



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Ingeniería de los Procesos de Fabricación

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Estudio de comportamiento a tracción de piezas
metálicas obtenidas mediante fabricación aditiva

Máster en Ingeniería Mecánica Avanzada

Autor: D. DAVID MARTÍN GÓMEZ

Tutor: DRA. DÑA. MARÍA JESÚS MARTÍN SÁNCHEZ

Cotutor: DR. D. FRANCISCO DE SALES MARTÍN FERNÁNDEZ

En Málaga, a 23 de junio de 2025

ESTA PÁGINA HA SIDO DEJADA EN
BLANCO DE FORMA INTENCIONADA

ESTA PÁGINA HA SIDO DEJADA EN
BLANCO DE FORMA INTENCIONADA

RESUMEN

La fabricación aditiva ha experimentado un notable avance en los últimos años, posicionándose como una alternativa cada vez más relevante frente a los procesos de fabricación convencionales. Esta tecnología permite la producción rápida y eficiente de componentes con geometrías complejas, alta precisión y reducido desperdicio de material, lo que ha transformado significativamente la forma en que se diseñan y fabrican productos en numerosos sectores. Además, la considerable reducción de los costes asociados a esta tecnología ha facilitado su acceso, haciendo posible su incorporación no solo en el ámbito industrial, sino también en pequeñas empresas, entornos educativos y por parte de usuarios particulares.

A pesar del auge de la fabricación aditiva en general, su aplicación con materiales metálicos aún se encuentra en fase de desarrollo, especialmente en tecnologías basadas en la extrusión de filamento fundido, como Fused Filament Fabrication (FFF) o Fused Deposition Modeling (FDM). Estas tecnologías, ampliamente utilizadas con polímeros, presentan todavía muchas incógnitas en cuanto al comportamiento mecánico de los metales procesados bajo este método. En particular, existe una carencia de estudios sistemáticos que permitan establecer comparaciones fiables con las propiedades mecánicas que presentan estos mismos materiales cuando son fabricados mediante técnicas más convencionales como el mecanizado o la fundición.

En este contexto, el presente Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo principal el estudio del comportamiento a tracción de piezas metálicas obtenidas mediante fabricación aditiva. Para ello, se han diseñado, fabricado y ensayado probetas de cuatro materiales metálicos distintos: Acero inoxidable 17 4-PH, Acero para herramientas A2, Acero para herramientas H13 e Inconel 625. Todas las probetas han sido fabricadas siguiendo especificaciones dimensionales ajustadas a las normativas correspondientes para ensayos mecánicos en metales. Además, con el fin de obtener una caracterización más completa de las piezas, el análisis de tracción se ha complementado con ensayos de dureza y estudios metalográficos. Estos últimos han permitido observar la microestructura de las probetas, evaluar la calidad del sinterizado y detectar posibles defectos derivados del proceso de fabricación. De este modo, el trabajo ofrece una visión integral sobre cómo la fabricación aditiva mediante FFF/FDM afecta a las propiedades físicas y mecánicas de los metales analizados. Por otro lado, este trabajo pretende sentar las bases, en la medida de lo posible, para una mejor comprensión del comportamiento de los metales fabricados por tecnologías aditivas de extrusión, y contribuir así a su posible implementación en aplicaciones reales que exijan determinadas prestaciones mecánicas. La investigación realizada en este TFM representa un paso más en el camino hacia la validación industrial de la fabricación aditiva metálica mediante FFF/FDM, abriendo posibilidades de diseño y producción más sostenibles, eficientes y flexibles.

Palabras clave:

Fabricación aditiva, FFF, FDM, tracción, dureza, metalografía, materiales metálicos, caracterización mecánica, diseño de probetas, impresión 3D metálica.

ESTA PÁGINA HA SIDO DEJADA EN
BLANCO DE FORMA INTENCIONADA

ABSTRACT

Additive manufacturing has experienced remarkable progress in recent years, positioning itself as an increasingly relevant alternative to conventional manufacturing processes. This technology enables the rapid and efficient production of components with complex geometries, high precision, and minimal material waste, significantly transforming the way products are designed and manufactured across multiple sectors. Furthermore, the considerable reduction in the costs associated with this technology has facilitated its accessibility, making it possible to incorporate it not only in the industrial sector, but also in small businesses, educational settings, and by individual users.

Despite the overall growth of additive manufacturing, its application using metallic materials is still under development, particularly in technologies based on fused filament extrusion, such as Fused Filament Fabrication (FFF) or Fused Deposition Modeling (FDM). These technologies, widely used with polymers, still pose many questions regarding the mechanical behavior of metals processed through this method. In particular, there is a lack of systematic studies that allow for reliable comparisons with the mechanical properties of the same materials when manufactured using conventional techniques such as machining or casting.

In this context, the main objective of this Master's Thesis is to study the tensile behavior of metal components produced through additive manufacturing. To this end, specimens made from four different metallic materials have been designed, manufactured, and tested: 17-4 PH stainless steel, A2 tool steel, H13 tool steel, and Inconel 625. All specimens were manufactured in accordance with dimensional specifications based on current standards for mechanical testing of metals. Additionally, in order to obtain a more comprehensive characterization of the samples, the tensile testing has been complemented with hardness testing and metallographic analysis. The latter has made it possible to observe the microstructure of the specimens, evaluate the quality of sintering, and identify potential defects resulting from the manufacturing process. In this way, the work provides an integrated view of how additive manufacturing through FFF/FDM affects the physical and mechanical properties of the analyzed metals. Moreover, this work aims to lay the groundwork, as far as possible, for a better understanding of the behavior of metals processed through extrusion-based additive manufacturing technologies, and thereby contribute to their potential implementation in real-world applications that require specific mechanical performance. The research carried out in this Master's Thesis represents a further step toward the industrial validation of metal additive manufacturing via FFF/FDM, unlocking more sustainable, efficient, and flexible possibilities in product design and manufacturing.

Keywords:

Additive manufacturing, FFF, FDM, tensile strength, hardness, metallography, metallic materials, mechanical characterization, specimen design, metal 3D printing.

ESTA PÁGINA HA SIDO DEJADA EN
BLANCO DE FORMA INTENCIONADA

Trabajo de fin de Máster

Memoria

Realizado por:

David Martín Gómez

Titulación: Máster en Ingeniería Mecánica Avanzada.

Tutorizado por:

M^a Jesús Martín Sánchez

Francisco de Sales Martín Fernández



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Objetivo	1
1.2.- Antecedentes y alcance	1
1.3.- Definiciones	2
2.- ESTADO DEL ARTE	5
2.1.- Fabricación aditiva.....	5
2.1.1.- Concepto de fabricación aditiva	5
2.1.2.- Tipo de procesos	6
2.1.3.- Materiales empleados en fabricación aditiva.....	9
2.1.4.- Diferencias entre la fabricación aditiva de materiales metálicos y plásticos.....	10
2.1.5.- Equipos comúnmente utilizados	12
2.1.6.- Equipo y software de impresión 3D utilizado en el trabajo.....	13
2.2.- Propiedades mecánicas/ensayos	16
2.2.1.- Ensayo de tracción	17
2.3.- Ensayo de dureza	18
2.3.1.- Conceptos iniciales	19
2.3.2.- Ensayo de dureza Rockwell.....	20
2.3.3.- Equipo empleado para los ensayos	21
2.3.4.- Flujo de trabajo	21
2.4.- Análisis metalográfico	23
2.5.- Materiales a ensayar	25
2.5.1.- Acero inoxidable 17-4PH	25
2.5.2.- Acero para herramienta A2.....	26
2.5.3.- Acero para herramienta H13.....	27
2.5.4.- Inconel 625	28
3.- DESARROLLO	31
3.1.- Búsqueda bibliográfica y normativa de referencia	32
3.2.- Metodología de fabricación	33
3.2.1.- Consideraciones iniciales de diseño	33
3.2.2.- Proceso de diseño de las probetas.....	34
A.- Normativa a cumplir y consideraciones iniciales	34
B.- Geometría de la probeta y cálculo de dimensiones.....	34

C.- Evolución del diseño	36
D.- Justificación elección diseño final según normativa.....	39
3.2.3.- Fabricación de probetas	41
A.- Parámetros de impresión.....	41
B.- Orientación de impresión	42
C.- Impresión de las piezas en Metal X	43
D.- Lavado de las piezas “verdes” en la máquina Wash-1	44
E.- Proceso de sinterizado en Sinter-1	46
F.- Resumen de parámetros y tiempos empleados en la fabricación de una probeta.....	47
G.- Número de probetas a ensayar	48
H.- Codificación de las probetas	48
3.3.- Metodología de ensayo	49
3.3.1.- Equipo de ensayo.....	49
3.3.2.- Software y selección de parámetros de ensayo.....	51
3.3.3.- Parámetros de ensayo	52
3.3.4.- Protocolo de ensayo.....	53
3.3.5.- Tratamiento de datos.....	55
3.4.6.- Cálculo de datos.....	56
4.- PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
4.1.- Obtención de parámetros de estudio.....	60
4.1.1.- Cálculo del alargamiento a la rotura	60
4.1.2.- Número de probetas ensayadas.....	61
4.2.- Análisis de resultados	61
4.2.1.- Análisis y comparación de los resultados en función de la orientación con los teóricos61	
A.- Acero inoxidable 17-4PH	62
B.- Acero para herramientas A2	70
C.- Acero para herramientas H13	78
D.- Inconel 625	87
4.2.2.- Análisis y comparación de resultados entre los diferentes materiales ensayados	95
5.- ENSAYO DE DUREZA.....	101
5.1.- Recopilación de los resultados obtenidos	101
5.2.- Análisis de resultados	103

