Kuboki T., Abe M., Neishi Y., Akiyama M., *"Design method of die geometry and pass schedule by void index in multi-pass drawing"*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 127 (1), p. 173-181, 2005.

## Referencias

---

- [Kut et al., 2013] Kut S., Nowotynska I., *“Numerical analysis of the effect of backpull on tool wear in the process of wire drawing”*, Tribologia, vol. 81, p. 1-10, 2013.
- [Kvackaj et al., 2015] Kvackaj T., Kováková A., Bidulska J., Bidulsky R., Kocisko R., *“New Approach In The Properties Evaluation Of Ultrafine-Grained OFHC Copper”*, Archives of Metallurgy and Materials, vol. 60, Is. 2, p.605-614, 2015.
- [Lazarotto et al., 1997] Lazarotto, L., Dubar, L., Dubois, A., Ravassard, P., Oudin, J., *“Identification of Coulomb's friction coefficient in real contact conditions applied to a wire drawing process”*, Wear, 211, p. 54-63, 1997.
- [Lazarotto et al., 1998] Lazarotto, L., Dubar, L., Dubois, A., Ravassard, P., Oudin, J., *“A selection methodology for lubricating oils in cold metal forming processes”*, Wear, 215, p. 1-9, 1998.
- [Lazarotto et al., 1998] Lazarotto, L., Dubar, L., Dubois, A., Ravassard, P., Bricout, J. P., Oudin, J., *“A selection methodology for lubricating oils in cold metal forming processes”*, Wear, 215, p. 1-9, 1998.
- [Lewis et al., 1949] Lewis D., Godfrey H. J., *“Backpull Wire Drawing”*, Wire & Wire products, vol. 24, p. 873-983, 1949.
- [Lee et al., 2014] Lee J. W., Baek H. M., Hwang S. K., Son I., Bae C. M., Im Y., *“The effect of the multi-pass non-circular drawing sequence on mechanical properties and microstructure evolution of low-carbon steel”*, Materials and Design, vol. 55, nº1, p. 898–904, 2014.
- [Lide, 2004] Lide D.R. *“CRC Handbook of Chemistry and Physics”*, CRC Press, 85th Edition, p. 15-50, 2004.
- [Lin et al., 2011] Lin Z., Sun F., Shen B., *“Wear behavior of diamond-coated drawing dies”*, Transactions of Tianjin University, vol. 17, Is.4, p. 259-263, 2011.
- [Lima-Filho, 2003] Lima-Filho, A. d.P., *“A wire drawing machine designed for research and experimental Teaching of mechanical and metallurgical engineering courses”*, Proceedings of COBEM 2003, 17<sup>th</sup> Int. Congress of Mechanical Engineering (Sao Paulo, Brasil), 2003.

- [Lee et al., 2012] Lee K-H., Lee S-K., Kim B-M., “Advanced simulation of die wear caused by wire vibrations during wire-drawing process”, Transactions of non-ferrous metals Society of China, vol. 22, p. 172-173, 2012.
- [Levy, 1872] Lee K-H., Lee S-K., Kim B-M., “Mémoire sur les équations générales des mouvements intérieurs des corps ductiles au delà des limites en élasticité pourrait les ramener à leur premier état”, Comptes Rendus de l'Académie des sciences, vol. 70, p. 1323-1325, 1872.
- [León et al., 2004] León J.; Luri R.; Luis C. J., “Análisis comparativo entre análisis local de tensiones y el MEF en los procesos de trefilado de alambre”, Anales de ingeniería mecánica, vol. 15, ls. 4, p. 2807-2817, 2004.
- [Lorenzo et al., 2012] Lorenzo M., Kharin V., Toribio J., “Influencia de la longitud de transición de la hilera de trefilado sobre la fragilización por hidrógeno de aceros de pre-tensado”, Anales de Mecánica de la Fractura 26, vol. 1, p. 1-9, 2012.
- [Lode, 1926] Lode W., “Versuche über den einfluß mittleren Hauptspannung auf das Fließ der Metalle Eisen Kupfer und Nickel”, Zeitschrift für Physikalische Chemie, vol. 36, p. 913-939, 1926.
- [Lorenzo, 2009] Lorenzo Fernández M.A., “Influencia de las tensiones y deformaciones en la fragilización por hidrógeno de acero eutectoide trefilado”, Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca, p. 102–117, 2009.
- [Luis et al., 2005] Luis C. J., León J., Luri R., “Comparison between finite element method and analytical methods for studying wire drawing processes”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 164–165, p. 1218–1225, 2005.
- [Luksza et al., 1998] Luksza J., Majta J., Burdek M., Ruminski M., “Modelling and measurements of mechanical behaviour in multi-pass drawing process”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 80–81, p. 398–405, 1998.
- [Luksza et al., 2002] Luksza J., Burdek M., “The influence of the deformation mode on the final mechanical properties of products in multi-pass drawing and flat rolling”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 125-126, p. 725-730, 2002.

## Referencias

---

- [Majta et al., 1992] Majzoobi G. H., Fereshteh Sainee F., Aghili A., *“An investigation into the effect of redundant shear deformation in bar drawing”*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 201, p. 133-137, 2008.
- [Majzoobi et al., 2008] Majta J., Luksza J., Sadok L., *“The estimation of mechanical properties distribution in plastic working products: example for the drawing process”*, *Journal of Mat. Processing Technology*, vol. 34, p. 389-396, 1992.
- [Mang et al., 2007] Mang T., Dresel W., *“Lubricants and Lubrication”*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, p. 573-599, 2007.
- [Martín, 2009] Martín F., *“Desarrollo, integración y optimización procesos de forja”*, Tesis Doctoral, Universidad de Málaga, p. 13-54, 2009.
- [Martín et al., 2013] Martín F., Sevilla L., Camacho A., Sebastián M. A., *“Upper bound solutions of Ring Compression Test”*, *Procedia Engineering*, vol. 00, p. 1-8, 2013.
- [Martín, 2011] Martín Marín M. M., *“Estudio de factores tecnológicos en procesos de compresión por deformación plástica de materiales metálicos dúctiles por el método de los elementos finitos”*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UNED), p. 47-60, 2011.
- [Mayo, 2010] Mayo J., *“Microsoft Visual Studio 2010: A beginner's Guide”*, Ed. McGraw Hill, vol. 1, p. 1-417, 2010.
- [Milenin et al, 2008] Milenin A., Muskalski Z., Kustra P., *“The multi-scale FEM simulation of wire fracture during drawing of pearlitic steel”*, *Materials Science Forum* vols. 575-578, p. 1433-1438, 2008.
- [Mohanraj et al., 2006] Mohanraj J., Bonner M.J., Barton D.C., Ward I.M., *“The multi-scale FEM simulation of wire fracture during drawing of pearlitic steel”*, *Proc. IMechE Part E: J. Process Mechanical Engineering*, vol. 221, p.47-60, 2006.
- [Molera, 1991] Molera P., *“Tratamientos termicos de los metales”*, Ed. Marcombo, 1991.
- [Morales, 2007] Morales L., *“Optimación de un proceso de trefilado de acero mediante el metodo de elementos finitos”*, Universidad Nacional Autónoma de México, p. 32-56, 2007.

- [Morales et al., 2008] Morales L., Ortiz A., Jacobo V. H., *“Optimación de un proceso de trefilado de acero mediante el metodo de elementos finitos”*, 14º Congreso Internacional Anual de La Somim, p. 919-927, 2008.
- [Muskalski et al., 2011] Muskalski Z., Wiewiórowska S., *“The theoretical analysis of wire drawing process for hydrodynamic friction conditions”*, Metallurgical and Mining Industry, vol. 3, nº 7, p. 74-78, 2011.
- [Muskalski, 2014] Muskalski Z., *“Selected problems from the high-carbon steel wire drawing theory and technology”*, Archives of Metallurgy and Materials, vol. 59, Is. 2, p. 527-534, 2014.
- [Nadai, 1939] Nadai A. L., *“Selected problems from the high-carbon steel wire drawing theory and technology”*, Journal of Applied Mechanics ASME, vol. 61, p. A54-A62, 1939.
- [Narayanan et al., 2010] Narayanan K. R., Sridhar I., Subbiah S., *“Effect of cold work on the mechanical response of drawn ultra-fine gold wire”*, Computational Materials Science, vol. 49, p. S119–S125, 2010.
- [Nilson et al., 2011] Nilson M., Olsson M., *“Selected problems from the high-carbon steel wire drawing theory and technology”*, Journal of Applied Mechanics ASME, vol. 61, p. A54-A62, 2014.
- [Norasethasopon, 2011] Norasethasopon S., *“Chevron Crack Initiation in Multi-Pass Drawing of Inclusion Copper Shaped-Wire”*, Journal of Metals, Materials and Minerals, vol. 21, nº 1 p. 1-8, 2011.
- [Nurudeen et al., 2011] Nurudeen A. Raji, Oluleke O., *“Influence of Degree of Cold-Drawing on the Mechanical Properties of Low Carbon Steel”*, Materials Sciences and Applications, vol. 2, nº 1, p. 1556-1563, 2011.
- [Obi et al., 1996] Obi A. I., Oyinlola A.K., *“Frictional characteristics of fatty-based oils in wire drawing”*, Wear, vol. 194, p. 30-37, 1996.
- [Olokode et al., 2008] Olokode O.S., Bolaji B.O., Aiyedun O., *“Effects of Process Annealing on Mechanical Properties of Strain-Hardened Coppe: a Case of Kabel Metal Nigeria Limited”*, Wear, vol. 9, Nº 2, p. 278-283, 2008.

## **Referencias**

---

- [Osakada., 2008] Osakada K., *“History of Plasticity and Metal Forming Analysis”*, International Conference on Technology of Plasticity, plenary 4, p. 22-43, 2008.
- [Osakada., 2010] Osakada K., *“History of Plasticity and Metal Forming Analysis”*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, p. 1436–1454, 2010.
- [Orowan, 1943] Orowan E., *“The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling”*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 150, nº. 1, p. 140-167, 1943.
- [Peña, 2008] Peña J., *“Análisis del proceso de trefilado de tubos”*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Tesis de Grado, p. 5, 2008.
- [Porrello, 2014] Porrello A., *“Determinación del coeficiente de fricción en un proceso de trefilado partiendo de la carga requerida para pasar un alambre a través del tramo recto del dado”*, Revista Ingeniería UC, vol. 21, nº. 3, p. 55-64, 2014.
- [Prakash et al., 2012] Prakash G., Amitesh P., Selokar S. R., *“Effect of High Speed Drawing on Properties of High Carbon Steel Wires”*, International Journal of Modern Engineering Research, vol.2, Is. 2, p. 209-214, 2012.
- [Radojevic et al., 2000] Radojevic M., Radojicic M., Nakic M., Babic M., *“Lubricant as parameter of processing tribomechanical system in the process of wire drawing”*, Tribologiti n industry, vol. 22, nº. 1-2, p. 23-27, 2000.
- [Raji et al., 2013] Raji N. A., Oluwole O. O., *“Mechanical Properties of Cold-Drawn Low Carbon Steel for Nail Manufacture: Experimental Observation”*, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology vol. 5, Is. 1, p. 118-122, 2013.
- [Rodríguez et al., 2008] Rodríguez C. M., Rodríguez P. A., Piñeyro C., Morel C. A., *“Visual Basic 6.0”*, DCLC, 2ª ed., p. 13, 2008.
- [Rojas et al., 2008] Rojas E. L., Celentano D. J., Artigas A. A., Monsalve A.G., *“Simulación experimental y numérica de un proceso de trefilado húmedo de un alambre de acero al carbono”*, Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 16, nº 1, p. 188-194, 2008.

## Referencias

---

- [Rowe, 1972] Rowe G. W., *“Conformado de los metales”*, Ediciones Urmo, p.143-157, 1972.
- [Rubio et al., 2003] Rubio E. M., Sebastián M. A., Sanz Lobera A., *“Mechanical solutions for drawing processes under plane strain conditions”*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 143–144, p. 539–545, 2003.
- [Rubio et al., 2005] Rubio E. M., Camacho A.M., Sevilla L., Sebastián M.A., *“Calculation of the forward tension in drawing processes”*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 162–163, p. 551–557, 2005.
- [Rubio, 2006] Rubio E. M., *“Mechanical solutions for drawing processes under plane strain conditions”*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 14, Iss. 1-2, p. 119–130, 2006.
- [Sachs et al., 1934] Sachs G., Eisbein W., Kuntze W., Linicus W., *“Spanlose Formung der Metalle”*, Springer Berlin Heidelberg, vol. 16, p. 38-56, 1934.
- [Sachs, 1954] Sachs G., *“Fundamentals of the working of metals”*, Science, vol. 120, nº 3120, p. 601, 1954.
- [Sadok et al., 1992] Sadok L., Packo M., Skolyszewski A. Ruminski M., *“Influence of the shape of the die on the field of strains in the drawing process”*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 34, p. 381-388, 1992.
- [Saint-Venant, 1871] de Saint-Venant A. J. C. B., *“Mémoire sur l'établissement des équations différentielles des mouvements intérieurs opérés dans les corps solides ductiles au-delà des limites où l'élasticité pourrait les ramener à leur premier état”*, Journal de Mathématiques Pures et Appliquée, tomo 16, p. 308-316., 1871.
- [Salcedo et al., 2010] Salcedo D., Luis C. J., León J., Luri R., Puertas I., Pérez I., *“Analysis of residual stresses in wire drawing processes”*, Trends in the Development of Machinery and Associated Technology (TMT), Mediterranean Cruise, 11-18, p. 69-72, 2010.
- [Sang-Kong et al., 2010] Sang-Kong L., Sang-Bong L., Byung-Min K., *“Process design of multistage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0,72 wt% C steel wire”*, Journal of Materials Processing Technology, 210, p. 776–783, 2010.

## Referencias

---

- [Sawamiphakdi et al., 1998] Sawamiphakdi, K.; Lahoti, G. D.; Gunasekera, J. S.; Kartik, R., *“Development of utility programs for a cold drawing process”*, Journal of Materials Processing Technology, 80-81, p. 392-397, 1998.
- [Sebastián et al., 1979] Sebastián M.A., Torres F., *Análisis de la carga de estirado con inclusión de rozamiento*, Deformación Metálica, 44, p. 48-55, 1979.
- [Sebastián, 1980] Sebastián M.A., *“Análisis de los procesos de conformación por deformación plástica mediante el método de los elementos finitos”*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 78-126, 1980.
- [Sebastián et al., 1983] Sebastián M.A., Pérez J. M., Sánchez A. M., *“Métodos analíticos en deformación metálica”*, Deformación metálica, 90, p. 29-37, 1983.
- [Sebastián et al., 1999] Sebastián M.A., González C., Gómez E., Luis C.J. *“Consideraciones al estudio mecánico de los procesos de conformado por deformación plástica”*, Deformación metálica, 244, p. 36-43, 1999.
- [Sebastián, 2010] Sebastián M.A., *“Fundamentos y análisis de procesos de conformado por deformación plástica”*, Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación, UNED, p. 40-70, 2010.
- [Shivpuri, 2009] Shivpuri R., *“Modeling of deformation processes slab and upper bound methods”*, ASM Handbook, Volume 22A: Fundamentals of Modeling for Metals Processing D.U. Furrer and S.L. Semiatin, editors, p. 23-33, 2009.
- [Siebel E., 1923] Siebel, E. *“Untersuchungen über bildsame Formänderung unter besonderer Berücksichtigung des Schmiedens”*, Maschinenbau/Betrieb, vol.9, p. 307-312, 1923.
- [Siebel E., 1947] Siebel, E. *“Der derzeitiger stand der erkenntnisse uber die, mechanischen beim drahtziehen”*, Stahl und Eisen, p. 171-180, 1923.