5.2.1.- Acero inoxidable 17-4PH	103
A.- Probetas con orientación 1 o planas.....	104
B.- Probetas con orientación 2 o de canto.....	105
5.2.2.- Acero para herramientas A2	106
A.- Probetas con orientación 1 o planas.....	107
B.- Probetas con orientación 2 o de canto.....	108
5.2.3.- Acero para herramientas H13	109
A.- Probetas con orientación 1 o planas.....	110
B.- Probetas con orientación 2 o de canto.....	111
5.2.4.- Inconel 625	112
A.- Probetas con orientación 1 o planas.....	113
B.- Probetas con orientación 2 o de canto.....	114
5.3.- Correlación resultados de dureza-tracción.....	114
6.- METALOGRAFÍA.....	117
6.1.- Probetas analizadas	117
6.2.- Micrografías.....	118
6.2.1.- Acero inoxidable 17-4PH – SS1	118
6.2.2.- Acero para herramienta A2 - A22	120
6.2.3.- Acero para herramienta H13 - H135	122
6.2.4.- Inconel 625 - INC2	124
7.- CONCLUSIONES.....	126
7.1.- Conclusiones del ensayo de tracción	126
7.1.1.- Conclusiones particulares según el material.....	126
A.- Acero inoxidable 17-4PH	126
B.- Acero para herramienta A2	127
C.- Acero para herramienta H13	128
D.- Inconel 625	130
7.2.- Conclusiones del ensayo de dureza	131
7.2.1.- Probetas de acero inoxidable 17-4PH.....	131
7.2.2.- Probetas de acero para herramienta A2	133
7.2.3.- Probetas de acero para herramienta H13	134
7.2.4.- Probetas de Inconel 625.....	135

7.3.- Conclusiones Metalografía	136
7.3.1.- Conclusiones particulares por material.....	136
A.- Acero inoxidable 17-4PH – SS1	136
B.- Acero para herramienta A2 – A22	136
C.- Acero para herramienta H13 – H135	137
D.- Inconel 625 – INC2.....	137
7.4.- Conclusiones generales.....	137
8.- LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....	139
8.1.- Ensayo de tracción.....	139
8.2.- Ensayo de dureza	140
8.3.- Ensayo metalográfico	140
9.- BIBLIOGRAFÍA	142
ANEXO 1.- Fichas técnicas	1
A1.1.- Materiales.....	1
A1.1.1.- Acero inoxidable 17-4PH	1
A1.1.2.- Acero para herramienta A2.....	3
A1.1.3.- Acero para herramienta H13	4
A1.1.4.- Inconel 625	5
A1.2.- Especificaciones del equipo para impresión 3D utilizado	6
A1.2.1.- Impresora Metal X.....	6
A1.2.2.- Estación de lavado Wash-1	7
A1.2.3.- Horno de sinterizado Sinter-1	8
A1.3.- Fichas técnicas del equipo de ensayo	9
A1.3.1.- Servosis MUE 403	9
A1.3.2.- Software de control PCD 2K Servosis MUE 403	11
A1.3.3.- Extensómetro Axial modelo 3452-050M-050-ST	12
ANEXO 2.- Planos.....	13
ANEXO 3.- Ficha resumen probetas ensayadas	15

Índice de Figuras

Figura 1.- Proceso de obtención de piezas a través de la fabricación aditiva [3]	6
Figura 2.- Las 7 tecnologías de fabricación aditiva más importantes [5]	8
Figura 3.- Impresora Metal X [Fuente propia].....	13
Figura 4.- Estación de lavado Wash-1 [Fuente propia]	14
Figura 5.- Horno de sinterizado Sinter-1 [Fuente propia].....	14
Figura 6.- Captura de pantalla del software Eiger [Fuente propia].....	16
Figura 7.- Ejemplo de curva de comportamiento de un material sometido a un ensayo de tracción [Fuente propia].....	17
Figura 8.- Durómetro Centaur RB2 utilizado para los ensayos de dureza [Fuente propia]	21
Figura 9.- Colocación de la probeta en el durómetro [Fuente propia]	22
Figura 10.- Estructura desarrollo metodología [Fuente propia].....	31
Figura 11.- Parámetros principales a calcular para el dimensionamiento de la probeta [26]	35
Figura 12.- Modelo 1 diseñado [Fuente propia]	37
Figura 13.- Segundo modelo diseñado [Fuente propia]	38
Figura 14.- Modelo final de la probeta a diseñar (Vista isométrica) [Fuente propia].....	40
Figura 15.- Modelo final de la probeta a diseñar (Alzado) [Fuente propia]	40
Figura 16.- Orientación 1 de impresión de las probetas a ensayar [Fuente propia].....	42
Figura 17.- Líneas de impresión de las probetas impresas con orientación 1 [Fuente propia]	42
Figura 18.- Orientación 2 de impresión de las probetas a ensayar [Fuente propia].....	43
Figura 19.- Líneas de impresión de las probetas impresas con orientación 2 [Fuente propia]	43
Figura 20.- Muestra de algunas de las probetas “verdes” recién impresas [Fuente propia].	44
Figura 21.- Colocación de las piezas verdes en la máquina de lavado Wash-1 [Fuente propia].....	45
Figura 22.- a) Colocación de las probetas para su introducción en Sinter-1 y b) Pantalla de control del horno de sinterizado [Fuente propia]	46
Figura 23.- Probetas listas para ensayar [Fuente propia]	47
Figura 24.- Ejemplos de codificación de algunas de las probetas fabricadas [Fuente propia]	49
Figura 25.- Máquina de ensayos Servosis MUE 403/65 [Fuente propia].....	50
Figura 26.- Extensómetro axial modelo 3452 utilizado [Fuente propia]	51
Figura 27.- a) Equipo utilizado para el control software durante los ensayos y b) Entorno de control del software de Servosis [Fuente propia].....	52
Figura 28.- Menú del software donde se elegían los parámetros de ensayo [Fuente propia]	53

Figura 29.- Probeta ensayada [Fuente propia]	55
Figura 30.- Aplicación del límite al 0.2% (recta roja) sobre una de las probetas ensayadas para obtener el punto de fluencia (R_p) [Fuente propia]	57
Figura 31.- a) Zona de la hoja de cálculo donde se realiza la aproximación al 0.2%, b) Representación de las gráficas tensión-deformación y c) Resumen resultados finales obtenidos [Fuente propia]	59
Figura 32.- Marcado de la probeta correspondiente al valor L_0 marcas [Fuente propia]	60
Figura 33.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) SS2 y b) SSC2 [Fuente propia]	62
Figura 34.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) SS3 y b) SSC3 [Fuente propia]	63
Figura 35.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) SS4 y b) SSC4 [Fuente propia]	63
Figura 36.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) SS5 y b) SSC5 [Fuente propia]	63
Figura 37.- Módulo de elasticidad medio, teórico y de cada probeta ensayada de 17-4PH [Fuente propia]	65
Figura 38.- Límite de fluencia R_p al 0.2% medio, teórico y de cada probeta ensayada de 17-4PH [Fuente propia]	65
Figura 39.- Resistencia a la tracción R_m media, teórica y de cada probeta ensayada de 17-4PH [Fuente propia]	66
Figura 40.- Límite de rotura R_u medio, teórico y de cada probeta ensayada de 17-4PH [Fuente propia]	66
Figura 41.- Alargamiento a la rotura medio, teórico y de cada probeta ensayada de 17-4PH [Fuente propia]	67
Figura 42.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) A21 y b) A2C1 [Fuente propia]	70
Figura 43.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) A22 y b) A2C2 [Fuente propia]	71
Figura 44.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) A23 y b) A2C3 [Fuente propia]	71
Figura 45.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) A24 y b) A2C4 [Fuente propia]	71
Figura 46.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) A25 y b) A2C5 [Fuente propia]	72
Figura 47.- Módulo de elasticidad medio, teórico y de cada probeta ensayada de A2 [Fuente propia]	73
Figura 48.- Límite de fluencia R_p al 0.2% medio, teórico y de cada probeta ensayada de A2 [Fuente propia]	74
Figura 49.- Resistencia a la tracción R_m media, teórica y de cada probeta ensayada de A2 [Fuente propia]	74
Figura 50.- Límite de rotura R_u medio, teórico y de cada probeta ensayada de A2 [Fuente propia]	75

Figura 51.- Alargamiento a la rotura medio, teórico y de cada probeta ensayada de A2 [Fuente propia]	75
Figura 52.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) H131 y b) H13C1 [Fuente propia]	78
Figura 53.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) H132 y b) H13C2 [Fuente propia]	79
Figura 54.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) H133 y b) H13C3 [Fuente propia]	79
Figura 55.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) H134 y b) H13C4 [Fuente propia]	79
Figura 56.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) H135 y b) H13C5 [Fuente propia]	80
Figura 57.- Curva tensión-deformación de la probeta H136 [Fuente propia]	80
Figura 58.- Módulo de elasticidad medio, teórico y de cada probeta ensayada de H13 [Fuente propia]	81
Figura 59.- Límite de fluencia R_p al 0.2% medio, teórico y de cada probeta ensayada de H13 [Fuente propia]	82
Figura 60.- Resistencia a la tracción R_m media, teórica y de cada probeta ensayada de H13 [Fuente propia]	82
Figura 61.- Límite de rotura R_u medio, teórico y de cada probeta ensayada de H13 [Fuente propia]	83
Figura 62.- Alargamiento a la rotura medio, teórico y de cada probeta ensayada de H13 [Fuente propia]	83
Figura 63.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) INC1 y b) INCC1 [Fuente propia]	87
Figura 64.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) INC2 y b) INCC2 [Fuente propia]	87
Figura 65.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) INC3 y b) INCC3 [Fuente propia]	88
Figura 66.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) INC4 y b) INCC4 [Fuente propia]	88
Figura 67.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) INCC5 y b) INCC6 [Fuente propia]	88
Figura 68.- Módulo de elasticidad medio, teórico y de cada probeta ensayada de INC 625 [Fuente propia]	90
Figura 69.- Límite de fluencia R_p al 0.2% medio, teórico y de cada probeta ensayada de INC 625 [Fuente propia]	90
Figura 70.- Resistencia a la tracción R_m media, teórica y de cada probeta ensayada de INC 625 [Fuente propia]	91
Figura 71.- Límite de rotura R_u medio, teórico y de cada probeta ensayada de INC 625 [Fuente propia]	91
Figura 72.- Alargamiento a la rotura medio, teórico y de cada probeta ensayada de INC 625 [Fuente propia]	92

Figura 73.- Módulo de elasticidad promedio obtenido para cada material ensayado [Fuente propia]	96
Figura 74.- Límite de fluencia al 0.2% promedio obtenido para cada material ensayado [Fuente propia]	96
Figura 75.- Resistencia a la tracción máxima promedio obtenido para cada material ensayado [Fuente propia]	97
Figura 76.- Límite de rotura promedio obtenido para cada material ensayado [Fuente propia]	97
Figura 77.- Alargamiento a la rotura promedio obtenido para cada material ensayado [Fuente propia]	98
Figura 78.- Dibujo para entender la nomenclatura utilizada en la toma de resultados de los ensayos de dureza realizados [Fuente propia]	102
Figura 79.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]	104
Figura 80.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]	105
Figura 81.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]	107
Figura 82.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]	108
Figura 83.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]	110
Figura 84.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]	111
Figura 85.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]	113
Figura 86.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]	114
Figura 87.- Probetas enviadas al laboratorio del SCAI para el ensayo metalográfico [Fuente propia]	117
Figura 88.- Imágenes microscópicas de la estructura interna de la probeta SS1 [38].	118
Figura 89.- Imágenes microscópicas de la estructura interna de la probeta A22 [38].	120
Figura 90.- Imágenes microscópicas de la estructura interna de la probeta H135 [38].	122
Figura 91.- Imágenes microscópicas de la estructura interna de la probeta INC2 [38].	124
Figura 92.- Detalle de la superficie de impresión de: a) una probeta plana y b) una probeta de canto. [Fuente propia].	132
Figura 93.- Ficha técnica del acero inoxidable 17-4PH empleado para la fabricación de las probetas [6]	2
Figura 94.- Ficha técnica del acero A2 empleado para la fabricación de las probetas [6]	3
Figura 95.- Ficha técnica del acero H13 empleado para la fabricación de las probetas [6].	4
Figura 96.- Ficha técnica del Inconel 625 empleado para la fabricación de las probetas [6]	5
Figura 97.- Ficha técnica de la impresora Metal X [6]	6

Figura 98.- Ficha técnica de la estación de lavado Wash-1 [6]	7
Figura 99.- Ficha técnica del horno de sinterizado Sinter-1 [6].....	8
Figura 100.- Descripción máquina de ensayos Servosis MUE 403 [31].	9
Figura 101.- Ficha técnica de la máquina Servosis modelo 403 con diferentes configuraciones [31]	10
Figura 102.- Información relacionada con el software empleado PCD 2K de Servosis [33]	11
Figura 103.- Ficha técnica del extensómetro Epsilon 3542 [32]	12

Índice de tablas

Tabla 1.- Composición química del acero inoxidable 17-4PH [A1.1.1].....	25
Tabla 2.- Composición química del acero para herramientas A2 [A1.1.2]	26
Tabla 3.- Composición química del acero para herramientas H13 [A1.1.3]	27
Tabla 4.- Composición química del Inconel 625 [A1.1.4].....	28
Tabla 5.- Dimensiones de referencia para probetas a partir de productos planos [26]	35
Tabla 6.- Parámetros principales del dimensionamiento del modelo 1	36
Tabla 7.- Parámetros principales del dimensionamiento del modelo 2	38
Tabla 8.- Parámetros del modelo 3 diseñado	39
Tabla 9.- Dimensiones de la probeta obtenidas en SolidWorks en mm	41
Tabla 10.- Parámetros de impresión elegidos para todos los materiales	42
Tabla 11.- Tabla resumen del tiempo y coste de fabricación de una probeta de cada material empleado	47
Tabla 12.- Características técnicas principales de la máquina de ensayos Servosis MUE 403/65 [A1.3.1]	50
Tabla 13.- Características técnicas del extensómetro utilizado en los ensayos [A1.3.3].....	51
Tabla 14.- Parámetros de ensayos seleccionados.....	53
Tabla 15.- Valores característicos calculados para las probetas planas de 17-4PH.....	64
Tabla 16.- Valores característicos calculados para las probetas de canto de 17-4PH.....	64
Tabla 17.- Valores teóricos de los parámetros a tener según Markforged y el teórico según otro fabricante para el mismo material, pero no en AM [34]	64
Tabla 18.- Variación de los valores experimentales de E obtenidos en relación a los valores teóricos	67
Tabla 19.- Variación de los valores experimentales de Rp obtenidos en relación a los valores teóricos	68
Tabla 20.- Variación de los valores experimentales de Rm obtenidos en relación a los valores teóricos	69
Tabla 21.- Variación de los valores experimentales de Ru obtenidos entre pares de probetas.....	69
Tabla 22.- Variación de los valores experimentales de A obtenidos en relación a los valores teóricos	70
Tabla 23.- Valores característicos calculados para las probetas planas de A2	72
Tabla 24.- Valores característicos calculados para las probetas de canto de A2	72

Tabla 25.- Valores teóricos de los parámetros a tener según Markforged y el teórico según otro fabricante para el mismo material, pero no en AM [35]	72
Tabla 26.- Variación de los valores experimentales de E obtenidos en relación a los valores teóricos	76
Tabla 27.- Variación de los valores experimentales de Rp obtenidos en relación a los valores teóricos	76
Tabla 28.- Variación de los valores experimentales de Rm obtenidos en relación a los valores teóricos	77
Tabla 29.- Variación de los valores experimentales de Ru obtenidos entre pares de probetas.....	78
Tabla 30.- Variación de los valores experimentales de A obtenidos entre pares de probetas	78
Tabla 31.- Valores característicos calculados para las probetas planas de H13	80
Tabla 32.- Valores característicos calculados para las probetas de canto de H13	81
Tabla 33.- Valores teóricos de los parámetros a tener según Markforged y el teórico según otro fabricante para el mismo material, pero no en AM [36]	81
Tabla 34.- Variación de los valores experimentales de E obtenidos en relación a los valores teóricos	84
Tabla 35.- Variación de los valores experimentales de Rp obtenidos en relación a los valores teóricos	85
Tabla 36.- Variación de los valores experimentales de Rm obtenidos en relación a los valores teóricos	85
Tabla 37.- Variación de los valores experimentales de Ru obtenidos entre pares de probetas.....	86
Tabla 38.- Variación de los valores experimentales de A obtenidos en relación a los valores teóricos	86
Tabla 39.- Valores característicos calculados para las probetas planas de INC 625	89
Tabla 40.- Valores característicos calculados para las probetas planas de INC 625	89
Tabla 41.- Valores teóricos de los parámetros a tener según Markforged y el teórico según otro fabricante para el mismo material, pero no en AM [37]	89
Tabla 42.- Variación de los valores experimentales de E obtenidos en relación a los valores teóricos	92
Tabla 43.- Variación de los valores experimentales de Rp obtenidos en relación a los valores teóricos	93
Tabla 44.- Variación de los valores experimentales de Rm obtenidos en relación a los valores teóricos	94