- [Singh et al., 2012] Singh M., Kalra C. S., Mehra R., *“Mechanical properties analysis of copper wire drawn by step reduction”*, Proc. of International Conference on Recent Trends in Mechanical, Instrumentation and Thermal Engineering, Academy of Mechanical and Aerospace Engineers, p. 39-42, 2012.
- [Schey, 2002] Shey J.A., *“Procesos de Manufactura”*, McGraw-Hill, p. 260-373, 2002.
- [Skotyszewski et al., 1998] Skotyszewski A., Paćko M., *“Back tension value in the fine wire drawing process”*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 80–81 p. 380–387, 1998.
- [Skripalenko et al., 2013] Skripalenko M. M. ,Ashikhmin D. A. ,Skripalenko M. N., Sidorov A. A., Xu Y., *“Use of the software Deform2D to model the process of rolling with vibration of the top work roll”*, Metallurgist, vol. 56, Is. 11-12, p. 844-847, 2013.
- [Stepina et al., 1992] Stepina V., Veselý V., *“Lubricants and special fluids”*, Elsevier, Tribology Series vol. 23, p. 620, 1992.
- [Suliga et al., 2015] Suliga M., Kruzel R., Garstka T., Gazdowicz J., *“The influence of drawing speed on structure changes in high carbon steel wires”*, Metalurgija, vol. 54, Nº 1, p.161-164, 2015.
- [Sun et al., 2013] Sun M-C., Tzow G-Y., Zheng L-A., *“Processing animation simulation and FEM analysis of multi-stage cold forging of stainless automotive battery fastener”*, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, vol. 20, p.219-224, 2013.
- [Takada, 2011] Takada M., Matsubara H., Kawagishi Y., *“Wear of Cemented Carbide Dies for Steel Cord Wire Drawing”*, Materials Transactions, vol. 54, Nº 10, p. 2011-2017, 2011.
- [Teja et al., 2016] Teja C.S.N., Murty G., Reddy P.S., *“Finite Element Analysis of Wire Drawing Process with different die contours”*, International Journal of Science Engineering and Advance Technology, vol. 4, Is. 2, p. 134-143, 2016.
- [Thimont et al., 2011] Thimont J., Felder E., Bobadilla C., Buessler P., Persem N., *“Study of the wet multi-pass drawing process applied on high strength thin steel wires thin steel wires”*, AIP Conference Proceedings, vol. 1353 (1), p. 467-472, 2011.

## Referencias

---

- [Thomsen et al., 1974] Thomsen E. G., Thomsen H. H., *“Early Wire Drawing Through Dies”*, Transactions of ASME (The American Society of Mechanical Engineers), p. 1216-1221, 1974.
- [Thompson, 1933] Thompson F.C., *“The effect of a backward pull upon the tension required to draw wire”*, Journal of the Iron and Steel Institute, vol. 128, p. 369-382, 1933.
- [Timoshenko, 1953] Timoshenko A., *“History of strength of materials”*, Dover Publication, p. 1-47, 1953.
- [Tittel et al., 2012] Tittel V., Zelenay M., Kudelas L., *“Effect Of Drawing Angle Size Of A Die On Wire Drawing And Bunching Process”*, 21st International Conference on Metallurgy and Materials, (Brno, Czech Republic), 23, 2012.
- [Torres et al., 2004] Torres M., Di Graci V., Gonzalez G., Zurita O., *“Estimación del esfuerzo de fluencia para materiales laminados en frío”*, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, vol. 24, nº 2, p. 31-36, 2004.
- [Tresca., 1864] Tresca H. E., *“Sur l'écoulement des corps solides soumis a de fortes presión”*, Comptes Rendus de l'Académie des sciences, vol. 59, p. 754, 1864.
- [Trigo Aranda, 2004] Trigo Aranda V., *“Historia y evolución de los lenguajes de programación”*, Autores científico-técnicos y académicos (ACTA), p. 88, 2004.
- [Tschaetsch, 2005] Tschaetsch H., *“Metal Forming Practise”*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 95-102, 2005.
- [Vannes et al., 1981] Vannes A., Thierry P., *“Effects of die characteristics on the strength and residual stresses during wire drawing”*, Journal of Mechanical Working Technology, vol. 5, p. 251-266, 1981.
- [Vega et al., 2009] Vega G., Haddi A., Imad A., *“Temperature effects in wiredrawing: experimental investigation”*, International Journal of Material Forming, vol. 2, p. 229-232, 2009.
- [Vega et al., 2009] Vega G., Haddi A., Imad A., *“Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing”*, Materials and Design, vol. 30, p. 3308–3312, 2009.

## Referencias

---

- [von Karman, 1956] von Karman Th., *“Collected Works of Theodore von Karman”*, Butterworth Scientific Publications, vol. 1, p. 1902-1913, 1956
- [von Mises, 1913] von Mises R., *“Mechanik der festen Körper in plastisch deformablen Zustand”*, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Klasse 4, p. 582-592, 1913.
- [Walkovicz, 2012] Walkovicz M., *“Wpływ parametrów odlewania na kształtowanie cech materiałowych miedzi beztlenuj dla wysokozaawansowanych aplikacji w elektronice i elektrotechnice”*, AGH Universidad de Ciencias y Tecnología de Cracovia, p. 135-136, 2012.
- [Wen J.L., 2003] Wen J.L., *“Theory of metal extrusion and drawing processes”*, Shenyang Northeastern University, p.178, 2003.
- [Wang et al., 2012] Wang R., Li C., Lu X., Yang J., *“Wire drawing process simulation of Polycrystalline diamond wire drawing die”*, Computer Science and Automation Engineering, IEEE International Conference, vol. 3, p. 212-216, 2012.
- [Wistreich, 1955] Wistreich J. G., *“Investigation of the mechanics of wire drawing”*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 169, p. 654–665, 1955.
- [Widdrington, 1987] Widdrington N. P., *“Strain ageing in ultra-high strength perlitic steels”*, Disertación fin de Máster, Universidad de Witwatersrand-Johanesburgo, p. 23-33, 1987.
- [Wiewiórowska et al., 2008] Wiewiórowska S., Muskalski Z., Suliga M., Pełka M., *“The numerical analysis of Hi-temp 095 wire drawing process”*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering vol. 27, Is. 2, p. 175-178, 2008.
- [Wright, 1979] Wright R. N., *“Mechanical analysis and die design”*, Wire Journal International, 1979.
- [Wright, 2011] Wright R. N., *“Wire technology: process engineering and metallurgy”*, Elsevier Inc., p. 90-98, 2011.

## ***Referencias***

---

- [Xu et al., 2009] Xu G., Fang F., Li Z., *“Optimization of the technology of wire drawing based on the finite element method”*, Modern Applied Science, vol. 3, nº 5, p. 193-198, 2009.
- [Yang et al., 2010] Yang T-S., Chang S-Y., *“Investigation of the drawing process of a square rod from a round bar using 3-d finite element analysis”*, Advanced materials Research, vol. 136, p. 184-188, 2010.
- [Yang et al., 2012] Yang T-S., Chang S-Y., *“Investigation into the extrusion of porous metal using finite element method”*, Transactions of Famena XXXVI-3, p. 13-22, 2012.
- [Zhang et al., 2013] Zhang G-L.; Wang Z-W.; Zhang S-H.;Cheng M.; Song H-W, *“A fast optimization approach for multi-pass wire drawing processes based on the analytical model”*, Proc IMechE Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 227, Is. 7, p. 1023–1031, 2013.
- [Zienkiewicz et al., 1974] Zienkiewicz O. C., Godbole P. N., *“Flow of plastic and viscoplastic solids with special reference to extrusion and forming processes”*, international Journal of Numerical Methods in Engineering, vol. 8, p. 3-16, 1974.

## Referencias

---

- [ASTM B846-11a] *“Standard Terminology for Copper and Copper Alloys”*, American Society for Testing and Materials (ASTM), 2011.
- [AWS A5.18/A5.18M:2005] *“Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding”*, American Welding Society (AWS) - American National Standards Institute (ANSI), 2005.
- [DIN 8580:2003] *“Manufacturing processes - Terms and definitions, division”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.
- [DIN 8583-1:2003] *“Manufacturing processes forming under compressive conditions - Part 1: General; Classification, subdivision, terms and definitions”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.
- [DIN 8583-2:2003] *“Manufacturing processes forming under compressive conditions - Part 2: Rolling; Classification, subdivision, terms and definitions”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.
- [DIN 8583-3:2003] *“Manufacturing processes forming under compressive conditions - Part 3: Free forming; Classification, subdivision, terms and definitions”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.
- [DIN 8583-4:2003] *“Manufacturing processes forming under compressive conditions - Part 4: Die forming; Classification, subdivision, terms and definitions”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.
- [DIN 8583-5:2003] *“Manufacturing processes forming under compressive conditions - Part 6: Extrusion; Classification, subdivision, terms and definitions”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.
- [DIN 8584-1:2003] *“Manufacturing processes forming under combination of tensile and compressive conditions - Part 1: General; Classification, subdivision, terms and definitions”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.

## Referencias

---

- [DIN 8584-2:2003]** *“Manufacturing processes forming under combination of tensile and compressive conditions - Part 2: Drawing through constricted tool orifices; Classification, subdivision, terms and definitions”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.
- [DIN 8584-3:2003]** *“Manufacturing processes forming under combination of tensile and compressive conditions - Part 3: Deep drawing; Classification, subdivision, terms and definitions”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.
- [DIN 8585-1:2003]** *“Manufacturing processes forming under tensile conditions - Part 1: General; Classification, subdivision, terms and definitions”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.
- [DIN 8585-2:2003]** *“Manufacturing processes under tensile conditions - Part 2: Stretch reducing; Classification, subdivision, terms and definitions”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.
- [DIN 8586:2003]** *“Manufacturing processes forming by bending - Classification, subdivision, terms and definitions”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.
- [DIN 8587:2003]** *“Manufacturing processes forming under sheering conditions - Classification, subdivision, terms and definitions”*, Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización (DIN), 2003.
- [UNE EN 754-1:2016]** *“Aluminio y aleaciones de aluminio. Varillas, barras y tubos estirados en frío. Parte 1: Condiciones técnicas de inspección y suministro.”*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, 2016.
- [UNE EN 754-2:2016]** *“Aluminio y aleaciones de aluminio. Varillas, barras y tubos estirados en frío. Parte 2: Características mecánicas.”*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, 2016.

## Referencias

---

- [UNE EN 755-1:2016] *“Aluminio y aleaciones de aluminio. Varillas, barras y tubos extruidos. Parte 1: Condiciones técnicas de inspección y suministro.”*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, 2016.
- [UNE EN 755-2:2016] *“Aluminio y aleaciones de aluminio. Varillas, barras y tubos extruidos. Parte 2: Características mecánicas.”*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, 2016.
- [UNE EN 1412:1996] *“Cobre y aleaciones de cobre. Sistema europeo de designación numérica.”*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, 1996.
- [UNE EN 1977:2013] *“Cobre y aleaciones de cobre. Alambros de cobre.”*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, 2013.
- [UNE EN ISO 6892:2009] *“Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.”*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), International Standard Organization (ISO), AENOR, 2009.
- [UNE EN 10020:2001] *“Definición y clasificación de los tipos de acero.”*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, 2001.
- [UNE EN 12164:2012] *“Cobre y aleaciones de cobre. Barras para mecanizado.”*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, 2012.
- [UNE EN 12166:2012] *“Cobre y aleaciones de cobre. Alambros para usos generales.”*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, 2012.
- [UNE EN 12168:2012] *“Cobre y aleaciones de cobre. Barras huecas para mecanizado.”*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, 2012.
- [UNE EN 13602:2014] *“Cobre y aleaciones de cobre. Alambros de cobre redondo y estirado para la fabricación de conductores eléctricos.”*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, 2014.

## ***Referencias***

---

- [UNE EN 16120-2:2011]** *"Alambrón de acero no aleado para la fabricación de alambre. Parte2: Requisitos especificados del alambrón de uso general."*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, ", 2011.
- [UNE 36031:1985]** *"Alambrón de acero aleado y no aleado destinado a la producción de electrodos"*, Una Norma Española (UNE), European Norm (EN), AENOR, ", 1985.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**ANEXO I**

**Fundamentos sobre plasticidad aplicados al proceso de estirado**

---





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## **Al.1 Introducción al comportamiento plástico de los metales**

El fenómeno de la plasticidad de los materiales ha sido estudiado desde los puntos de vista de la mecánica, la física y la metalurgia, por investigadores y matemáticos de todo el mundo. Como resultado de estas investigaciones se ha alcanzado un preciso conocimiento sobre la mecánica en el comportamiento plástico de los materiales.

Los primeros experimentos y estudios con los que se definió el comportamiento plástico de un metal [Osakada, 2008] se llevaron a cabo en Francia por Tresca (1814-1885) y Coulomb (1736-1808). Esta línea fue seguida, posteriormente, por otros, surgiendo a comienzos del siglo XX una corriente investigadora en Alemania, liderada por Prandtl (1870-1953), que se desarrolló fuera de este país al llegar Hitler al poder, dado que sus integrantes emigraron principalmente a los Estados Unidos y a Inglaterra.

Los resultados obtenidos en esta extensa y longeva línea investigadora se han aplicado en los ámbitos de la geofísica y la ciencia de los materiales, siendo una herramienta indispensable para el estudio y análisis de los procesos de conformado por deformación plástica de los metales. Actualmente se utilizan sistemas y aplicaciones informáticas para el análisis y control de los procesos de conformado, herramientas que se apoyan en los métodos analíticos desarrollados a partir de los conocimientos y la experiencia investigadora alcanzada durante todo este periodo de tiempo.

## **Al.2 Fundamentos sobre el conformado por deformación plástica**

En el ámbito de los procesos de conformado por deformación plástica, la *tensión* es la intensidad de fuerza aplicada por unidad de superficie y la *deformación* es la medida de la cantidad de deformación.

La *tensión* se define como la intensidad de una fuerza en un punto, de manera que en un elemento diferencial tridimensional podemos tener hasta un total de nueve posibles componentes tensionales de las cuales tres son *normales* (tracción o compresión) y seis serán *cortantes*. Las tensiones normales se notarán como  $\sigma$  ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ), mientras que las tensiones cortantes se denotarán como  $\tau$  ( $\tau_{xy}$ ).

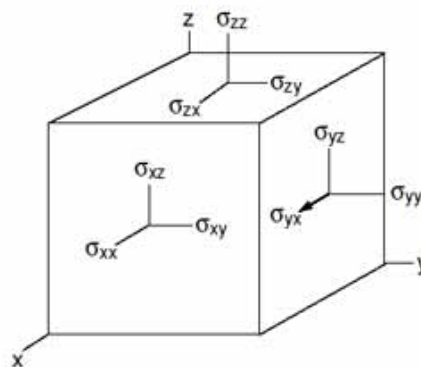


Figura Al. 1 Tensor de esfuerzos en un elemento diferencial [Rowe, 1972].

El término *deformación* se refiere a la magnitud del cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a cargas externas aplicadas sobre el mismo. La deformación se caracteriza mediante el valor de la *deformación nominal*:

$$e = (l - l_0)/l_0 = \Delta l/l_0 \quad (\text{Al.1})$$

La deformación real de un cuerpo se obtiene a partir de la expresión logarítmica de la deformación nominal y caracteriza con mayor exactitud las grandes deformaciones:

$$d\varepsilon = dl/l \rightarrow \varepsilon = \ln(l/l_0) = \ln(1 + e) \quad (\text{Al.2})$$

Aunque cuando se trata de deformaciones pequeñas, se puede considerar que  $\varepsilon = e$ , siempre será más conveniente emplear *deformación real* en lugar de *deformación nominal* a la hora de analizar cualquier proceso de conformado.

La geometría de una pieza va a ser generalmente tridimensional, pero en ocasiones puede que una de sus dimensiones sea despreciable frente a las otras dos, en cuyo caso será bidimensional. El estado de tensiones va a definirse por las tres tensiones normales o tensiones principales  $\sigma_1 = \sigma_x$ ,  $\sigma_2 = \sigma_y$ ,  $\sigma_3 = \sigma_z$  donde generalmente se asume que  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . Éste estado puede ser de carácter uniaxial, biaxial o triaxial.

Un cuerpo sometido a una *deformación uniaxial* es aquel que, sometido a un estado de esfuerzos (p.e.: tracción uniaxial), sufre deformación únicamente en una dirección, mientras que la deformación en las otras dos direcciones está impedida o es despreciable frente a la deformación en la dirección del eje principal. Éste es el caso del proceso de estirado.

Un cuerpo sometido a deformación biaxial o *deformación plana* es aquel que, sometido a un estado de esfuerzos (p.e.: compresión), sufre deformación en dos direcciones, siendo impedida o despreciable la deformación en la tercera dimensión frente a las deformaciones sufridas en las direcciones principales. Éste es el caso del proceso de laminación.

### **Al.3 Plasticidad y criterios de fluencia**

Cuando la deformación es elástica, un cuerpo vuelve a su forma original al retirar la carga, de forma que dicha carga y la deformación elástica producida por la misma están relacionadas mediante las leyes de Hooke [Rowe, 1972].

No se conseguirá una deformación plástica hasta que dicha tensión aplicada alcance el límite de fluencia del material. Para los metales dúctiles, cuando la tensión aplicada aumenta de forma continua y, una vez superado el límite de fluencia, se pueden llegar a alcanzar grandes cantidades de deformación plástica.

En el modelo que se aplicará para el análisis de los procesos de conformado plástico descritos en el presente trabajo, los resultados obtenidos se obtendrán bajo la premisa de este límite de fluencia y, cumpliendo esta condición, se determinarán las relaciones matemáticas que describen la combinación o estado de tensiones necesario para producir dicha fluencia del material.

### **AI.3.1 Criterio de fluencia**

Un criterio de fluencia se puede definir como la expresión matemática mediante la cual se representa el estado de tensiones que produce la fluencia de un material y que en un material isotrópico, como puede ser cualquier metal dúctil, se expresará en función de las tres tensiones principales:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \text{constante}$$

En la tracción uniaxial o en la compresión pura la fluencia del material se producirá en el instante en el que la tensión o carga aplicada alcance el valor de la carga límite de fluencia del material  $Y$ .

El criterio de fluencia de un material va a representar la relación existente entre las tensiones principales que constituyen el estado tensional en un punto o instante determinado durante el periodo de fluencia plástica de este material en un proceso de conformado plástico.

Un criterio o ley de fluencia es aplicable no sólo a cuando se aplican la carga de deformación a un metal en estado recocado, sino también cuando esta carga se aplica a un material ya conformado previamente y que está en un estado plástico concreto.

En el desarrollo de este tipo de ley matemática se deben asumir una serie de idealizaciones [Chakrabarty, 2006]:

- Las condiciones de carga son tales que los efectos de la temperatura no son considerados.
- El efecto Bauschinger y el fenómeno de histéresis que se producen al eliminar una carga y volverla a aplicar son despreciados.
- Se asume que el material es isotrópico y sus propiedades en todos los puntos de su estructura son iguales en cualquier dirección.

### **AI.3.2 Criterio de Tresca**

Este criterio indica que la fluencia de un material se produce cuando la tensión cortante máxima alcanza un determinado valor [Tresca, 1864] y, por lo tanto, se puede expresar que:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \text{constante} \quad (\text{A1.3})$$

Para un estado de tensiones correspondiente a la torsión pura, donde:

$$\sigma_1 = k, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -k$$

Siendo  $k$  le tensión de fluencia del material por cizalladura, entonces:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{1}{2}(k + k) = k \rightarrow (\sigma_1 - \sigma_3) = 2k \quad (\text{A1.4})$$

Para un estado de tensión uniaxial pura se tendrá que  $\sigma_1 = Y$ ,  $\sigma_3 = 0$ , siendo  $Y$  la tensión de fluencia del material debida a tracción, con lo cual:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{Y}{2} \rightarrow (\sigma_1 - \sigma_3) = Y \quad (\text{A1.5})$$

La relación entre ambas constantes del material asumiendo el criterio de Tresca será:

$$Y = 2k \quad (\text{A1.6})$$

### **AI.3.3 Criterio de von Mises**

Este criterio sí que considera la influencia de la tensión principal intermedia, basándose en el valor de la energía máxima de deformación cortante. La fluencia de un material ocurre cuando la energía de deformación cortante o de distorsión alcanza un valor determinado [von Mises, 1913] y se expresa como:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \text{constante} \quad (\text{A1.7})$$

Para un estado de tensiones correspondiente a torsión pura, donde:

$$\sigma_1 = k, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -k$$

Siendo  $k$  le tensión de fluencia del material por cizalladura, se obtiene:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = k^2 + k^2 + (-2k)^2 = 6k^2 \quad (\text{A1.8})$$

Para un estado de tensión uniaxial pura se tendrá que  $\sigma_1 = Y, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0$ , con lo cual:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = Y^2 + Y^2 = 2Y^2 \quad (\text{A1.9})$$

La relación entre ambas constantes asumiendo el criterio de von Mises será:

$$2Y^2 = 6k^2 \rightarrow 2k = \frac{2}{\sqrt{3}}Y = 1'155Y \quad (\text{A1.10})$$

### **AI.3.4 Fluencia bidimensional: condiciones de deformación plana**

Observando la naturaleza de los procesos de conformado por deformación plástica, se puede considerar que en muchos de ellos únicamente se produce deformación en un plano, mientras que los desplazamientos del material en la tercera dirección pueden considerarse despreciables ( $d\varepsilon_2 = 0$ ).

En el caso concreto del estirado, su análisis se simplifica, despreciando la mínima de las tres deformaciones principales frente a las otras dos, aunque esto no significa que la tensión en dicha dirección sea cero.

Se asume además que el material es rígido-plástico e incompresible, con lo cual el volumen se mantiene constante ( $d\varepsilon_1 = -d\varepsilon_3$ ) y se puede deducir que la deformación producida es una deformación cortante pura originada por un esfuerzo cortante puro.

Bajo condiciones de deformación plana, se denomina  $Y'$  a la tensión de fluencia en deformación plana, con lo cual aplicando el criterio de *Tresca* se tiene la relación siguiente:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = Y = Y' = 2k \quad (\text{AI.11})$$

Aplicando el criterio de fluencia de von Mises se obtienen las siguientes relaciones:

$$Y' = 2k = \frac{2}{\sqrt{3}}Y, Y = \sqrt{3}k \quad (\text{AI.12})$$

Multitud de experimentos, realizados con diversos materiales y en estados de tensión combinados, indican que el criterio de fluencia de von Mises ofrece resultados que se ajustan mejor a la realidad que el criterio de fluencia de Tresca para la mayoría de los materiales metálicos.

### **AI.3.5 Rozamiento de Coulomb**

Cuando se produce la deformación en un proceso de conformado, existe un deslizamiento relativo entre las superficies de contacto de material y herramienta, de lo cual se deduce la existencia de un coeficiente de rozamiento constante cuyo origen es dicho deslizamiento, y conociéndose como rozamiento de Coulomb.

La tensión tangencial producida como consecuencia del rozamiento de deslizamiento en la zona de contacto de ambas superficies es directamente proporcional a la presión normal entre dichas superficies, por lo que el coeficiente de rozamiento por deslizamiento se puede definir como  $\mu = \tau/p$ .

Considerando el límite de fluencia del material por cizalladura  $k$ , y teniendo en cuenta que el valor de la tensión normal mínima necesaria para provocar la fluencia del

material es  $Y$ , de forma análoga a lo expuesto anteriormente se tiene que el valor del coeficiente de rozamiento, en condiciones de adherencia total, será:

$$\mu_{max} = k/Y \quad (\text{Al.13})$$

según von Mises:  $2k = 1'155Y \rightarrow \mu_{max} = k/Y = 0'577 \quad (\text{Al.14})$

según Tresca:  $Y = 2k \rightarrow \mu_{max} = k/Y = 0'5 \quad (\text{Al.15})$

Para un análisis de esfuerzos en un proceso de conformado por deformación plástica, la tensión de cizalladura  $\tau$  originada por la existencia de rozamiento de deslizamiento en la interfase entre material y herramienta y una tensión normal  $p$  será  $\tau = \mu \cdot p$ , siempre que se cumpla la condición de que  $\tau < k$ , ya que si  $\tau = k$  se produce el indeseado efecto de adherencia.

En conclusión, el método de análisis de tensiones locales aplicado a cualquier proceso de conformado por deformación plástica, como es el caso del proceso de estirado, se fundamenta, entre otros aspectos, en las condiciones de plasticidad y fluencia descritas en este anexo, tales como las características de tracción uniaxial simple, deformación plana o rozamiento de tipo Coulomb.

#### **Al.4 La teoría de la plasticidad: evolución histórica**

La llamada teoría de la plasticidad, desde sus orígenes, ha sido estudiada por investigadores y matemáticos desde diversas perspectivas. El análisis mecánico mediante las consideraciones físicas pertinentes y el conocimiento preciso de las particularidades de los metales han conducido a la evolución de una teoría cada vez más precisa y fiable en la cual se basan muchos de los métodos analíticos empleados en el estudio de los procesos de conformado por deformación plástica.

La estructura de los metales, generalmente, está constituida por una matriz cristalina relativamente ordenada. En un metal, las propiedades elásticas y plásticas se caracterizan en función de los desplazamientos o “dislocaciones” que se producen en su estructura interna cuando dicho metal es sometido a una carga o tensión externa. Cuando se deforma plásticamente un metal, por la acción de una tensión externa, se producen dislocaciones internas que constituyen una transformación estructural irreversible como consecuencia del comportamiento plástico de dicho metal.

Robert Hooke (1635-1704) fue el primero en plasmar la idea de la deformación elástica con un experimento en el que demostraba la elongación de un resorte sometido a una carga en uno de sus extremos. A partir de este punto surgieron diversas investigaciones que fueron completando los fundamentos de la teoría de la plasticidad, tal y como se conocen en la actualidad [Martín, 2011].

Un hito importantísimo se produjo en 1784, cuando Coulomb fue capaz de determinar el módulo elástico del acero realizando un simple ensayo de torsión a un hilo de este metal dúctil. Estudiando la relación existente entre el número de giros y el ángulo de torsión, fue capaz de determinar la tensión de fluencia de dicho material. Sus trabajos ya habían dado frutos, unos años antes, con lo que hoy se conoce como la Ley de rozamiento de Coulomb, por la cual este investigador fue premiado por la Academia Francesa de las Ciencias en 1781 [Timoshenko, 1953] [Osakada, 2008] [Osakada, 2010].



Figura Al. 2 Charles-Augustine de Coulomb (1733-1806).

Se puede afirmar que fue H.E. Tresca quien dio los primeros pasos en el desarrollo científico del estudio del comportamiento plástico de los metales [Tresca, 1864], con varios de sus experimentos sobre algunos procesos de conformado por deformación plástica de metales. Estos estudios le permitieron confirmar que un metal fluirá plásticamente a partir del instante en el cual el esfuerzo cortante alcanza un valor crítico determinado, estableciendo la base de la ley o criterio de fluencia de Tresca, en el cual se fundamentarían los posteriores experimentos. Dicho de otra forma, ciertos metales “fluyen” a partir del instante en el cual la carga a que son sometidos alcanza un determinado valor. La deformación alcanzada como resultado de esa fluencia tiene un carácter permanente, incluso después de haber retirado la carga que la provocó.



Figura Al. 3 Henri Édouard Tresca (1814-1885).

B. de Saint-Venant aplicó los resultados obtenidos por Tresca para determinar un sistema de ecuaciones mediante el cual poder relacionar esfuerzos y deformaciones en casos de deformación plana y, asumiendo el volumen del material constante durante el conformado plástico, concluyó que las direcciones de las deformaciones principales o máximas coinciden con las de los esfuerzos principales y que el esfuerzo cortante máximo en cada uno de los puntos de la región plástica del material va a ser el mismo

,pudiéndose definir como una constante [Saint-Venant, 1871]. Unos años después M. Levy, discípulo aventajado de Saint-Venant, consideró por vez primera la hipótesis de que el material conformado tiene un comportamiento plástico ideal y determinó las relaciones matemáticas entre esfuerzos y deformaciones para el caso tridimensional, demostrando que, a diferencia de la teoría desarrollada por su maestro, son las direcciones de los incrementos de las deformaciones principales las que coinciden en las mismas direcciones de las tensiones principales [Levy, 1872].

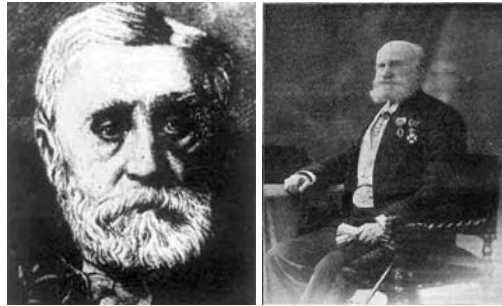


Figura Al. 4 Adhémar Jean Claude B. de Saint-Venant (1797-1886) y Maurice Lévy (1838-1886).

Tras un largo periodo de tiempo, durante el cual se realizaron diversos intentos de avanzar, fue R.E. von Mises quien, basándose en consideraciones esencialmente empíricas y matemáticas, desarrolló un nuevo criterio de fluencia [von Mises, 1913], que a la postre daría resultados muy satisfactorios en el análisis del comportamiento plástico de metales tales como los aceros dulces, las aleaciones de aluminio y las de cobre, aunque fueron otros investigadores como H. Hencky [Hencky, 1923], W. Lode [Lode, 1926] y A.L. Nadai [Nadai, 1939] quienes confirmaron experimentalmente las afirmaciones de R. von Mises.



Figura Al. 5 Richard von Mises (1883-1953).

La teoría de la plasticidad desarrollada hasta el momento no había sido aplicada explícitamente a procesos tecnológicos hasta después de 1923 por E. Siebel, E. Orowan, T. von Karman y G. Sachs, quienes estudiaron los procesos de forja abierta [Siebel, 1923] [Siebel, 1947], laminación [von Karman, 1956], [Orowan, 1943] y estirado [Sachs, 1934], [Sachs, 1954].

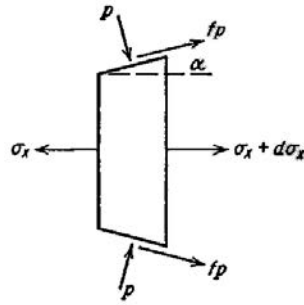


Figura Al. 6 Esfuerzos en el elemento diferencial de alambre en el estirado [Dieter, 1961].

Sachs incluyó la influencia del efecto del rozamiento en el correspondiente análisis del equilibrio de las fuerzas que intervienen en éste, asumiendo un valor del coeficiente de rozamiento  $\mu$  constante en toda la superficie de contacto de la hilera y un estado cilíndrico de tensiones en todo el hilo o alambre, tal y como representa la figura Al.6.

Partiendo de estas condiciones, fué posible desarrollar la ecuación diferencial que permite determinar la tensión de estirado  $\sigma_x$  en función del diámetro del hilo o alambre. Integrando entre los diámetros inicial y final, se obtuvo la expresión que permite calcular la tensión de estirado para una reducción determinada [Dieter, 1961]:

$$\sigma_x = \bar{Y} \frac{(1+B)}{B} \left[ 1 - \left( \frac{D_f}{D_0} \right)^{2B} \right] \quad (\text{Al.16})$$

En el proceso de estirado, la barra o alambre es sometido a una deformación uniaxial que es consecuencia del esfuerzo de tracción aplicado en el extremo y a la salida de la hilera. La geometría se deforma únicamente en una dirección mientras que la deformación en las otras dos direcciones se produce por el efecto de compresión que se produce en el interior del cono de reducción de dicha hilera.