Tabla 45.- Variación de los valores experimentales de Ru obtenidos entre pares de probetas.....	94
Tabla 46.- Variación de los valores experimentales de A obtenidos en relación a los valores teóricos	95
Tabla 47.- Valores medios obtenidos para cada material y orientación	96
Tabla 48.- Variación del promedio obtenido de las probetas ensayadas por orientación entre los diferentes materiales empleados para E	98
Tabla 49.- Variación del promedio obtenido de las probetas ensayadas por orientación entre los diferentes materiales empleados para Rp.....	99
Tabla 50.- Variación del promedio obtenido de las probetas ensayadas por orientación entre los diferentes materiales empleados para Rm.....	99
Tabla 51.- Variación del promedio obtenido de las probetas ensayadas por orientación entre los diferentes materiales empleados para Ru.....	99
Tabla 52.- Variación del promedio obtenido de las probetas ensayadas por orientación entre los diferentes materiales empleados para A.....	100
Tabla 53. - Valores teóricos de dureza estimados según el fabricante para las probetas ensayadas [6]	103
Tabla 54.- Valores obtenidos del ensayo de dureza de las probetas de acero inoxidable 17-4PH ..	103
Tabla 55.- Valores obtenidos del ensayo de dureza de las probetas de acero de herramientas A2 .	106
Tabla 56.- Valores obtenidos del ensayo de dureza de las probetas de acero de herramientas H13	109
Tabla 57.- Valores obtenidos del ensayo de dureza de las probetas de Inconel 625	112
Tabla 58.- Medias de la dureza HRC medida en las probetas de 17-4PH	131
Tabla 59.- Medias de la dureza HRC medida en las probetas de A2.....	133
Tabla 60.- Medias de la dureza HRC medida en las probetas de H13.....	134
Tabla 61.- Medias de la dureza HRC medida en las probetas de Inconel 625.....	135

Glosario

Abreviatura	Unidad	Designación
e / a_0	mm	Espesor inicial de una probeta
b / b_0	mm	Anchura inicial de la parte calibrada
$L_0 / L_{omarcas}$	mm	Longitud inicial entre puntos o marcas
L_c	mm	Longitud calibrada
L_e	mm	Longitud base del extensómetro $L_c = L_e$
L_{t0}	mm	Longitud total inicial de la probeta
L_{tf}	mm	Longitud total final de la probeta
$L_{fmarcas}$	mm	Longitud final entre marcas o puntos
h	mm	Longitud de la parte paralela para las mordazas
B	mm	Ancho de la parte paralela para las mordazas
r	mm	Radio de acuerdo
K	---	Coefficiente de proporcionalidad para el dimensionamiento de la probeta
A_0	mm ²	Sección transversal inicial de la probeta
A_f	mm ²	Sección transversal final de la probeta
F	N	Fuerza aplicada
F_e	N	Fuerza aplicada sobre el punto de estudio
F_{max}	N	Fuerza máxima
F_u	N	Fuerza última de rotura
σ	N/mm ²	Tensión
ε	---	Deformación unitaria
E	GPa	Módulo elástico
R_p	MPa	Límite de fluencia

R_m	MPa	Resistencia a la tracción
R_u	MPa	Límite de rotura.
A	%	Alargamiento a la rotura.

ESTA PÁGINA HA SIDO DEJADA EN
BLANCO DE FORMA INTENCIONADA

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Objetivo

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster (en adelante, TFM) es el estudio del comportamiento mecánico a tracción de materiales metálicos obtenidos por procesos de fabricación aditiva (en adelante, AM por sus siglas en inglés) mediante tecnología de extrusión por deposición de hilo fundido (FFF/FDM). Dicho estudio se llevará a cabo a partir de la realización de ensayos de tracción sobre probetas de diferentes materiales, diseñadas de acuerdo a la normativa vigente para materiales metálicos. Adicionalmente, el estudio se completará con un análisis metalográfico y de medición de la dureza de las probetas fabricadas.

Los resultados de estos ensayos darán una visión detallada de cómo esta tipología de proceso de fabricación aditiva afecta a las propiedades mecánicas finales de los materiales metálicos ensayados. La meta final es optimizar la selección y el uso de estos materiales en una variedad de aplicaciones industriales tanto, convencionales como innovadoras. Esta búsqueda contribuirá al avance del conocimiento en el campo de la fabricación aditiva y su uso real en multitud de sectores industriales de gran importancia.

1.2.- Antecedentes y alcance

Durante un largo periodo de tiempo, una gran cantidad de materiales, ya sean metálicos o no metálicos, han sido objeto de diversos ensayos para valorar sus características mecánicas. Dentro de estos ensayos, el ensayo de tracción es un método esencial en la ingeniería y la ciencia de materiales para entender el comportamiento de los materiales ante fuerzas de tracción, el cual consiste básicamente en situar una muestra o probeta del material que se quiere ensayar en una máquina adecuada para realizar el ensayo y ejercer una fuerza de tracción gradual y regulada en la pieza ensayada. En el ensayo, se documenta la correlación entre la carga aplicada y el desplazamiento producido en el material. Luego de analizar los resultados logrados, se extrae información relevante acerca de las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural de los materiales, lo cual resulta crucial para el diseño y la elección de materiales en una extensa variedad de usos industriales.

Por otro lado, la fabricación aditiva es un proceso de fabricación innovador, cuyo constante desarrollo lo ha situado en una posición estratégica en la evolución de los sistemas de fabricación. Su capacidad para producir piezas con geometrías complejas, de alta precisión, con diseños personalizados o bajo demanda, le ha posicionado en una situación de clara ventaja respecto a procesos tradicionales, sustractivos o de conformado, adquiriendo especial relevancia en sectores como la medicina, el sector aeroespacial, la industria de automoción e, incluso, la fabricación de bienes de consumo.

Asimismo, como cualquier proceso de fabricación, la fabricación aditiva influye en las propiedades finales de la pieza obtenidas, fundamentalmente debido a las características propias del material y a los parámetros que rigen el proceso, y que son propios de la tecnología específica empleada. En este contexto, estudiar las propiedades obtenidas en el material procesado es crucial para optimizar el diseño y garantizar el rendimiento en servicio de dicho material, de acuerdo a los requisitos establecidos.

Por tanto, en este trabajo se pretende unificar ambos campos: la fabricación aditiva, en este caso de probetas metálicas, y el análisis de sus correspondientes propiedades mecánicas a través de ensayos de tracción. La meta principal es emplear técnicas avanzadas de fabricación aditiva para producir muestras metálicas con geometrías específicas y apropiadas para los ensayos que se van a realizar, y posteriormente someterlas a pruebas de tracción para evaluar su comportamiento.

El valor de este trabajo reside en su capacidad para mejorar nuestra comprensión de cómo la fabricación aditiva influye en las propiedades mecánicas de los materiales metálicos, lo que conlleva consecuencias significativas en la optimización de procesos industriales y en el diseño de componentes más eficientes y confiables.

1.3.- Definiciones

A continuación, se van a introducir una serie de definiciones, las cuales han sido recogidas de las referencias UNE EN-ISO 6892-1:2020 [1] y UNE-EN ISO 377:2017 [2], para entender mejor los principales términos con los que se va a trabajar en el presente trabajo.

- **Probeta o Muestra:** espécimen diseñado específicamente para ser utilizado en ensayos o pruebas de laboratorio con el propósito de evaluar las propiedades mecánicas, físicas, químicas o funcionales de un material. Las probetas se seleccionan y preparan de manera que sean representativas del material o componente que se está estudiando.
- **Longitud entre puntos, L (mm):** Longitud de la parte cilíndrica o prismática de la probeta sobre la que se mide el alargamiento en cualquier momento durante el ensayo.
- **Espesor, e/a_0 (mm):** Dimensión inicial menor de la sección transversal rectangular en la parte central de una probeta.
- **Anchura, b/b_0 (mm):** Dimensión inicial mayor de la sección transversal rectangular en la parte central de una probeta.
- **Sección transversal, A (mm²):** Producto del espesor y la anchura iniciales de una probeta.
- **Longitud inicial entre puntos, $L_0/L_{omarcas}$ (mm):** Se define esta longitud como la distancia entre dos puntos equidistantes y calculados matemáticamente en función del espesor medio y la anchura media de la probeta a ensayar. Es un valor característico y diferente de cada probeta.
- **Longitud final entre puntos después de la rotura, $L_{fmarcas}$ (mm):** Longitud entre marcas situadas sobre la probeta, a temperatura ambiente, y tras unir cuidadosamente las dos partes de la probeta de forma que sus ejes estén alineados.
- **Longitud calibrada, L_c (mm):** Longitud de la parte calibrada de la probeta que presenta una sección más reducida y comprende la distancia entre los radios de acuerdo de la probeta. Para este trabajo la longitud calibrada va a ser la misma que la longitud del extensómetro [L_e].