El análisis del proceso de estirado en secciones circulares se simplifica al tratarse de un caso de deformación plana axisimétrica, ya que la sección transversal de cilindro deformado e hilera constituye un sistema simétrico respecto a su eje longitudinal. Las propiedades plásticas del metal a procesar, caracterizadas fundamentalmente por la capacidad que este tiene para deformarse plásticamente y por la influencia que el fenómeno de endurecimiento por deformación plástica en frío tiene sobre esta cualidad, además de las condiciones de fricción que existen en la interfase metal-hilera, van a ser los dos factores fundamentales que intervienen en el estirado.

Estos fundamentos, apoyados en las demás bases sobre la teoría de la plasticidad que se han descrito en este anexo, han permitido la aplicación del método analítico a los diferentes procesos de conformado por deformación plástica mencionados. La teoría de la plasticidad constituye un pilar fundamental en el que se apoya el desarrollo de la metodología para el diseño y análisis del proceso secuencial de estirado multi-etapa, metodología propuesta en el presente trabajo.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## **ANEXO II**

### **Materiales conformados en el proceso de estirado y en los casos estudiados**

---



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

### **All.1 Los metales como materia prima del proceso de estirado**

Son muchos y muy diversos los materiales procesados habitualmente mediante el proceso secuencial de estirado y, aunque en este grupo se han incluido últimamente algunos compuestos sintéticos, este tipo de proceso de conformado por deformación plástica es típico en los metales.

Generalmente, los metales empleados como materia prima en este proceso provienen de una colada de fusión, una posterior extrusión e incluso una laminación previa al estirado ya que es conveniente que el material tenga una cierta ductilidad, estabilidad estructural y resistencia a la rotura mínimas antes de iniciar su conformado plástico mediante el estirado.

Los materiales más comúnmente empleados en la fabricación de productos estirados son los aceros dúctiles, las aleaciones de aluminio y las aleaciones de cobre.

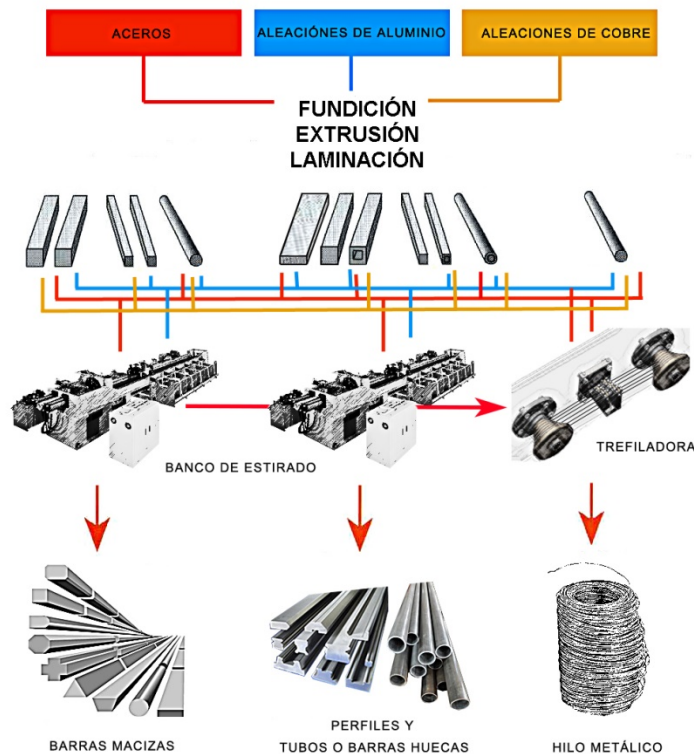


Figura All. 1 Metales comúnmente empleados en el proceso de estirado (elaboración propia).

Es habitual el estirado del acero para la fabricación de barras y alambres, productos empleados en la construcción de estructuras o el trefilado del cobre para la fabricación de conductores eléctricos, pero existen otro tipo de metales muy utilizados en otros sectores industriales, como los latones y las aleaciones de aluminio empleadas como semi-elaborados obtenidos mediante procesos de estirado, entre otros, y que son

empleados como materia prima en otro tipo de procesos de fabricación como, por ejemplo, los procesos de mecanizado de piezas y componentes industriales.

### **All.1.1 Aceros**

En España, los aceros se clasifican según la norma UNE [UNE EN 10020:2001], aunque también son internacionalmente utilizadas las normas americanas AISI-SAE (*American Iron and Steel Institute-Society of Automotive Engineers*) y ANSI (*American National Standards Institute*). Dentro de esta última se incluye la AWS (*American Welding Society*), dedicada a los aceros empleados en soldadura.

El presente trabajo acomete el análisis del estirado multi-etapa del acero dulce para soldadura, denominado ER70S-6 según la norma AWS [AWS A5.18/A5.18M:2005].

El acero ER 70S-6 ofrece una muy buena soldabilidad, con excelentes propiedades desoxidantes. Garantiza una soldadura de calidad, limpia, sin porosidades ni escoria. La designación del alambroón empleado para la producción de electrodos y alambre de soldadura se incluye en la norma UNE [UNE 36031:1985].

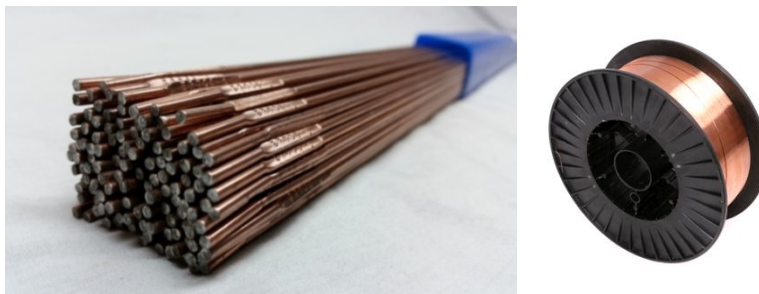


Figura All. 2 Varillas y bobinas de acero ER70-6 para soldadura.

(<http://picclick.ca/WeldingCity-5-Lb-ER70S-6-Mild-Steel-TIG-Welding-Filler-201454255446.html>, 2016)

(<http://www.preweld.com/Products-FillerMaterial.html>, 2016)

Tabla All. 1 Acero para soldadura ER70S-6. Ficha técnica.

FICHA TÉCNICA	
DENOMINACIÓN	
Acero para soldadura	
DESIGNACIÓN	NORMA
AWS ER70S-6	AWS A5.18/A5.18M:2005 ( <i>American Welding Society</i> )
F4001-F4010	UNE 36031:1985 (Una Norma española)



DESCRIPCIÓN
Aleación de acero dulce con bajo contenido en carbono que presenta muy buena tenacidad y soldabilidad incluso en superficies oxidadas o pintadas.

APLICACIONES
Apto para ser aplicado en la unión mediante soldadura de cualquier tipo de acero al carbono para construcción naval, unión de aleaciones ligeras y de acero dulce, construcción de ferrocarriles y máquinas, recipientes a presión, depósitos, etc...

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Otros	Fe
0,06	0,97	1,45	0,01	0,01	0,03	0,07	Resto

PROPIEDADES MECÁNICAS				
Módulo de Young (E)	Limite de fluencia (Y)	Limite de rotura (Rm)	C	n
210 Gpa	980 Mpa	1250 Mpa	220 Mpa	0,14



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

### **All.1.2 Aluminios**

El aluminio es uno de los metales más empleados para la fabricación de todo tipo de productos, debido a sus características y versatilidad.

En los procesos de conformado por deformación plástica por estirado en frío, el aluminio se emplea como material de partida en forma de barra, tubo o alambre, obtenido generalmente por un proceso previo de extrusión o laminación en caliente.

Estos procesos confieren buenas características de resistencia a tracción y ductilidad a este tipo de aleación, adecuando sus condiciones al posterior proceso de estirado en frío. El estirado multi-etapa en frío de este metal se aplica con el doble objetivo de conferir unas determinadas propiedades mecánicas diferentes en función de su posterior aplicación, confiriéndole la geometría deseada al producto una vez estirado.

Las aleaciones comúnmente empleadas en procesos de conformado por deformación plástica en frío se caracterizan por la inclusión de componentes como el Silicio (Si), el Manganeso (Mn), el Magnesio (Mg) o el Cobre (Cu) con el fin de mejorar propiedades mecánicas tales como la resistencia a tracción, capacidad de endurecimiento por deformación plástica, ductilidad, o resistencia a la corrosión.

Los productos de aluminio estirado en frío se clasifican según la norma UNE [UNE EN-754-1:2016] [UNE EN 754-2:2016], aunque está muy extendido internacionalmente el uso de la normativa americana AA (*Aluminum Association*). Se ha empleado la aleación designación genérica AA 7075-O en el presente trabajo. Como se ha citado, la materia prima para el proceso de estirado generalmente va a ser un producto extruido del aluminio y/o sus aleaciones [UNE EN 755-1:2016] [UNE EN 755-2:2016]. Según UNE, la citada aleación se denomina AW 7075-O, en la que la letra O indica el estado de suministro de la aleación como producto que después del conformado en caliente presenta las propiedades requeridas según el estado de recocido.

En capítulos anteriores se ha abordado el estudio del proceso secuencial de estirado del aluminio AW 7075-O, una de las aleaciones de aluminio comúnmente empleadas en el estirado de barras destinadas al mecanizado de piezas torneadas.

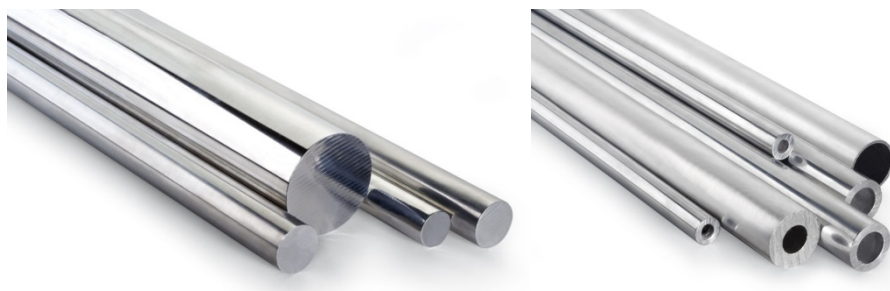


Figura All. 3 Barras y tubos del aluminio obtenidos por extrusión y/o estirado.

(<http://www.bronmetal.com/producto/extruidos/43>, 2016)



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

Tabla AII. 2 Aluminio AW 7075-O. Ficha técnica.

FICHA TÉCNICA	
DENOMINACIÓN	
Aluminio 7075-O	
DESIGNACIÓN	NORMA
AA7075-O	AA ( <i>Aluminum Association</i> )
EN AW 7075-O	UNE EN-755:2016 ( <i>Una Norma Española</i> )



DESCRIPCIÓN
Este tipo de aleación, una vez tratada térmicamente o transformada en frío, ofrece muy buenas propiedades mecánicas hasta tal punto de que su desarrollo ha permitido su utilización en campos que eran reservados a los aceros hasta hace poco. Se trata de un metal de alta resistencia una vez conformado plásticamente y/o templado además de la ventaja de su ligereza, con gran resistencia a la fatiga y fácil de mecanizar. Presenta gran dureza y resistencia al desgaste, buena conductividad térmica y permite conseguir buenos acabados superficiales en el mecanizado y el pulido.

APLICACIONES
Tienen gran aplicación en la fabricación de piezas para sectores como el armamentístico, automovilístico, aeronáutico o naval, construcción de maquinaria y fabricación de todo tipo de moldes para inyección de diferentes materiales. Empleado como materia prima para la construcción de elementos de transmisión ligeros y accesorios deportivos, bicicletas de competición, piezas para modelismo, tubos y tornillería ligera.

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)									
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros
Resto	0,4	0,5	1,2-2,0	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,2	0,15

PROPIEDADES MECÁNICAS				
Módulo de Young (E)	Limite de fluencia (Y)	Límite de rotura (Rm)	C	n
100 Gpa	75 Mpa	305 Mpa	900 Mpa	0,49



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

### **All.1.3 Cobre y sus aleaciones**

El cobre es conocido como el conductor universal. Empleado en conductores para la industria eléctrica y electrónica fabricados por trefilado, también se utiliza para fabricar de tubos para instalaciones de transporte de agua y gas por estirado.

El cobre puro ( $\geq 99\%$ ) es comúnmente utilizado como conductor en la construcción de líneas de transporte de electricidad y en la fabricación de infinidad de sistemas y componentes eléctricos y electrónicos, pero existen diferentes estados del metal de cobre en función de la forma de obtención del mismo o de los aditivos añadidos ( $\leq 1\%$ ).



Figura All. 4 Conductores y tubos de cobre obtenidos mediante trefilado y estirado secuencial.

(<http://extractoresdeaire.com/producto/conductores-electricos/page/2/>,2016)

(<http://www.bronmetal.com/producto/tubos-electricos/10>, 2016)

En la actualidad, las barras de cobre empleadas como materia prima en procesos de estirado son obtenidas mediante colada continua. En este sistema se funde el cobre electrolítico junto con los aditivos adecuados para, pasando por un sistema de laminadores en caliente, obtener una sección uniforme de barra o alambión.

La norma UNE (*Una Norma Española*) clasifica el cobre y sus aleaciones y ASTM es su homóloga americana (*American Society for Testing and Materials*). En el presente trabajo se emplean indistintamente ambas normas para el cobre y al latón.

En el presente trabajo, se ha estudiado el proceso de estirado secuencial multi-etapa de hilo de cobre electrolítico definido como Cu-ETP/CW004A y Cu-ETP1/CW003A según la norma UNE [UNE EN 1412:1996], C11000 según ASTM [ASTM B846-11a]. Se trata de un metal que, en forma de alambre o hilo metálico, gracias a su alta conductividad eléctrica, es muy utilizado en aplicaciones eléctricas y electrónicas.

La norma UNE incluyen el cobre y sus aleaciones [UNE EN 1412:1996], el alambión de cobre para trefilado [UNE EN 1977:2013] y las barras de alambre extruido, laminado y estirado de cobre para uso general [UNE EN 12166:2012], además del alambre estirado para uso eléctrico [UNE EN 13602:2014]. Además del cobre en estado puro, los latones con base cobre y predominio del zinc en aleación son muy empleados en los diferentes procesos de conformado plástico.

En este trabajo se ha estudiado el proceso de estirado secuencial de una barra de latón recocido C26000 [ASTM B846-11a], materia prima obtenida por extrusión. Conocido también como latón 70/30, en función de las proporciones de contenido en cobre y zinc, presenta mejor o peor aptitud para la deformación plástica en frío.



Figura AII. 5 Diferentes aplicaciones del alambre de latón.

(<http://www.kwb.eu/es/productos/accesorios-herramientas-electricas/cepillos/cepillos-de-latn/>, 2016)

(<http://afwiremesh.com/products/brass-wire-mesh.html>, 2016)

El latón se incluye en el grupo de aleaciones de cobre y se clasifica en función de su aplicación y contenido en zinc. Los productos trefilados, como el alambre de latón [UNE EN 12166:2012], o los acabados por estirado, como las barras [UNE EN 12164:2012] o tubos de latón para mecanizado [UNE EN 12168:2012], se obtienen a partir de alambroón y barra o tubo extruido respectivamente.