- **Longitud del extensómetro, L_e (mm)**: Longitud base inicial del extensómetro que se utiliza para la medición de la extensión. Para este trabajo se ha definido que siempre va a ser de valor $L_e = 50$ mm.
- **Fuerza aplicada, F (N)**: Tensión que se aplica durante el ensayo.
- **Esfuerzo, σ (N)**: Fuerza perpendicular por unidad de superficie de la sección transversal inicial en la longitud de referencia.
- **Deformación unitaria, ε (%)**: Incremento de la longitud por unidad de longitud inicial de la longitud de referencia.
- **Rotura**: Fenómeno que ocurre cuando se produce la separación total de la probeta en dos partes.
- **Esfuerzo de tracción (MPa)**: También conocido como tensión, es una medida de la fuerza por unidad de área aplicada a un material que tiende a estirarlo o alargarlo. Se define como la fuerza aplicada dividida por el área transversal original de la muestra.
- **Módulo elástico o de Young, E (GPa)**: Propiedad mecánica fundamental de los materiales que describe su capacidad para resistir la deformación elástica bajo la acción de una fuerza aplicada. Se suele definir matemáticamente como la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica de un material, es decir, la relación entre el esfuerzo $[\sigma]$ y la deformación unitaria $[\varepsilon]$ en la zona donde el material se comporta de manera reversible. Su expresión de cálculo es:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [GPa]}$$

- **Límite de fluencia, R_p (MPa)**: El límite de fluencia es el valor del esfuerzo a partir del cual un material comienza a experimentar deformación plástica, es decir, una deformación permanente que no se recupera al retirar la carga aplicada. En un ensayo de tracción, el límite de fluencia se observa como el punto de la curva esfuerzo-deformación donde el material deja de comportarse de manera elástica y comienza a presentar deformación irreversible. Para su cálculo se emplea la siguiente fórmula:

$$R_p = \frac{F_e}{A_0} \text{ [MPa]}$$

- **Resistencia a la tracción, R_m (MPa)**: es la máxima tensión que un material puede soportar antes de romperse cuando se somete a una carga de tracción. Su expresión de cálculo es:

$$R_m = \frac{F_{max}}{A_0} \text{ [MPa]}$$

- **Límite de rotura o punto de rotura, R_u (MPa)**: es la tensión máxima que un material puede soportar justo antes de fracturarse bajo una carga aplicada. Se utiliza la siguiente formulación para su obtención:

$$R_u = \frac{F_u}{A_f} \text{ [MPa]}$$

- **Alargamiento de rotura, A (%)**: También conocido como elongación a la rotura o elongación antes de la fractura, es una medida de la deformación que experimenta un material antes de fracturarse bajo una carga de tracción. Se define como el aumento porcentual en la longitud original [L_0] de una muestra de material antes de que se produzca su fractura. Su expresión de cálculo es:

$$A = \frac{L_f - L_{omarcas}}{L_f} [\%]$$

- **Velocidad de ensayo (mm/min)**: Velocidad a la que la máquina de ensayos desplaza las mordazas que sujetan la probeta.

2.- ESTADO DEL ARTE

Antes de comenzar a explicar la metodología seguida tanto para el diseño de las probetas como con los aspectos relacionados con los ensayos de tracción, se van a incidir un poco más en explicar y comentar dos de los aspectos más esenciales de este trabajo: La fabricación aditiva y el ensayo de tracción.

2.1.- Fabricación aditiva

2.1.1.- Concepto de fabricación aditiva

La fabricación aditiva, también conocida como AM o impresión 3D, es un proceso innovador de fabricación que permite construir objetos tridimensionales mediante la adición de material capa por capa. A diferencia de los métodos tradicionales de fabricación, donde se sustrae material de una pieza inicial, la fabricación aditiva crea objetos al agregar material de forma controlada.

El proceso de fabricación aditiva se lleva a cabo de la siguiente manera (Figura 1):

1. **Modelado digital:** Se comienza con la creación de un modelo digital tridimensional (3D) del objeto que se desea fabricar. Este modelo se puede diseñar utilizando software de modelado 3D o mediante escaneo de objetos físicos existentes. El modelo digital se divide en capas finas (slices) horizontales, cada una de las cuales representa una sección transversal del objeto final.
2. **Fabricación:** La máquina de fabricación aditiva construye el objeto capa por capa, siguiendo las instrucciones del modelo digital. Esto se logra mediante la deposición precisa de material, que puede ser plástico, metal, cerámica, resina u otros materiales, según el tipo de tecnología de impresión 3D utilizada.
3. **Sinterizado/solidificación/curado:** Según el proceso de fabricación aditiva, por ejemplo, fabricación por resinas, después de depositar cada capa de material, se solidifica o se cura para adherirse a la capa anterior. Esto puede lograrse mediante el uso de luz UV, calor, o productos químicos según el tipo de material utilizado. En este trabajo se van a emplear técnicas de sinterizado para concluir con la fabricación de las piezas a ensayar.

- Entre las técnicas que forman parte de esta tecnología cabe destacar: MJF, SLS, DMLS/SLM y EBM.

3.- **Inyección de aglutinante** (en inglés, **Binder Jetting BJ**): Funciona aplicando un agente aglutinante líquido sobre capas sucesivas de polvo (metal, cerámica, arena, etc.) para unir las partículas. Una vez impresa, la pieza se suele sinterizar en horno para ganar resistencia. Las ventajas de usar este tipo de tecnología son:

- Permite impresión a color, incluso la combinación de varios colores en una misma pieza.
- Muy productiva, adecuada para fabricar muchas piezas a la vez.
- Compatible con una amplia gama de materiales.

4.- **Inyección de material** (en inglés, **Material Jetting MJ**): Similar a una impresora de tinta, esta tecnología deposita gotas de material líquido capa por capa, que luego se solidifican mediante luz ultravioleta o enfriamiento. Se pueden usar diferentes materiales al mismo tiempo. Entre sus fortalezas caben destacar:

- Se obtiene un alto nivel de precisión en las piezas fabricadas, con buena calidad de detalle.
- Permite fabricar piezas a todo color.
- Se pueden utilizar múltiples materiales en una misma pieza.
- Entre las técnicas que se utilizan dentro de este grupo están: MJ, NPJ y DOD.

5.- **Laminación de hojas** (en inglés, **Sheet Lamination LOM**): Se basa en superponer y unir láminas finas de material (papel, plástico o metal), utilizando adhesivos, calor o soldadura. Las formas se recortan capa por capa hasta formar el objeto final. Entre las ventajas de utilizar este tipo de tecnología se encuentran:

- Permite fabricar un gran volumen de piezas a la vez.
- Los costos de fabricación son relativamente bajos en casi todos los tipos de materiales, principalmente con polímeros.
- Permite las combinaciones de varios materiales metálicos.

6.- **Deposición directa de energía** (en inglés, **Direct Energy Deposition DED**): Consiste en depositar polvo o hilo metálico mientras una fuente de energía (láser, plasma o haz de electrones) lo funde al instante sobre una superficie. Se puede añadir material en cualquier dirección, incluso sobre piezas ya existentes. Entre las fortalezas de este tipo de tecnología se encuentran:

- Efectivo para reparaciones o adiciones en piezas existentes.
- Gran libertad geométrica (sin restricciones de eje o dirección)
- Se pueden utilizar múltiples materiales en una única pieza.
- Dentro de este grupo se encuentran las técnicas LENS y EBAM.

7.- **Extrusión de material** (en inglés, **Material extrusion FDM/FFF**): La extrusión de material es una de las tecnologías más conocidas y extendidas dentro de la fabricación aditiva. Consiste en calentar y extruir un material en forma de filamento (generalmente termoplásticos, aunque también

existen variantes con metales y cerámicas) a través de una boquilla caliente que se mueve de forma controlada para depositar el material capa por capa sobre una plataforma. A medida que el material se enfría, se solidifica, permitiendo así construir el objeto tridimensional. Este proceso es aditivo, ya que el objeto se forma añadiendo sucesivas capas de material, que se van apilando siguiendo un patrón definido por un modelo CAD (Diseño Asistido por Computadora). Las ventajas principales de emplear este tipo de tecnología son las siguientes:

- Económica y accesible: Las impresoras de extrusión son de bajo coste comparado con otras tecnologías, lo que la hace ideal para uso educativo, hobby o prototipado rápido.
- Versatilidad de materiales: Puede trabajar con diversos termoplásticos como PLA, ABS, PETG, TPU, así como materiales compuestos (plásticos con fibras de carbono o vidrio), y existen desarrollos para imprimir metal o cerámica usando filamentos especiales.
- Facilidad de uso y mantenimiento: El proceso es sencillo, lo que lo hace ideal para quienes se inician en la impresión 3D.
- Buenas propiedades estructurales: Aunque no alcanza la precisión o el acabado de otras tecnologías (como la fotopolimerización), permite crear piezas funcionales y resistentes, incluso con geometrías complejas.

No obstante, entre las limitaciones a considerar hay que indicar las siguientes:

- Acabado superficial más rugoso que otras tecnologías como SLA o Material Jetting.
- Menor precisión dimensional y resolución en detalles finos.
- Puede requerir estructuras de soporte para voladizos complejos, que deben ser retiradas tras la impresión.

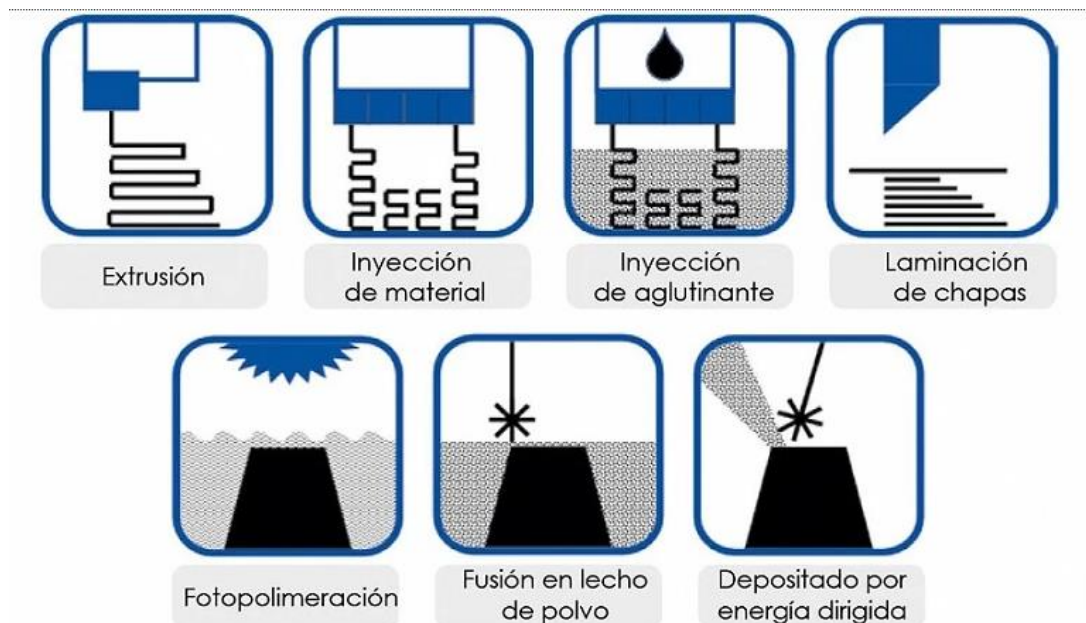


Figura 2.- Las 7 tecnologías de fabricación aditiva más importantes [5]

En el presente trabajo, la tecnología de extrusión de material FFF/FDM ha sido seleccionada como el método de fabricación aditiva para la producción de las piezas metálicas objeto de estudio. Esta elección responde tanto a la accesibilidad y versatilidad del proceso como a su creciente relevancia

en el ámbito de la fabricación de componentes metálicos ya que se considera una alternativa eficiente, reproducible y accesible para la fabricación de piezas metálicas complejas, siendo especialmente adecuada para entornos de investigación, desarrollo de prototipos funcionales y validación de comportamiento mecánico.

2.1.3.- Materiales empleados en fabricación aditiva

Los materiales empleados en AM abarcan una amplia variedad, desde plásticos y metales hasta cerámicos y compuestos, cada uno con propiedades y aplicaciones específicas. La selección del material es crucial para garantizar que las piezas impresas cumplan con los requisitos mecánicos, funcionales y estéticos deseados. A continuación, se describen los principales tipos de materiales utilizados en esta tecnología.

Los materiales plásticos en AM se dividen en termoplásticos y termoestables. Los termoplásticos, como ABS y PLA, pueden fundirse y solidificarse repetidamente, facilitando su reciclaje, mientras que los termoestables, empleados en SLA, se curan con luz o calor y no pueden volver a fundirse.

Los materiales cerámicos se aplican en sectores como aeroespacial, biomédico y electrónico debido a su resistencia térmica, dureza y estabilidad química. Incluyen óxidos (alúmina, circonia), carburos y nitruros (SiC, Si₃N₄), y biocerámicos (hidroxiapatita, fosfato de calcio). Se procesan mediante SLA con resinas cerámicas, Binder Jetting, FDM con pastas cerámicas y SLS, permitiendo la fabricación de implantes médicos, aislantes eléctricos y piezas resistentes al calor.

Los materiales compuestos combinan polímeros con fibras o partículas para mejorar sus propiedades mecánicas y funcionales. En FDM, plásticos reforzados con fibras de carbono, vidrio o kevlar aumentan la resistencia y rigidez. En SLS, los polvos compuestos mejoran la durabilidad, mientras que en SLA, resinas con cerámicas o metales permiten piezas más resistentes y precisas. Su uso es clave en sectores como aeroespacial, automoción y medicina, donde se requieren piezas ligeras y duraderas.

Los materiales metálicos utilizados en fabricación aditiva incluyen acero inoxidable, titanio, aluminio, cobre y aleaciones de níquel, entre otros, siendo fundamentales en sectores como la industria aeroespacial, médica y automotriz. Tecnologías como la fusión selectiva por láser (SLM) y la sinterización directa de metal por láser (DMLS) permiten obtener piezas de alta resistencia mediante la fusión de polvos metálicos capa a capa. Por su parte, técnicas como Binder Jetting y Direct Energy Deposition (DED) posibilitan la fabricación eficiente de componentes de gran volumen. En los últimos años, los procesos de extrusión como Fused Filament Fabrication (FFF) o Fused Deposition Modeling (FDM) han comenzado a ganar relevancia en el ámbito de los metales. Estos métodos, inicialmente desarrollados para polímeros, han sido adaptados para extruir filamentos metálicos compuestos, que posteriormente son sometidos a procesos de desaglomerado y sinterizado, ofreciendo una alternativa más accesible y versátil para la fabricación de piezas metálicas con buenas propiedades mecánicas. Cada metal aporta características particulares: el acero inoxidable se valora por su resistencia a la corrosión, el titanio por su ligereza y biocompatibilidad, el aluminio por su baja densidad y buena conductividad, el cobre por su excelente conductividad térmica y eléctrica, y las aleaciones de níquel por su comportamiento en entornos de altas temperaturas.

En definitiva, la elección del material en AM debe basarse en los requisitos específicos de la pieza a fabricar. Factores como resistencia a la tracción, módulo de flexión, alargamiento, resistencia al impacto y temperatura de flexión bajo carga son determinantes para seleccionar el material adecuado según la aplicación deseada.

2.1.4.- Diferencias entre la fabricación aditiva de materiales metálicos y plásticos

La fabricación aditiva ha evolucionado significativamente desde su origen, convirtiéndose en una tecnología capaz de fabricar piezas funcionales con propiedades mecánicas competitivas. Si bien los polímeros termoplásticos y las resinas han sido históricamente los materiales más empleados debido a su bajo coste, facilidad de procesamiento y amplio rango de aplicaciones, el uso de metales en fabricación aditiva ha aumentado de forma notable en los últimos años, motivado por la necesidad de componentes de alto rendimiento estructural en sectores como la automoción, la aeronáutica, la energía, etc.

En este contexto, resulta fundamental establecer una comparativa entre las principales características técnicas de ambos grupos de materiales cuando se emplean en procesos de fabricación aditiva, atendiendo a su comportamiento térmico, mecánico, económico y de procesado.

1. Procesos de Fabricación Aditiva

Fabricación Aditiva de Metales: Los procesos más extendidos para metales incluyen Powder Bed Fusion (PBF) mediante láser (SLM, DMLS) o haz de electrones (EBM), Directed Energy Deposition (DED) o los procesos de Fused Filament Fabrication (FFF) o Fused Deposition Modeling (FDM). Estos métodos emplean una fuente de energía altamente concentrada para fundir polvo metálico capa a capa, lo que exige temperaturas de trabajo superiores a los 1000 °C dependiendo del material. Estas condiciones térmicas requieren:

- Ambientes controlados (inertes o de vacío) para evitar oxidaciones y otros defectos metalúrgicos.
- Sistemas de refrigeración y extracción de calor eficientes, debido al gradiente térmico elevado que puede inducir tensiones residuales.
- Equipos de precisión y cámaras cerradas con control térmico y atmosférico

Fabricación Aditiva de Plástico: Los polímeros se procesan a temperaturas mucho más bajas (habitualmente entre 180 °C y 260 °C para termoplásticos comunes como PLA o ABS) mediante tecnologías como FDM/FFF, SLA o SLS. Estos procesos requieren:

- No requieren atmósferas inertes (excepto para algunos polímeros técnicos).
- Tienen una huella térmica más reducida.
- Son compatibles con equipamiento menos costoso y más compacto.

2. Materiales Utilizados

Metales: Se emplean principalmente aleaciones con propiedades mecánicas avanzadas, como:

- Titanio: excelente relación resistencia/peso, biocompatibilidad.
- Acero inoxidable: buena tenacidad y resistencia a la corrosión.

- Aleaciones de aluminio: elevada conductividad térmica y bajo peso.
- Aleaciones de níquel: resistencia a altas temperaturas, ideal para turbinas.

Estos materiales deben presentar: Buena fluidez en estado fundido, compatibilidad con tratamientos térmicos posteriores además de alta resistencia a la fatiga y al desgaste, en función de su aplicación final.

Plásticos: Los materiales más comunes incluyen:

- PLA, ABS, PETG: termoplásticos de uso general con buena facilidad de impresión.
- Nylon: elevada resistencia a la fatiga y bajo coeficiente de fricción.
- TPU: polímero flexible y resistente a la abrasión.
- Resinas epoxi (para SLA): permiten obtener alta resolución superficial y rigidez.

Aunque sus propiedades mecánicas son limitadas frente a los metales, su bajo módulo de elasticidad y menor densidad los hacen adecuados para aplicaciones donde se requiera flexibilidad, ligereza o absorción de impactos.

3. Propiedades Mecánicas de los Productos Finales

Metales: Las piezas metálicas obtenidas mediante AM pueden alcanzar propiedades comparables o incluso superiores a las de piezas fabricadas mediante mecanizado o fundición, gracias al control localizado de la microestructura. Entre las propiedades características de los materiales se encuentra, de forma generalizada:

- Resistencia a tracción: Entre 800 y 1000+ MPa, según el tipo de aleación y tratamiento térmico (ej. acero 17-4PH).
- Dureza: Entre 35 y 60 HRC, especialmente elevada tras tratamientos térmicos (ej. acero H13).
- Resistencia a fatiga: Buena, siempre que se controle la porosidad interna y la orientación de capas.
- Módulo de elasticidad (rigidez): Entre 100 y 210 GPa, dependiendo del material (acero, Inconel, titanio).