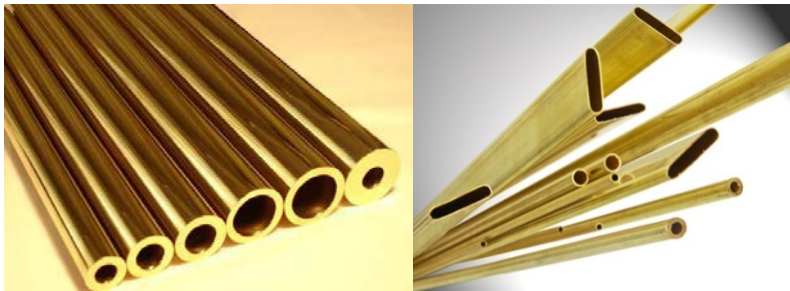


Figura AII. 6 Tubos de latón extruidos, laminados y conformados mediante estirado.

(<http://www.indiamart.com/coimbatore-metal-mart/>, 2016)

(<http://www.coppersev.com/en/products-vbs-product-portfolio/tubes/>, 2016)

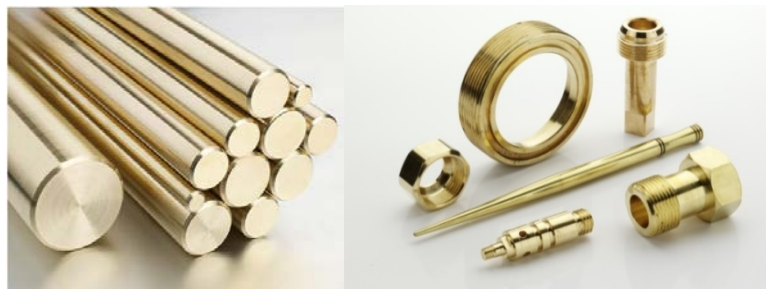


Figura AII. 7 Barras de latón estruidas y/o laminadas. Piezas torneadas de latón.

(<http://www.polarisexports.com/brass-rod.php>, 2016)

(<http://www.brassturnedparts.co.uk/>, 2016)

Tabla AII. 3 Cobre electrolítico Cu-ETP. Ficha técnica.

FICHA TÉCNICA	
DENOMINACIÓN	
Cobre electrolítico ETP y ETP1	
DESIGNACIÓN	NORMA
C11000-O	ASTM B846 - 11ª ( <i>American Society for Testing and Materials</i> )
Cu-ETP / CW004A	UNE EN-1412:1996 ( <i>Una Norma Española</i> )
Cu-ETP1 / CW003A	UNE EN-1412:1996 ( <i>Una Norma Española</i> )



DESCRIPCIÓN
Excelente conductividad eléctrica que lo hace apropiado para todo tipo de aplicaciones eléctricas y electrónicas así como para su uso industrial en procesos de electroerosión. Buena conductividad térmica que permite aplicaciones termodinámicas y posee una muy buena resistencia a la corrosión. Su resistencia mecánica y a fatiga lo hacen apto para múltiples aplicaciones arquitectónicas y su apariencia lo hace atractivo para elementos de orfebrería. Muy dúctil y maleable lo que le confiere unas características muy aptas para ser procesado por deformación plástica.

APLICACIONES
Su uso está extendido en los sectores eléctrico y electrónico en la fabricación de conductores y todo tipo de conectores, motores, transformadores, intercambiadores de calor, juntas de motores, conductos en instalaciones termodinámicas, conducciones de agua, desagües, revestimientos y paneles, cubiertas, piezas ornamentales, elementos sanitarios, monedas.

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)		
Cu	O	Otros
99,95	0,04-0,06	<0,01

Módulo de Young (E)	Limite de fluencia (Y)	Limite de rotura (Rm)	C	n
117 Gpa	69 Mpa	221 Mpa	315 Mpa	0,54



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

Tabla AII. 4 Latón CW505L. Ficha técnica.

FICHA TÉCNICA	
DENOMINACIÓN	
Latón 70/30	
DESIGNACIÓN	NORMA
UNS C26000	ASTM B846 - 11a (American Society for Testing and Materials)
CW505L	UNE EN-1412:1996 ( <i>Una Norma Española</i> )



DESCRIPCIÓN
Presenta una excelente capacidad para ser trabajado plásticamente en frío en procesos tales como estirado, embutición o estampación. Posee una gran tenacidad, buena resistencia al desgaste y a la corrosión además de una excelente maquinabilidad y aptitud para la aplicación de acabados y tratamientos superficiales como el pulido el electropulido o los recubrimientos y baños. Muy buen conductor térmico y eléctrico.

APLICACIONES
Ampliamente empleado en la fabricación de todo tipo de piezas como recipientes, instrumentos musicales, cartuchería. También utilizado como materia prima en ornamentación o para fabricar elementos de grifería, fontanería, instalaciones de gas, cojinetes de fricción y coronas dentadas. También se utiliza para fabricar conectores y terminales eléctricos, pasatapas y bujes para transformadores, etc.

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)			
Cu	Pb	Fe	Zn
68,5-71,5	0,07	0,05	28,5-31,5

PROPIEDADES MECÁNICAS				
Módulo de Young (E)	Limite de fluencia (Y)	Límite de rotura (Rm)	C	n
100 Gpa	75 Mpa	305 Mpa	900 Mpa	0,49



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## ANEXO III

### Resultados obtenidos en los análisis con *PullWorks*

---



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

### AIII.1 Introducción y justificación

La aplicación *PullWorks* posee una serie de pestañas y ventanas a través de las cuales ofrece al usuario los diferentes resultados y valores correspondientes al diseño geométrico y a los diferentes parámetros tecnológicos que definen el proceso secuencial de estirado o trefilado multi-etapa, todo ello a partir de los datos y condiciones especificadas.

Este anexo presenta las ventanas de resultados obtenidas, para cada uno de los casos y supuestos diseñados y analizados en esta tesis. En el mismo se exponen las ventanas correspondientes al diseño de las secuencias multi-etapa estudiadas y las que reflejan los resultados que el programa da para los valores de todos los parámetros tecnológicos de salida del proceso.

Se ha decidido agregar esta información con un objetivo meramente justificativo del trabajo realizado con la aplicación informática desarrollada y de la apariencia de la información que esta muestra sobre los resultados de los diferentes estudios.

### AIII.2 Estudio y análisis del proceso de trefilado de acero ER 70S-6

#### AIII.2.1 Resultados del análisis con *PullWorks*

**Supuesto nº1: Proceso de estirado secuencial discontinuo para  $\alpha=6^\circ$ ,  $L_c=0,4.d_f$ ,  $\Delta=1,20$ ,  $\mu=0,18$ , lubricación de base grafito y a velocidad 0,0013 m/s.**

Etapas i	d0 [mm]	e0 i	Recocido	LÍMITE DEFORMACIÓN HOMOGÉNEA				REDUCCIÓN ÁREA		REDUCCIÓN RATIO		DEFORMACIONES			$\Delta$
				e máx i	$\Delta$ e máx i	d mín i [mm]	d f i [mm]	% parcial	% total	r i	$\Delta$ r i	$\Delta$ e i	e f i		
1	2,02	0	SI	1,14	1,14	1,14	1,70	25,17	25,17	0,29	0,29	0,34	0,34	1,20	
2	1,70	0,34	NO	1,41	1,07	1,00	1,43	25,24	49,88	0,29	0,58	0,35	0,69	1,20	
3	1,43	0,69	NO	1,74	1,05	0,85	1,26	29,58	64,71	0,30	0,88	0,35	1,04	1,20	
4	1,20	1,04	NO	2,08	1,04	0,71	1,01	29,16	75	0,29	1,17	0,34	1,38	1,20	
5	1,01	1,38	NO	2,41	1,03	0,60	0,90	20,40	80,15	0,21	1,38	0,23	1,61	1,32	

Figura AIII. 1 Diseño del estirado discontinuo del acero ER 70S-6 en *PullWorks* ( $\Delta=1,20$ ).

Etapas i	Tratamiento Recocido	Análisis Local $\sigma_{oz+ordh}$ [MPa]	Retroceso $\sigma_{bp}$ [MPa]	W redundante $\sigma_{di}$ [MPa]	Calibración $\sigma_{cal}$ [MPa]	Tensión Estirado $\sigma$ [MPa]	Fluencia media $Y_m$ [MPa]	Fluencia salida $Y_f$ [MPa]	Fuerza Estirado F [N]	Potencia Estirado P [W]
1	SI	593,2085	0	92,71658	8,250695	894,17579	1145,9299	1169,1601	1575,64	2,05
2	NO	603,5754	0	94,10261	8,374036	706,05215	1163,0606	1188,6891	1133,97	1,47
3	NO	616,7628	0	94,99284	8,453256	720,20896	1174,0634	1201,2322	814,54	1,06
4	NO	611,5622	0	95,63341	8,510259	715,70596	1181,9805	1210,2577	573,41	0,75
5	NO	427,1460	0	96,14382	8,555680	531,84556	1188,2885	1217,4493	338,35	0,44

Figura AIII. 2 Parámetros tecnológicos del estirado del acero ER 70S-6 en *PullWorks* ( $\Delta=1,20$ ).

**Resultados obtenidos con la aplicación informática PullWorks**

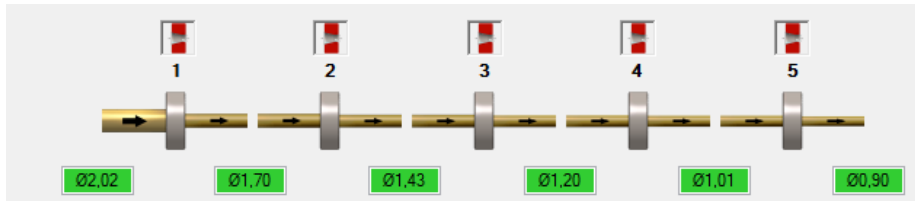


Figura AIII. 3 Diseño de la secuencia de estirado del acero ER 70S-6 en PullWorks ( $\Delta=1,20$ ).

**Supuesto nº2: Proceso de estirado secuencial discontinuo para  $\alpha=6^\circ$ ,  $L_c=0,4.d_f$ ,  $\Delta=1,80$ ,  $\mu=0,18$ , lubricación de base grafito y a velocidad 0,0013 m/s.**

Diseño de la secuencia de etapas del Proceso de Estirado Multi-etapa

Etapa i	$\phi_0$ [mm]	$\phi_i$	Recocido	LÍMITE DEFORMACIÓN HOMOGÉNEA			REDUCCIÓN ÁREA		REDUCCIÓN RATIO		DEFORMACIONES			
				$\epsilon_{f\max}$	$\Delta \epsilon_{\max}$	$d_{\min}$ [mm]	$d_f$ [mm]	% parcial	% total	$r_i$	$\Delta r_i$	$\Delta \epsilon_i$	$\epsilon_i$	$\Delta$
1	2,02	0	SI	1,14	1,14	1,14	1,59	20,60	20,60	0,21	0,21	0,23	0,23	1,80
2	1,80	0,23	NO	1,32	1,09	1,04	1,60	20,99	37,26	0,21	0,42	0,24	0,47	1,80
3	1,60	0,47	NO	1,53	1,06	0,94	1,42	21,23	50,58	0,21	0,63	0,24	0,71	1,80
4	1,42	0,71	NO	1,76	1,05	0,84	1,26	21,27	61,09	0,21	0,84	0,24	0,95	1,80
5	1,26	0,95	NO	1,99	1,04	0,75	1,12	20,99	69,26	0,21	1,05	0,24	1,19	1,80
6	1,12	1,19	NO	2,22	1,03	0,67	1,00	20,28	75,49	0,20	1,25	0,23	1,42	1,80
7	1,00	1,42	NO	2,45	1,03	0,60	0,90	19,00	80,15	0,19	1,44	0,21	1,63	1,80

$\Delta \epsilon$  1,82  $d_f$  1,63

Figura AIII. 4 Diseño del estirado discontinuo del acero ER 70S-6 en PullWorks ( $\Delta=1,80$ ).

Parámetros Tecnológicos del Estirado Secuencial Multi-Etapa

Etapa i	Tratamiento Recocido	Análisis Local $\sigma_{\text{roz+odh}}$ [MPa]	Retroceso $\sigma_{\text{obp}}$ [MPa]	W redundante $\sigma_{\text{di}}$ [MPa]	Calibración $\sigma_{\text{cal}}$ [MPa]	Tensión Estirado $\sigma$ [MPa]	Fluencia media $Y_m$ [MPa]	Fluencia salida $Y_f$ [MPa]	Fuerza Estirado F [N]	Potencia Estirado P [W]
1	SI	408,7433	0	92,00167	8,187077	508,93214	1137,0940	1159,0872	1295,08	1,68
2	NO	422,7940	0	93,32053	8,304440	524,41903	1153,3944	1177,6696	1054,41	1,37
3	NO	431,8590	0	94,17054	8,380080	534,40963	1163,9001	1189,6461	846,33	1,10
4	NO	435,3721	0	94,79158	8,435346	538,59906	1171,5759	1198,3965	671,58	0,87
5	NO	431,6803	0	95,28195	8,478983	535,44133	1177,6366	1205,3057	527,52	0,69
6	NO	418,3557	0	95,68563	8,514906	522,55628	1182,6258	1210,9934	410,42	0,53
7	NO	392,4798	0	96,04371	8,546771	497,07036	1187,0515	1216,0387	316,22	0,41

Figura AIII. 5 Parámetros tecnológicos del estirado del acero ER 70S-6 en PullWorks ( $\Delta=1,80$ ).

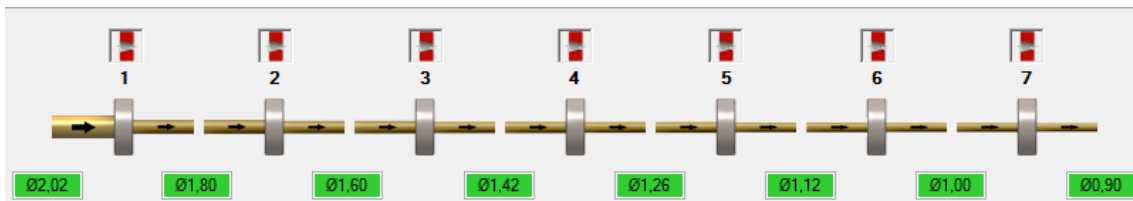


Figura AIII. 6 Diseño de la secuencia de estirado del acero ER 70S-6 en PullWorks ( $\Delta=1,20$ ).

### AIII.3 Estudio y análisis del proceso de trefilado de cobre C11000-O

#### AIII.3.1 Resultados del análisis con PullWorks

Supuesto nº1: Proceso de estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $\mu=0,36$  en seco y a velocidad 0,078 m/s para un factor de forma  $\Delta=2,40$ .

Etapas i	d0i (mm)	e0i	Recocido	LÍMITE DEFORMACIÓN HOMOGÉNEA			di (mm)	REDUCCIÓN ÁREA		REDUCCIÓN RATIO		DEFORMACIONES		
				efmáxi	$\Delta$ emáxi	dmini (mm)		% parcial	% total	ri	$\Delta$ ri	$\Delta$ ei	efi	$\Delta$
1	3,2	0	SI	1,54	1,54	1,48	2,85	20,68	20,68	0,21	0,21	0,23	0,23	2,40
2	2,45	0,23	NO	1,62	1,39	1,42	2,54	20,57	37,00	0,21	0,41	0,23	0,46	2,40
3	2,04	0,46	NO	1,76	1,30	1,33	2,28	20,83	50,12	0,21	0,62	0,23	0,69	2,40
4	1,78	0,69	NO	1,93	1,24	1,22	2,01	20,90	60,55	0,21	0,83	0,23	0,92	2,40
5	1,61	0,92	NO	2,12	1,20	1,10	1,79	20,69	68,71	0,21	1,04	0,23	1,16	2,40
6	1,49	0	SI	1,54	1,54	0,83	1,88	21,10	75,31	0,21	1,25	0,24	0,24	2,40
7	1,33	0,24	NO	1,62	1,38	0,80	1,42	20,24	80,31	0,20	1,45	0,23	0,47	2,40
8	1,42	0,47	NO	1,76	1,29	0,75	1,3	16,19	83,50	0,16	1,61	0,18	0,65	2,40

Figura AIII. 7 Diseño de la secuencia de estirado del cobre ETP para  $\mu=0,36$ ,  $v=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en PullWorks.

Etapas i	Tratamiento Recocido	Análisis Local cruz+odh [MPa]	Retroceso obp [MPa]	W redundante odi [MPa]	Calibración ocal [MPa]	Tensión Estirado $\sigma$ [MPa]	Fluencia media Ym [MPa]	Fluencia salida Yf [MPa]	Fuerza Estirado F [N]	Potencia Estirado P [W]
1	SI	100,4966	0	17,47203	2,906927	120,87558	161,49598	211,44381	771,12	60,15
2	NO	126,1141	0	22,02023	3,663639	151,79800	203,53552	276,18470	769,17	60,00
3	NO	148,3039	0	25,62727	4,263765	178,19502	236,87585	327,52882	714,83	55,76
4	NO	166,3907	0	28,67552	4,770921	199,83715	265,05118	370,91882	634,10	49,46
5	NO	180,4195	0	31,34988	5,215870	216,98533	289,77059	408,98671	546,04	42,59
6	SI	103,5295	0	17,70467	2,945634	124,17990	163,64635	214,75539	246,57	19,23
7	NO	124,9976	0	22,11973	3,680194	150,79753	204,45525	277,60109	238,82	18,63
8	NO	120,8546	0	25,84522	4,300025	150,99993	238,89033	330,63111	200,43	15,63

Figura AIII. 8 Parámetros tecnológicos del estirado secuencial del cobre ETP para  $\mu=0,36$ ,  $v=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en PullWorks.

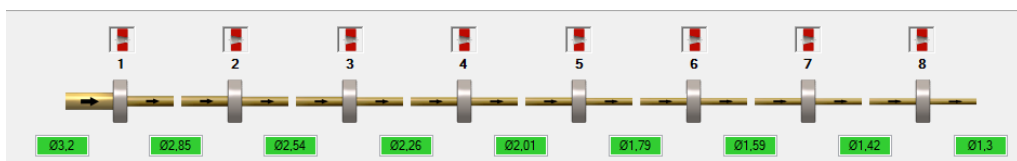


Figura AIII. 9 Diseño de la secuencia de estirado del cobre ETP para  $\mu=0,36$ ,  $v=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en PullWorks.

**Resultados obtenidos con la aplicación informática PullWorks**

**Supuesto nº2: Estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $\mu=0,36$  en la zona de contacto lubricada con jabón ( $\mu=0,21$ ), velocidad 0,078 m/s para un factor de forma  $\Delta=2,40$ .**

Diseño de la secuencia de etapas del Proceso de Estirado Multi-etapa

Etapa i	d0i [mm]	e0i	Recocido	LÍMITE DEFORMACIÓN HOMOGÉNEA			REDUCCIÓN ÁREA		REDUCCIÓN RATIO		DEFORMACIONES		$\Delta$	
				efmáxi i	$\Delta$ emáxi i	dfm i [mm]	% parcial	% total	ri	$\Delta$ ri	$\Delta$ ei	ei		
1	3,2	0	SI	1,54	1,54	1,48	2,85	20,68	20,68	0,21	0,21	0,23	0,23	2,40
2	2,85	0,23	NO	1,62	1,39	1,42	2,54	20,57	37,00	0,21	0,41	0,23	0,46	2,40
3	2,54	0,46	NO	1,76	1,30	1,33	2,26	20,83	50,12	0,21	0,62	0,23	0,69	2,40
4	2,26	0,69	NO	1,93	1,24	1,22	2,01	20,90	60,55	0,21	0,83	0,23	0,92	2,40
5	2,01	0,92	NO	2,12	1,20	1,10	1,79	20,69	68,71	0,21	1,04	0,23	1,15	2,40
6	1,79	1,15	NO	2,32	1,17	1,00	1,59	21,10	75,31	0,21	1,25	0,24	1,39	2,40
7	1,59	1,39	NO	2,54	1,15	0,89	1,42	20,24	80,31	0,20	1,45	0,23	1,62	2,40
8	1,42	1,62	NO	2,75	1,13	0,81	1,3	16,19	83,80	0,16	1,61	0,18	1,80	2,40

Figura AIII. 10 Diseño de la secuencia del estirado del cobre ETP para  $\mu=0,21$ ,  $v=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en PullWorks.

Parámetros Tecnológicos del Estirado Secuencial Multi-Etapa

Etapa i	Tratamiento Recocido	Análisis Local $\sigma_{\text{roz+odh}}$ [MPa]	Retroceso $\sigma_{\text{bp}}$ [MPa]	W redundante $\sigma_{\text{di}}$ [MPa]	Calibración local [MPa]	Tensión Estirado $\sigma$ [MPa]	Fluencia media $Y_m$ [MPa]	Fluencia salida $Y_f$ [MPa]	Fuerza Estirado F [N]	Potencia Estirado P [W]
1	SI	79,85507	0	17,47203	2,906927	100,23403	161,49598	211,44381	639,43	49,88
2	NO	100,1522	0	22,02023	3,663639	125,83613	203,53552	276,18470	637,62	49,73
3	NO	117,9414	0	25,62727	4,263765	147,83250	236,87585	327,52882	593,03	46,26
4	NO	132,3744	0	28,67552	4,770921	165,82086	265,05118	370,91882	526,17	41,04
5	NO	143,3730	0	31,34988	5,215870	179,93878	289,77059	408,98671	452,82	35,32
6	NO	157,7375	0	33,87004	5,635163	197,24277	313,06466	444,85957	391,64	30,55
7	NO	161,9064	0	36,14323	6,013369	204,06308	334,07608	477,21717	323,17	25,21
8	NO	139,2399	0	38,39600	6,388175	184,02410	354,89864	509,28391	244,26	19,05

Figura AIII. 11 Parámetros tecnológicos del estirado del cobre ETP para  $\mu=0,21$ ,  $v=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en PullWorks.

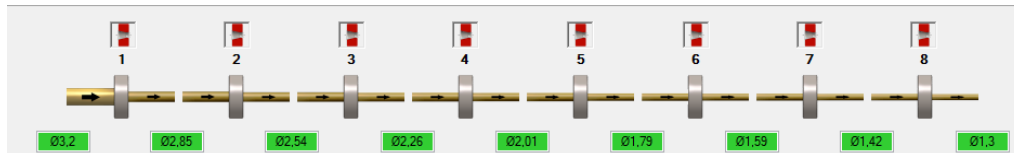


Figura AIII. 12 Diseño de la secuencia del estirado del cobre ETP para  $\mu=0,21$ ,  $v=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en PullWorks.

**Resultados obtenidos con la aplicación informática PullWorks**

Supuesto nº3: Proceso de estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ , considerando  $\mu=0,36$  y lubricado con grafito ( $\mu=0,14$ ) a velocidad 0,078 m/s, para  $\Delta=2,40$ .

Diseño de la secuencia de etapas del Proceso de Estirado Multi-etapa

Etapa i	d0i [mm]	e0i	Recocido	LÍMITE DEFORMACIÓN HOMOGÉNEA				REDUCCIÓN ÁREA		REDUCCIÓN RATIO		DEFORMACIONES			$\Delta$
				efmáxi	$\Delta$ emáxi	dmini [mm]	dfi [mm]	% parcial	% total	ri	$\Delta$ ri	$\Delta$ ei	efi		
1	3,2	0	SI	1,54	1,54	1,48	2,85	20,68	20,68	0,21	0,21	0,23	0,23	2,40	
2	2,85	0,23	NO	1,62	1,39	1,42	2,54	20,57	37,00	0,21	0,41	0,23	0,46	2,40	
3	2,54	0,46	NO	1,76	1,30	1,33	2,25	20,83	50,12	0,21	0,62	0,23	0,69	2,40	
4	2,26	0,69	NO	1,93	1,24	1,22	2,01	20,90	60,55	0,21	0,83	0,23	0,92	2,40	
5	2,01	0,92	NO	2,12	1,20	1,10	1,79	20,69	68,71	0,21	1,04	0,23	1,15	2,40	
6	1,79	1,15	NO	2,32	1,17	1,00	1,53	21,10	75,31	0,21	1,25	0,24	1,39	2,40	
7	1,53	1,39	NO	2,54	1,15	0,89	1,42	20,24	80,31	0,20	1,45	0,23	1,62	2,40	
8	1,42	1,62	NO	2,75	1,13	0,81	1,3	16,19	83,50	0,16	1,61	0,18	1,80	2,40	

ΣDr: 1,80    ef: 1,80

Figura AIII. 13 Diseño de la secuencia de estirado del cobre ETP para  $\mu=0,14$ ,  $v=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en PullWorks.

Parámetros Tecnológicos del Estirado Secuencial Multi-Etapa

Etapa	Tratamiento Recocido	Análisis Local $\sigma_{\text{roz+odn}}$ [MPa]	Retroceso $\sigma_{\text{bp}}$ [MPa]	W redundante $\sigma_{\text{di}}$ [MPa]	Calibración $\sigma_{\text{oc}}$ [MPa]	Tensión Estirado $\sigma$ [MPa]	Fluencia media $Y_m$ [MPa]	Fluencia salida $Y_f$ [MPa]	Fuerza Estirado F [N]	Potencia Estirado P [W]
1	SI	67,42749	0	17,47203	2,906927	87,806454	161,49598	211,44381	560,15	43,69
2	NO	84,53946	0	22,02023	3,663639	110,22333	203,53552	276,18470	558,51	40,56
3	NO	99,63110	0	25,62727	4,263765	129,52214	236,87585	327,52882	519,58	40,53
4	NO	111,8455	0	28,67552	4,770921	145,29202	265,05118	370,91882	461,03	35,96
5	NO	121,0652	0	31,34988	5,215870	157,63099	289,77059	408,98671	396,68	30,94
6	NO	133,3522	0	33,87004	5,635163	172,85748	313,06466	444,85957	343,22	26,77
7	NO	136,5354	0	36,14323	6,013369	178,69210	334,07608	477,21717	282,99	22,07
8	NO	116,0656	0	38,39600	6,388175	160,84983	354,89864	509,28391	213,50	16,65

Figura AIII. 14 Parámetros tecnológicos del estirado secuencial del cobre ETP para  $\mu=0,14$ ,  $v=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en PullWorks.

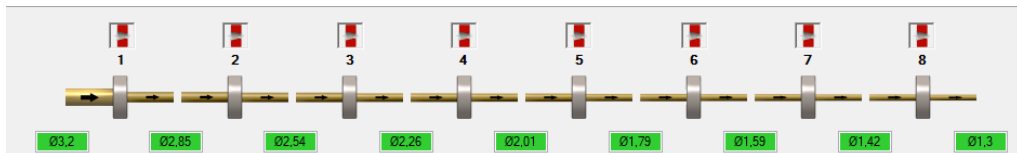


Figura AIII. 15 Diseño de la secuencia del estirado del cobre ETP para  $\mu=0,14$ ,  $v=0,078$  m/s y  $\Delta=2,40$  en PullWorks.

### AIII.4 Estudio y análisis del proceso de trefilado de aluminio AL7075-O

#### AIII.4.1 Resultados del análisis con PullWorks

Supuesto nº1: Estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $v=0,5$  m/s y lubricación con aceite mineral ( $\mu=0,10$ ) y considerando un factor de forma  $\Delta=2,75$  (Proceso sin recocidos intermedios).

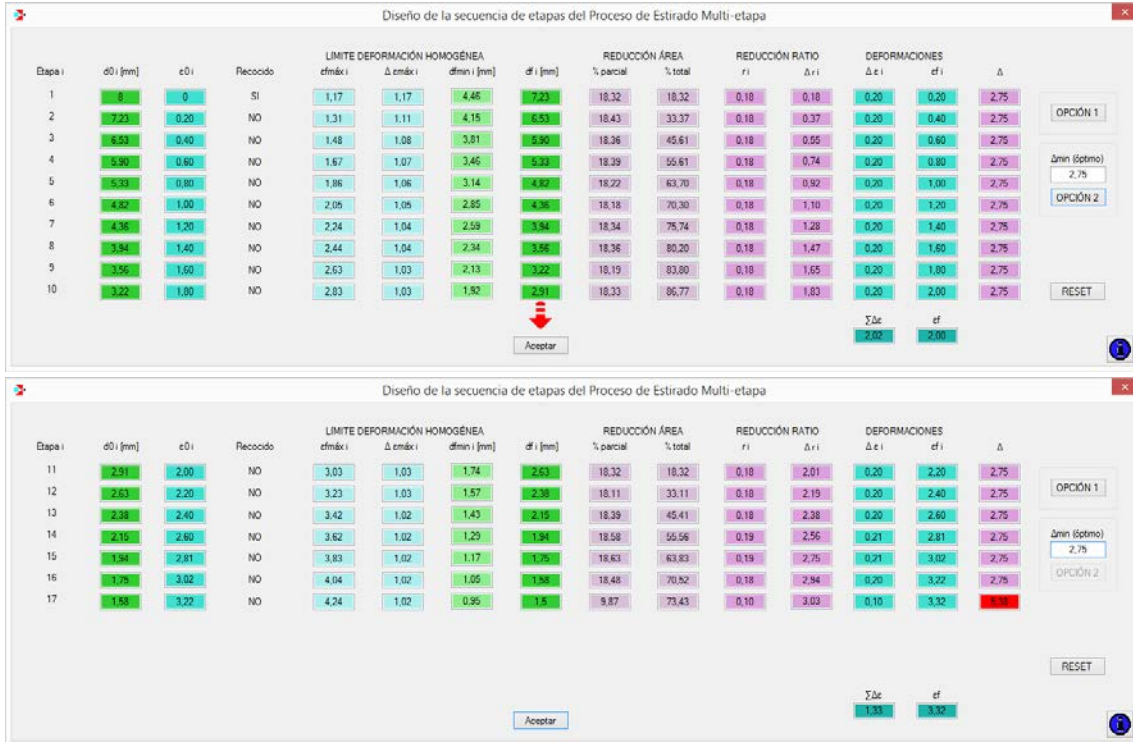


Figura AIII. 16 Diseño del estirado del AL 7075-O ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,75$ , sin recocidos intermedios).



Figura AIII. 17 Parámetros tecnológicos del estirado del AL 7075-O ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,75$ , sin recocidos intermedios).

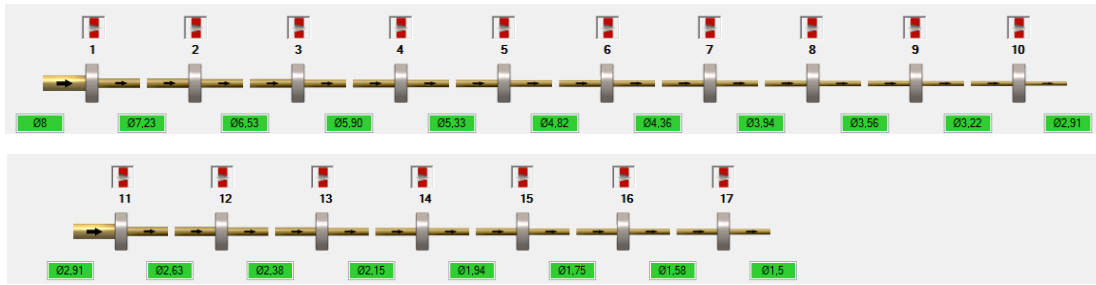


Figura AIII. 18 Diseño del estirado del AL 7075-O ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,75$ , sin recocidos intermedios).