Por otro lado, entre las principales limitaciones se encuentran las siguientes:

- Densidad: Alta, en torno a 7–8 g/cm³, lo que puede incrementar el peso en diseños no optimizados.
- Coste de producción: Elevado, debido al precio del material, la energía y los procesos postimpresión.

Plásticos: Las piezas poliméricas son adecuadas para componentes no estructurales, prototipos, carcasas y productos de bajo esfuerzo. Entre las propiedades típicas de los materiales poliméricos hay que destacar, de forma generalizada:

- Resistencia a tracción entre 30–70 MPa (PLA/ABS).
- Módulo de elasticidad bajo (2–4 GPa).

- Mayor flexibilidad, ideal para uniones deformables o zonas de absorción de energía.
- Baja densidad ($1-1.4 \text{ g/cm}^3$), lo que favorece la ligereza del componente.

Por otro lado, respecto a sus limitaciones hay que destacar:

- Menor estabilidad térmica y resistencia química.
- Mayor susceptibilidad al envejecimiento ambiental.

4. Costes y Complejidad Operativa

Metales: La fabricación aditiva con metales implica un coste elevado tanto en materiales como en equipamiento. Los polvos metálicos deben cumplir requisitos estrictos de pureza y forma, lo que incrementa su precio considerablemente. Además, las máquinas (como SLM o EBM) requieren inversiones iniciales muy altas, ya que operan con fuentes láser o de electrones, atmósferas controladas y sistemas de seguridad avanzados. A esto se suma la necesidad de postprocesos complejos (tratamientos térmicos, mecanizado, pulido), lo que exige recursos técnicos y personal especializado.

Plásticos: La fabricación con plásticos es, de forma general, mucho más accesible. Los materiales termoplásticos como PLA o ABS son económicos, y las impresoras FDM o SLA pueden adquirirse a precios bajos, incluso para uso doméstico o educativo. El manejo de estas tecnologías es sencillo y no requiere condiciones especiales de seguridad ni instalaciones complejas. Además, los postprocesos son mínimos y fáciles de realizar.

En resumen, mientras que la fabricación aditiva con metales ofrece buenas prestaciones en términos de resistencia, rigidez y funcionalidad estructural en comparación con otros procesos de fabricación convencionales, esto conlleva un aumento significativo en los costes y la complejidad operativa. Por el contrario, la fabricación aditiva con materiales plásticos permite facilitar el acceso a la fabricación aditiva, reduciendo la inversión y facilitando su integración en entornos educativos, de diseño o prototipado rápido. Esta diferencia resulta clave en la elección tecnológica para proyectos donde el equilibrio entre coste, viabilidad técnica y requisitos mecánicos sea determinante.

En este trabajo se emplearán materiales metálicos utilizando el proceso de Deposición Fundida por Filamento (FDM/FFF), una tecnología tradicionalmente aplicada a termoplásticos pero que, mediante filamentos compuestos con polvo metálico y aglutinante polimérico, permite también la fabricación de piezas metálicas. Tras la impresión, las piezas requieren un proceso de lavado químico y sinterizado para eliminar la matriz y consolidar las partículas metálicas. Esta opción ofrece una solución más accesible y económica frente a otras tecnologías de fabricación aditiva metálica, como SLM o DED, siendo especialmente adecuada para prototipado funcional y entornos de investigación.

2.1.5.- Equipos comúnmente utilizados

Para llevar a cabo un proceso de fabricación por tecnología de AM se necesita emplear, en la mayoría de los procesos, una serie de equipos y/o herramientas necesarias para el diseño, manipulación y postprocesamiento del producto final obtenido. Los equipos más utilizados son los siguientes:

- **Impresoras 3D.** Es el equipo principal, la cual se encuentra diferenciada en función de la tecnología de fabricación empleada (FDM, SLA, SLS, etc.)
- **Software de modelado CAD.** Son programas que se utilizan para diseñar y preparar los modelos 3D para la impresión. Se emplean programas como SolidWorks, Ultimaker Cura, etc.
- **Equipos de postprocesado.** Incluyen hornos de sinterización, cámaras UV, lijadoras, etc.

2.1.6.- Equipo y software de impresión 3D utilizado en el trabajo

Para la fabricación de las probetas diseñadas, se va a emplear el siguiente equipo presente en el laboratorio de la Escuela de Ingenierías Industriales: *Equipo de Fabricación Aditiva Metal X de Markforged compuesto de Impresora 3D Metal X, Estación de lavado Wash-1 y Horno de Sinterizado Sinter-1* [6].

Impresora 3D Metal X

La impresora (Figura 3) es un dispositivo que emplea un proceso llamado Fabricación Aditiva de Filamento Compuesto (CFF) para crear componentes metálicos. Se generan objetos tridimensionales a partir de un filamento compuesto por material metálico y aglutinante.



Figura 3.- Impresora Metal X [Fuente propia]

Estación de lavado Wash-1

En la estación de lavado Wash-1 (Figura 4) la pieza impresa es sometida a un proceso de lavado químico, al objeto de eliminar la mayor parte del aglutinante que contenía el filamento de partida. Una vez reducido el peso en el porcentaje requerido (específico para cada material), la pieza queda en condiciones de ser sometida a la última etapa del proceso.



Figura 4.- Estación de lavado Wash-1 [Fuente propia]

Horno de sinterizado Sinter-1

El horno de sinterizado Sinter-1 (Figura 5) es un elemento clave en el proceso de fabricación aditiva que utiliza la tecnología de deposición de filamento compuesto para metales, como la proporcionada por Markforged. Este horno ha sido creado específicamente para el tratamiento térmico de componentes impresos en AM, con la finalidad de unir las partículas de polvo metálico y formar una estructura densa y sólida.



Figura 5.- Horno de sinterizado Sinter-1 [Fuente propia]

El procedimiento de sinterización en el horno Sinter-1 es crucial para transformar las piezas fabricadas en AM en componentes metálicos robustos y duraderos, con características mecánicas adecuadas para demandas industriales y de ingeniería rigurosas. La exactitud en el ajuste de los parámetros de sinterización y la supervisión del ciclo térmico son esenciales para asegurar la calidad y la integridad de las piezas finales.

Software de impresión 3D

Al emplear la impresora Metal X, para realizar la impresión de las piezas se va a tener que emplear el software genérico de la impresora, el denominado **EIGER** (Figura 6). El software Eiger, desarrollado por Markforged, es una plataforma integral diseñada específicamente para la preparación y gestión de impresiones 3D en las impresoras industriales de la marca. Eiger ofrece diversas funcionalidades y herramientas que facilitan todo el proceso de impresión, desde la preparación del modelo hasta el control del flujo de trabajo.

Las funcionalidades principales del software son las siguientes:

1. Preparación de Modelos 3D:

- Eiger permite importar modelos 3D en diversos formatos estándar, como STL u OBJ.
- Los usuarios pueden realizar ajustes en la orientación, el tamaño y la posición del modelo en la plataforma de impresión.

2. Configuración de Parámetros de Impresión:

- Permite ajustar una amplia gama de parámetros de impresión, incluidos la densidad del relleno, el tipo de soporte, la velocidad de impresión y la temperatura del extrusor.
- Proporciona opciones avanzadas para optimizar la calidad y la resistencia de las piezas impresas.

3. Generación de Gcode:

- Convierte el modelo 3D preparado en instrucciones de impresión (Gcode) entendibles por la impresora.
- Permite visualizar capas individuales y patrones de impresión para garantizar una impresión precisa y eficiente.

4. Visualización y Simulación:

- Ofrece una vista previa detallada del proceso de impresión, incluidas las capas de soporte y el patrón de relleno.
- Permite simular el proceso de impresión para identificar posibles problemas o áreas de mejora en el diseño.

5. Gestión Remota de Impresiones:

- Permite gestionar múltiples trabajos de impresión desde cualquier ubicación mediante acceso remoto.
- Proporciona información en tiempo real sobre el progreso de la impresión y el estado de la máquina.

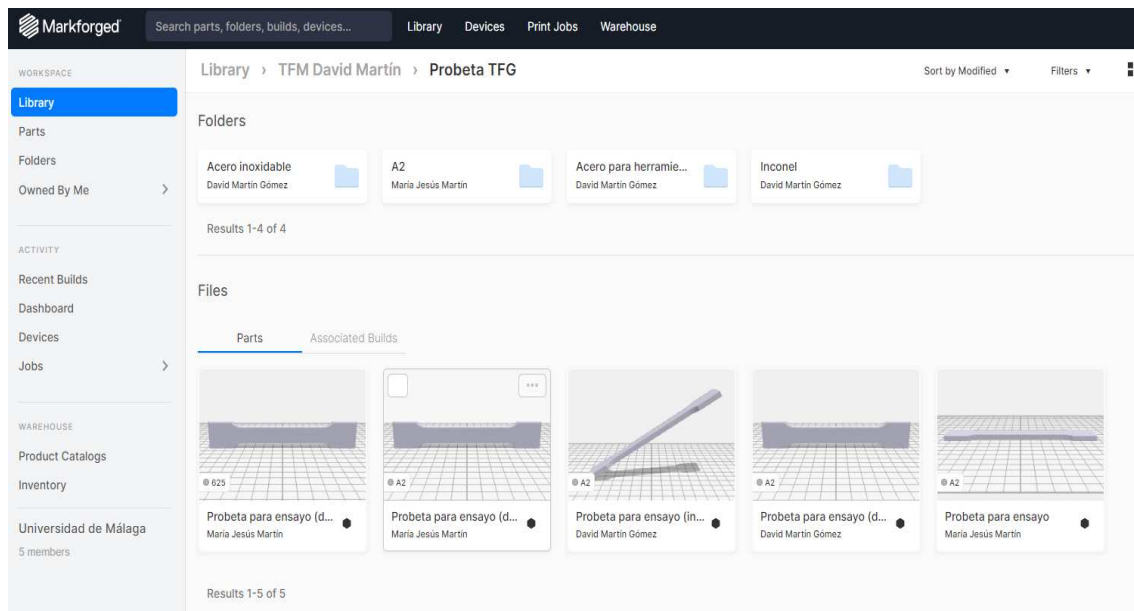


Figura 6.- Captura de pantalla del software Eiger [Fuente propia]

En resumen, Eiger es una herramienta versátil que potencia las capacidades de las impresoras 3D de Markforged, ofreciendo a los usuarios un control completo sobre el proceso de impresión y permitiendo la creación de piezas de alto rendimiento para una amplia gama de aplicaciones industriales y comerciales.