Supuesto nº2: Estirado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,5.d_f$ ,  $v=0,5$  m/s, lubricación con aceite mineral ( $\mu=0,10$ ) y  $\Delta=2,30$  (Proceso con recocido intermedio cada 5 etapas).

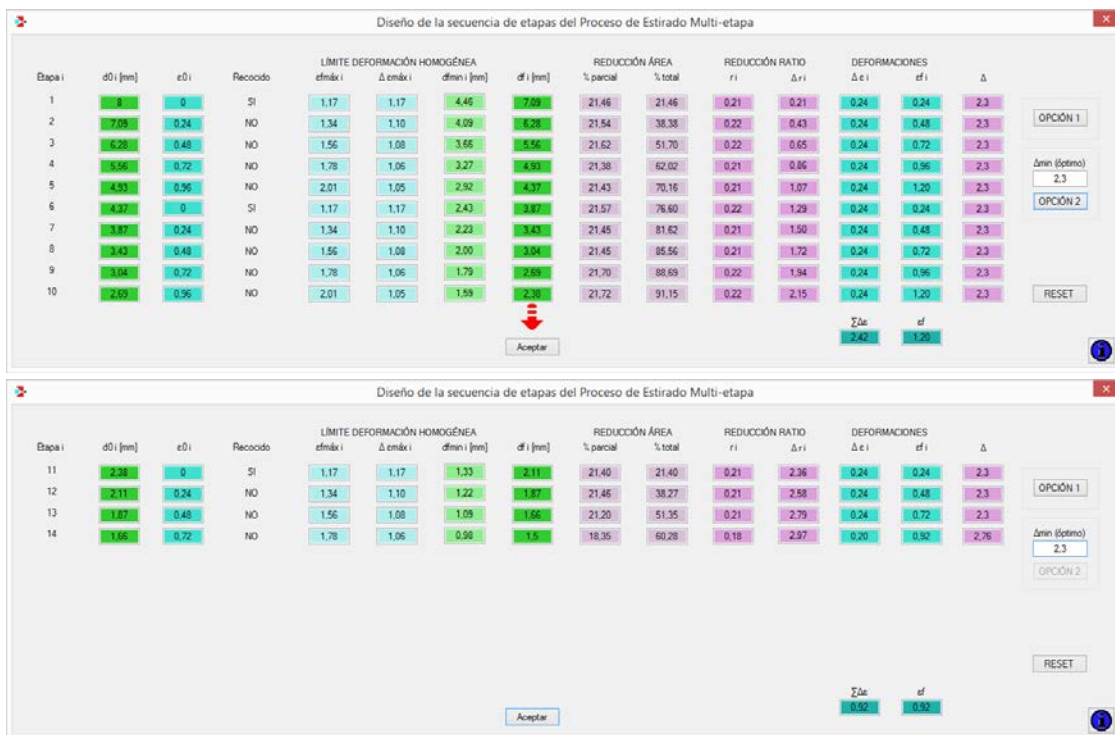


Figura AIII. 19 Diseño del estirado del AL 7075-O ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,30$ , con recocidos intermedios).

Parámetros Tecnológicos del Estirado Secuencial Multi-Etapa										
Etapa i	Tratamiento Recocido	Análisis Local $\sigma_{\text{cruz+rodh}}$ [MPa]	Retroceso $\sigma_{\text{bp}}$ [MPa]	W redundante $\sigma_{\text{di}}$ [MPa]	Calibración local [MPa]	Tensión Estirado $\sigma$ [MPa]	Fluencia media $Y_m$ [MPa]	Fluencia salida $Y_f$ [MPa]	Fuerza Estirado F [N]	Potencia Estirado P [W]
1	SI	141.7497	0	40.37942	1.866158	183.99537	373.23166	418.83104	7264.24	3632.12
2	NO	155.2521	0	44.03892	2.035284	201.32632	407.05683	458.40650	6236.07	3118.03
3	NO	164.0248	0	46.36760	2.142905	212.53537	428.58109	483.58988	5160.26	2580.13
4	NO	168.1975	0	48.09495	2.222735	218.51520	444.54714	502.27016	4171.25	2085.63
5	NO	173.5923	0	49.51796	2.288501	225.39881	457.70026	517.65930	3380.69	1690.35
6	SI	142.5587	0	40.37942	1.866158	184.80432	373.23166	418.83104	2173.83	1086.91
7	NO	154.4733	0	44.02461	2.034622	200.53257	406.92453	458.25170	1852.95	926.48
8	NO	162.6431	0	46.34999	2.142091	211.13523	428.41833	483.39945	1532.49	766.25
9	NO	170.9265	0	48.12165	2.223969	221.27220	444.79396	502.55893	1257.54	628.77
10	NO	176.1214	0	49.53808	2.289430	227.94900	457.88618	517.87684	1014.10	507.05
11	SI	141.3799	0	40.37942	1.866158	183.62555	373.23166	418.83104	642.08	321.04
12	NO	154.5426	0	44.02588	2.034681	200.60322	406.93631	458.26548	550.95	275.47
13	NO	160.5965	0	46.32386	2.140883	209.06133	428.17676	483.11681	452.46	226.23
14	NO	143.6735	0	48.11178	2.223513	194.00889	444.70274	502.45221	342.84	171.42

Figura AIII. 20 Parámetros tecnológicos del estirado del AL 7075-O ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,30$ , con recidos intermedios).

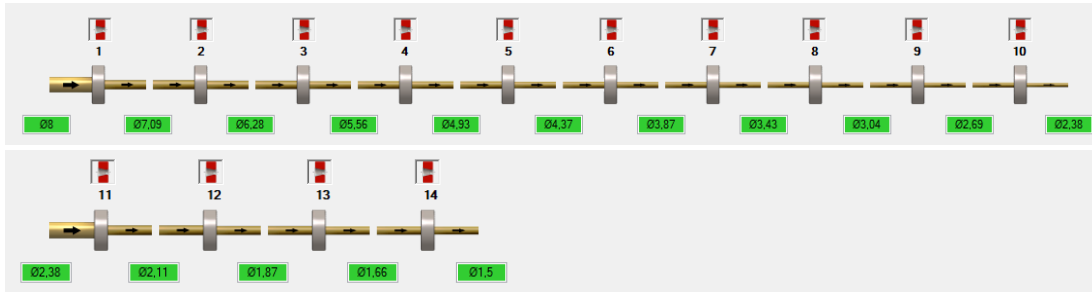


Figura AIII. 21 Diseño del estirado del AL 7075-O ( $\mu=0,10$ ,  $\Delta=2,30$ , con recidos intermedios).

### AIII.5 Estudio y análisis del proceso de trefilado de latón 70-30, C26000

#### AIII.5.1 Resultados del análisis con PullWorks

Supuesto nº1: Proceso de trefilado secuencial para  $\alpha=5^\circ$ ,  $L_c=0,35.d_f$ , considerando un factor delta óptimo  $\Delta=2,50$  para el diseño de la secuencia, a velocidad 30 m/s y  $\mu=0,12$  en seco.

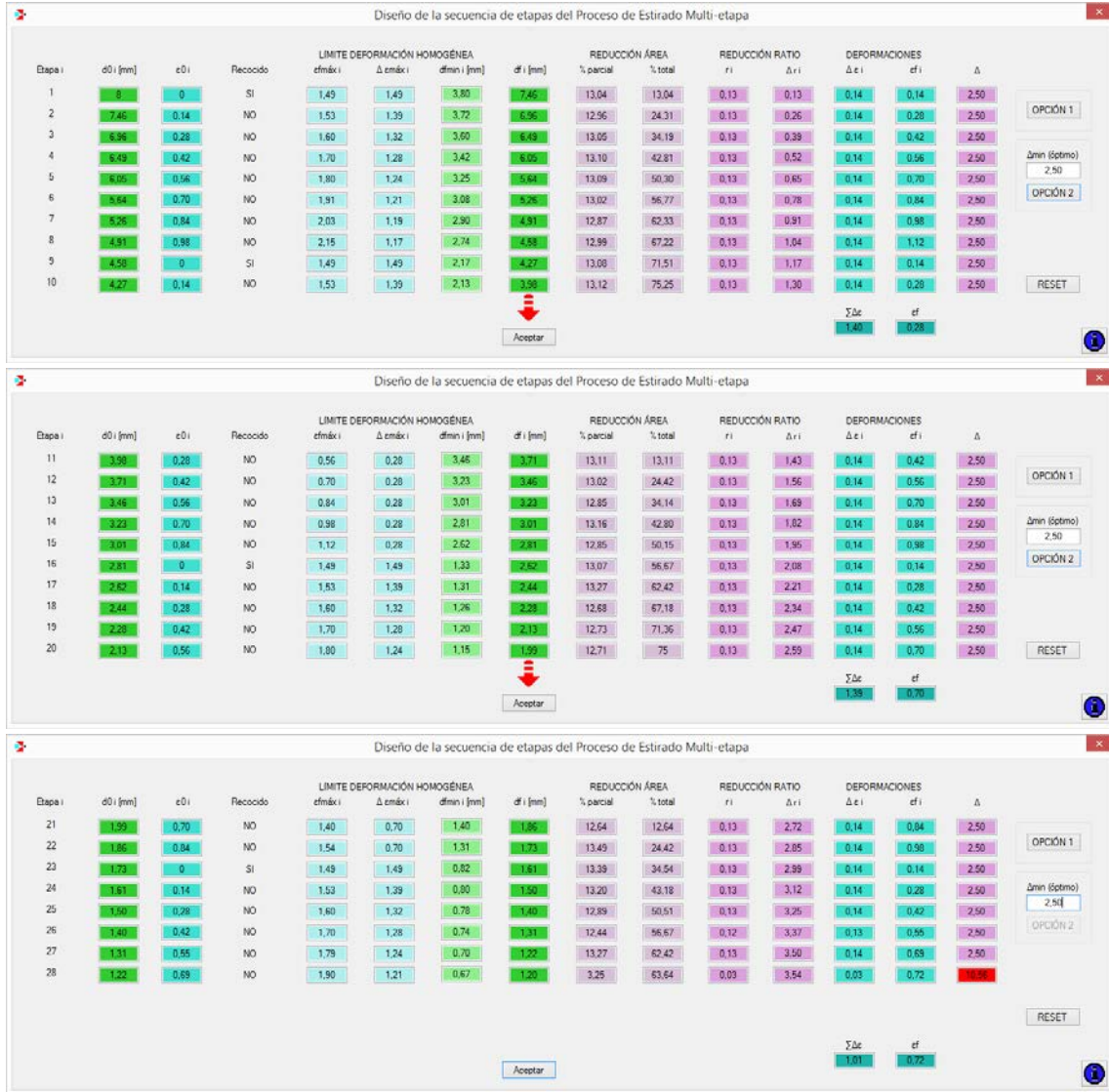


Figura AIII. 22 Diseño de la secuencia de trefilado del latón 70-30 ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=5^\circ$ ).

**Resultados obtenidos con la aplicación informática PullWorks**

Parámetros Tecnológicos del Estirado Secuencial Multi-Etapa										
Etapa i	Tratamiento Recocido	Análisis Local $\sigma_{\text{red}} + \sigma_{\text{od}}$ [MPa]	Retroceso $\sigma_{\text{obp}}$ [MPa]	W redundante $\sigma_{\text{od}}$ [MPa]	Calibración local [MPa]	Tensión Estirado $\sigma_0$ [MPa]	Fluencia media $\gamma_m$ [MPa]	Fluencia salida $\gamma_f$ [MPa]	Fuerza Estirado F [N]	Potencia Estirado P [W]
1	SI	92.15105	0	20.57468	1.283073	114.00880	305.49365	418.43554	4983.18	4310.45
2	NO	119.2619	21.82809	26.80541	1.671632	169.56705	398.00776	556.28157	6451.35	6451.35
3	NO	141.7666	25.90857	31.63975	1.973110	201.28803	469.78824	663.23448	6658.84	6658.84
4	NO	160.4729	29.30414	35.68169	2.225173	227.68393	529.80324	752.65683	6545.37	8705.34
5	NO	176.3036	32.19765	39.21693	2.445636	250.16384	582.29452	830.86884	6249.91	9537.36
6	NO	189.5299	34.65314	42.38984	2.643505	269.21646	629.40600	901.06494	5850.11	10196.74
7	NO	200.1116	36.67791	45.28496	2.824050	284.89861	672.39292	965.11546	5394.41	10842.77
8	NO	214.2889	39.19915	48.03869	2.995777	304.52254	713.28036	1026.0377	5016.97	10425.26
9	SI	92.43063	16.88437	20.58393	1.283650	131.18259	305.63103	418.64024	1878.55	4470.95
10	NO	121.0808	22.10297	26.87840	1.676184	171.73844	399.09157	557.89644	2136.61	5826.53
11	NO	142.4020	26.00093	31.64490	1.973432	202.02131	469.86477	663.34851	2183.92	6855.31
12	NO	159.4526	29.15307	35.65806	2.223700	226.48752	529.45239	752.13406	2129.55	7685.54
13	NO	172.8426	31.68599	39.15051	2.441495	246.12066	581.30841	829.39953	2016.71	8351.21
14	NO	191.6284	34.96107	42.42421	2.645648	271.65938	629.91640	901.82544	1933.07	9216.90
15	NO	199.8256	36.63568	45.28087	2.823795	284.56596	672.33215	965.02490	1764.76	9655.02
16	SI	92.29940	16.86387	20.57468	1.283073	131.02103	305.49365	418.43554	706.37	4445.21
17	NO	122.6896	22.34484	26.94265	1.680191	173.65737	400.04552	559.31782	812.01	5891.98
18	NO	137.3351	25.24331	31.50943	1.964983	196.05285	467.85328	660.35140	800.45	6651.73
19	NO	155.4969	28.56351	35.56626	2.217975	221.84475	528.08930	750.10306	790.50	7527.10
20	NO	170.8488	31.38921	39.11221	2.439106	243.78941	580.73967	828.55211	758.25	8271.74
21	NO	184.1489	33.87262	42.40060	2.644176	263.06633	629.56581	901.30305	714.80	8925.66
22	NO	210.2351	38.15495	45.42979	2.833082	296.65297	674.54334	968.31957	697.32	10065.11
23	SI	95.47417	17.35434	20.77836	1.295775	134.90265	308.51796	422.94176	274.64	4577.14
24	NO	121.9134	22.22828	26.91168	1.678260	172.73167	399.58577	558.63281	305.24	5860.66
25	NO	139.8105	25.61594	31.58233	1.969530	198.97833	468.93571	661.96422	306.30	6751.25
26	NO	151.7764	28.00335	35.47964	2.433682	217.47203	526.80319	748.18676	293.11	7378.56
27	NO	177.7105	32.36551	39.02523	2.212573	251.53502	579.44824	826.62788	294.04	8534.27
28	NO	47.89930	10.13450	42.08647	2.624586	102.74487	624.90166	894.35348	116.20	3486.06

Figura AIII. 23 Parámetros tecnológicos del trefilado de latón,  $\alpha=5^\circ$ .

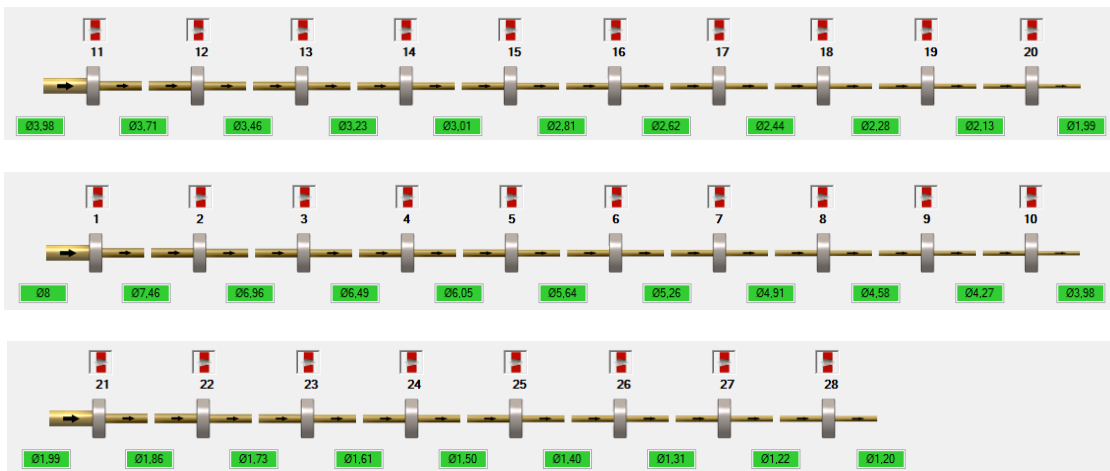


Figura AIII. 24 Diseño de la secuencia de estirado de latón,  $\alpha=5^\circ$ .

**Resultados obtenidos con la aplicación informática PullWorks**

Supuesto nº2: Proceso de trefilado secuencial para  $\alpha=8^\circ$ ,  $L_c=0,35.d_f(i)$ ,  $CW\% \leq 50\%$ , considerando un factor delta óptimo  $\Delta=1,50$  para el diseño de la secuencia, a velocidad 30 m/s y  $\mu=0,12$  en seco.

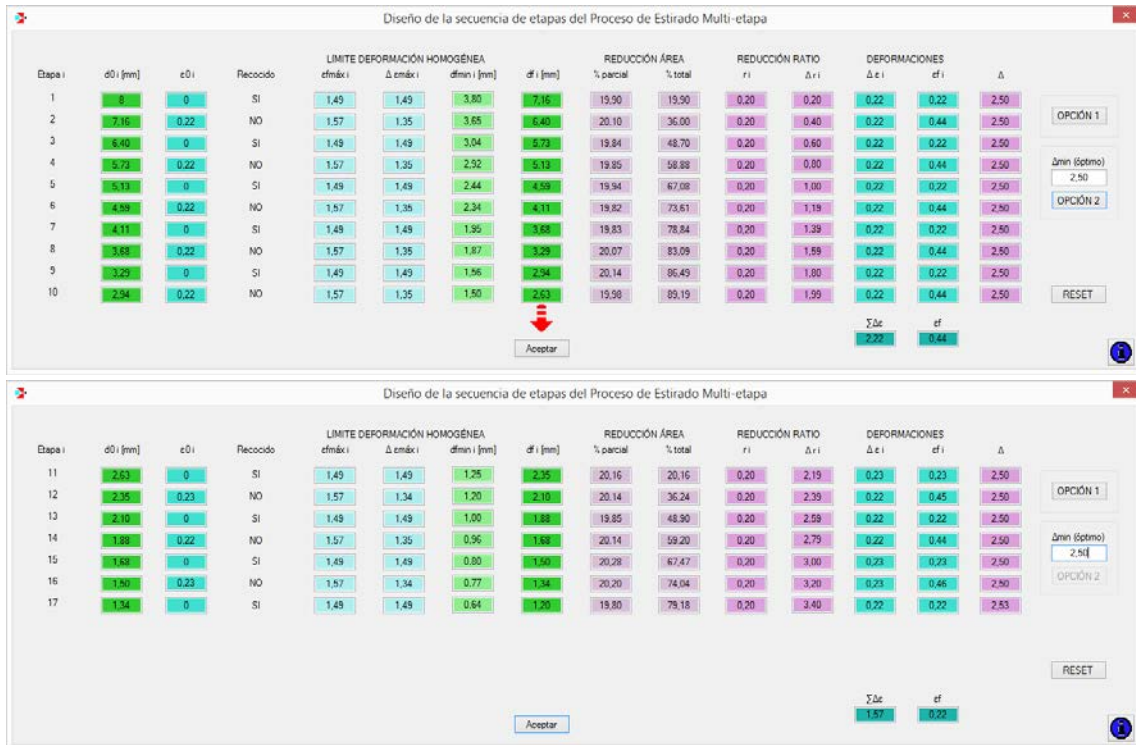


Figura AIII. 25 Secuencia de trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=8^\circ$ ).

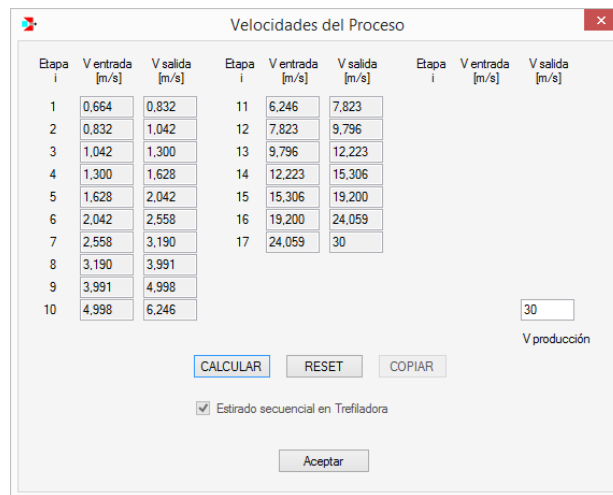


Figura AIII. 26 Velocidades en el trefilado de latón para  $\alpha=8^\circ$ .

1	SI	135,8759	0	39,23310	1,523071	176,63212	362,63607	503,57775	7111,92	5917,11
2	NO	182,0956	33,28470	52,03377	2,020007	269,43418	480,95417	679,87171	8667,69	9031,74
3	SI	135,7659	24,88538	39,31373	1,526201	201,49122	363,38136	504,68823	5195,85	5414,07
4	NO	179,1967	32,84455	51,87833	2,013972	265,93364	479,51735	677,73086	5496,66	8948,56
5	SI	136,7911	25,04578	39,40252	1,529648	202,76913	364,20203	505,91102	3355,20	6851,31
6	NO	178,9204	32,80247	51,86346	2,013395	265,59978	479,37997	677,52616	3523,73	9013,69
7	SI	135,4070	24,82267	39,23310	1,523071	200,98594	362,63607	503,57775	2137,73	6819,35
8	NO	181,7573	33,23346	52,01568	2,019305	269,02585	480,78691	679,62250	2287,06	9127,64
9	SI	138,7919	25,35782	39,57465	1,536330	205,26072	365,79305	508,28164	1393,45	6964,46
10	NO	180,6723	33,06890	51,95756	2,017048	267,71582	480,24970	678,82205	1454,38	9084,03
11	SI	140,0995	25,59276	39,91835	1,549673	207,16030	368,96991	513,01516	898,53	7029,21
12	NO	184,2651	33,66595	52,54072	2,039687	272,51151	485,63997	686,85357	943,87	9246,20
13	SI	135,8983	24,90611	39,32522	1,526647	201,65628	363,48754	504,84644	559,78	6842,21
14	NO	182,5775	33,35762	52,05953	2,021007	270,01568	481,19220	680,22639	598,55	9161,36
15	SI	140,1542	25,56955	39,69102	1,540848	206,95570	366,86866	509,88430	365,72	7021,86
16	NO	184,8436	33,75333	52,57110	2,040867	273,20891	485,92073	687,27188	385,30	9269,85
17	SI	135,2264	24,79642	39,23310	1,523071	200,77907	362,63607	503,57775	227,08	6812,29

Figura AIII. 27 Parámetros tecnológicos del trefilado de latón para  $\alpha=8^\circ$ .

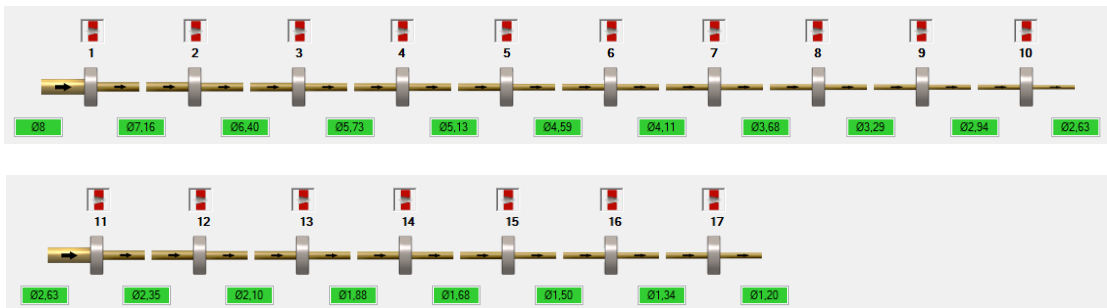


Figura AIII. 28 Diseño de la secuencia de trefilado de latón,  $\alpha=8^\circ$ .

**Supuesto nº3: Proceso de trefilado secuencial para  $\alpha=11^\circ$ ,  $L_c=0,35.d_f$ , considerando un factor delta óptimo  $\Delta=2,50$  para el diseño de la secuencia, a velocidad 30 m/s y  $\mu=0,12$  en seco.**

**Diseño de la secuencia de etapas del Proceso de Estirado Multi-etapa**

Etapa i	d0 i [mm]	e0 i	Recocido	LIMITE DEFORMACIÓN HOMOGÉNEA				REDUCCIÓN ÁREA		REDUCCIÓN RATIO		DEFORMACIONES					
				emáx i	Δ emáx i	dmin i [mm]	df i [mm]	% parcial	% total	ri	Δ ri	Δ e i	ef i	Δ			
1	8	0	SI	1,49	1,49	3,80	6,87	26,25	26,25	0,26	0,26	0,30	0,30	2,50			
2	6,87	0	SI	1,49	1,49	3,26	5,90	26,25	45,61	0,26	0,52	0,30	0,30	2,50			
3	5,90	0	SI	1,49	1,49	2,90	5,06	26,45	59,99	0,26	0,79	0,31	0,31	2,50			
4	5,06	0	SI	1,49	1,49	2,40	4,34	26,43	70,57	0,26	1,05	0,31	0,31	2,50			
5	4,34	0	SI	1,49	1,49	2,06	3,72	26,53	78,38	0,27	1,32	0,31	0,31	2,50			
6	3,72	0	SI	1,49	1,49	1,77	3,19	26,46	84,10	0,26	1,58	0,31	0,31	2,50			
7	3,19	0	SI	1,49	1,48	1,51	2,74	26,22	88,27	0,26	1,85	0,30	0,30	2,50			
8	2,74	0	SI	1,49	1,49	1,30	2,35	26,44	91,37	0,26	2,11	0,31	0,31	2,50			
9	2,35	0	SI	1,49	1,49	1,12	2,02	26,11	93,62	0,26	2,37	0,30	0,30	2,50			
10	2,02	0	SI	1,49	1,49	0,96	1,73	26,65	95,32	0,27	2,64	0,31	0,31	2,50			
												Σ Δ e	ef				
														3,06	0,31		

Etapa i	d0 i [mm]	e0 i	Recocido	LIMITE DEFORMACIÓN HOMOGÉNEA				REDUCCIÓN ÁREA		REDUCCIÓN RATIO		DEFORMACIONES					
				emáx i	Δ emáx i	dmin i [mm]	df i [mm]	% parcial	% total	ri	Δ ri	Δ e i	ef i	Δ			
11	1,73	0	SI	1,49	1,49	0,82	1,48	26,81	26,81	0,27	2,91	0,31	0,31	2,50			
12	1,48	0	SI	1,49	1,49	0,70	1,27	26,37	46,11	0,26	3,17	0,31	0,31	2,50			
13	1,27	0,31	NO	1,62	1,31	0,66	1,20	10,72	51,89	0,11	3,44	0,11	0,42	2,50			
												Σ Δ e	ef				
														0,78	0,42		

Figura AIII. 29 Secuencia de trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=11^\circ$ ).

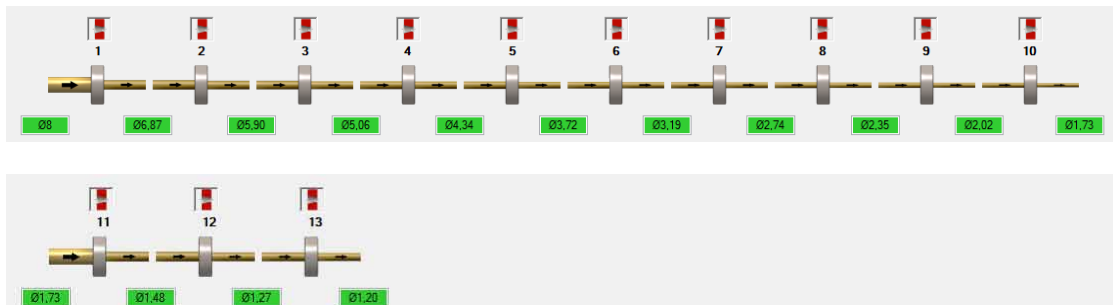


Figura AIII. 30 Diseño de la secuencia de trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=11^\circ$ ).

Etapa i	V entrada [m/s]	V salida [m/s]	Etapa i	V entrada [m/s]	V salida [m/s]	Etapa i	V entrada [m/s]	V salida [m/s]
1	0,812	1,109	11	14,434	19,722			
2	1,109	1,506	12	19,722	26,784			
3	1,506	1,687	13	26,784	30			
4	1,687	2,294						
5	2,294	3,122						
6	3,122	4,245						
7	4,245	5,754						
8	5,754	7,823						
9	7,823	10,587						
10	10,587	14,434						

Figura AIII. 31 Velocidades en el trefilado del latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=11^\circ$ ).

Etapa i	Tratamiento Recocido	Análisis Local $\sigma_{roz+odh}$ [MPa]	Retroceso $\sigma_{bp}$ [MPa]	W redundante $\sigma_{di}$ [MPa]	Calibración local [MPa]	Tensión Estirado $\sigma$ [MPa]	Fluencia media $Y_m$ [MPa]	Fluencia salida $Y_f$ [MPa]	Fuerza Estirado F [N]	Potencia Estirado P [W]
1	SI	184,0355	33,76085	61,32711	1,721354	280,84492	409,84641	573,92116	10410,48	11545,23
2	SI	185,0453	33,94884	61,68777	1,731478	282,41340	412,25667	577,51244	7721,12	11628,00
3	SI	187,2360	34,29253	61,91049	1,737729	285,17682	413,74512	579,73023	5734,64	8636,37
4	SI	187,0864	34,26909	61,89533	1,737304	284,98818	413,64380	579,57927	4215,97	9671,43
5	SI	188,1380	34,43371	62,00175	1,740290	286,31383	414,35496	580,63889	3111,85	9715,21
6	SI	188,0559	34,43772	62,13865	1,744133	286,37644	415,26985	582,00207	2288,81	9715,99
7	SI	183,7999	33,72656	61,32711	1,721354	280,57503	409,84641	573,92116	1654,40	9519,43
8	SI	187,1669	34,28171	61,90350	1,737533	285,08972	413,69835	579,66054	1236,54	9673,45
9	SI	183,6229	33,72509	61,54233	1,727395	280,61777	411,28467	576,06416	899,31	9520,98
10	SI	189,4578	34,63995	62,13480	1,744025	287,97667	415,24414	581,96377	676,92	9770,73
11	SI	190,6926	33,76085	62,13865	1,744133	288,33626	415,26985	582,00207	496,04	9782,83
12	SI	186,3415	34,15233	61,81974	1,735182	284,04878	413,13861	578,82653	359,82	9637,55
13	NO	97,63843	20,15512	82,48672	2,315271	202,59556	551,25512	784,62013	229,13	6873,92

Figura AIII. 32 Parámetros tecnológicos del trefilado de latón ( $\mu=0,12$ ,  $\Delta=2,50$ ,  $\alpha=11^\circ$ ).