2.2.- Propiedades mecánicas/ensayos

Los ensayos mecánicos son fundamentales para determinar las propiedades y el comportamiento de los materiales frente a diferentes cargas y condiciones. Estos ensayos someten al material a condiciones extremas con el objetivo de conocer su resistencia y características mecánicas. Esta información es crucial para garantizar la seguridad y el rendimiento de los componentes una vez fabricados o instalados.

La mayoría de los ensayos mecánicos están normalizados por organismos como AENOR, utilizando el estándar UNE (Una Norma Española). Sin embargo, en el contexto de la fabricación aditiva, la normativa específica es aún limitada debido a la novedad y la evolución constante de esta tecnología.

Los ensayos mecánicos se pueden clasificar según su impacto en la pieza después de realizados, dividiéndose en ensayos destructivos y no destructivos. Los ensayos no destructivos, como el análisis por rayos X o ultrasonidos, se centran en detectar grietas o defectos internos sin dañar el material ni alterar sus propiedades fundamentales.

Los ensayos mecánicos permiten obtener datos cruciales sobre las propiedades mecánicas de los materiales, proporcionando información valiosa para el diseño, fabricación y uso final de componentes en diversas aplicaciones industriales.

En el ámbito de este TFM nos centraremos exclusivamente en los ensayos de tracción.

2.2.1.- Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es un método fundamental de ensayo mecánico utilizado para determinar las propiedades características de los materiales [7][8]. Dependiendo del tipo de material, este ensayo se lleva a cabo de acuerdo con normas específicas para evaluar el límite elástico, la resistencia a la tracción, el alargamiento a la rotura, entre otros parámetros.

En el ensayo de tracción, se aplica un esfuerzo axial gradual a una probeta hasta que se produce su rotura. Dicho proceso se puede ver con un ejemplo recogido en la Figura 7 correspondiente a uno de los ensayos realizados en el presente trabajo. Es esencial mantener una velocidad de deformación baja para obtener resultados precisos. Tras el ensayo, se registran la fuerza que se ha aplicado y la extensión final de la muestra ensayada.

Dentro del ámbito de los ensayos mecánicos, los ensayos de tracción son muy comunes y junto con las mediciones de dureza, constituyen prácticas estándar. La curva tensión-deformación resultante mostrada en la figura siguiente es fundamental, ya que permite determinar las propiedades de resistencia y deformación del material bajo tensión.

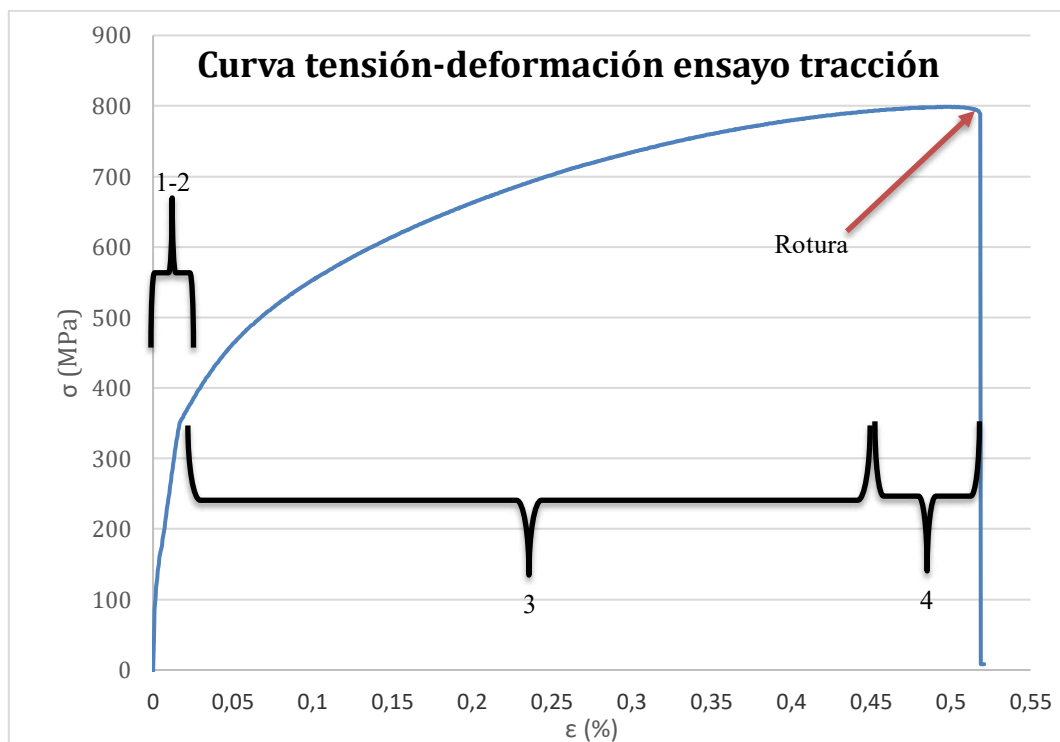


Figura 7.- Ejemplo de curva de comportamiento de un material sometido a un ensayo de tracción [Fuente propia]

La curva tensión-deformación muestra diferentes zonas marcadas por cambios de pendiente:

1. Zona elástica o lineal: La relación entre la tensión aplicada y la deformación experimentada por la probeta es directa y elástica, representada por el módulo de elasticidad (E).
2. Zona de fluencia: Esta zona exhibe inestabilidad, donde la relación entre la tensión y la deformación no es proporcional y la deformación no es permanente.

3. Zona de deformación plástica o endurecimiento por deformación: En esta etapa, la curva se vuelve más horizontal, lo que indica que se pueden lograr grandes alargamientos con incremento de cargas moderadas. La resistencia a la tracción se determina dividiendo la fuerza máxima alcanzada por la sección inicial de la probeta.

4. Zona de estricción: Esta es la región donde la probeta experimenta una reducción en la sección transversal justo antes de la rotura, con una disminución en la tensión y un aumento en la deformación en una zona localizada.

La realización de ensayos de tracción nos permite obtener datos precisos sobre las propiedades de resistencia y deformación de los materiales metálicos bajo esfuerzo de tracción. Estos datos serán esenciales para comprender cómo la fabricación aditiva afecta las propiedades mecánicas en comparación con otros métodos convencionales de fabricación. La comparación entre los materiales fabricados mediante fabricación aditiva y aquellos obtenidos por otros procesos proporcionará información valiosa principalmente sobre las siguientes propiedades mecánicas:

1. Módulo de elasticidad o módulo de Young [E]
2. Límite o punto de fluencia [R_p]
3. Resistencia a la tracción [R_m]
4. Límite o punto de rotura [R_u]
5. Alargamiento a la rotura [A]

Este análisis comparativo contribuirá a mejorar nuestra comprensión de cómo los métodos de fabricación influyen en las características finales de los materiales metálicos y orientará futuras decisiones de diseño y selección de materiales en aplicaciones industriales específicas.

2.3.- Ensayo de dureza

Aunque el eje principal de la presente memoria se ha centrado en el estudio detallado y el análisis de los resultados obtenidos a partir de los ensayos de tracción realizados sobre las probetas metálicas fabricadas mediante tecnología AM, se ha considerado pertinente incluir un apartado específico destinado a la determinación de la dureza de dichas probetas.

La evaluación de la dureza constituye un parámetro mecánico fundamental para comprender el comportamiento superficial de los materiales y su resistencia a la deformación permanente localizada. Por este motivo, se ha llevado a cabo la medición de la dureza en cada una de las probetas antes de ser sometidas a los ensayos de tracción, con el objetivo de evitar cualquier alteración en las propiedades superficiales derivada de la deformación plástica inducida durante el ensayo de tracción. De este modo, se garantiza que los valores de dureza obtenidos reflejen con mayor precisión el estado original del material fabricado.

Estos ensayos se han realizado en el laboratorio del Área de Ciencias de los Materiales en Ingeniería Metalúrgica de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga, utilizando equipos adecuados y conforme a los procedimientos estandarizados para ensayos de dureza en materiales metálicos. La inclusión de este apartado en la investigación permite ampliar el marco de

caracterización mecánica de las probetas, ofreciendo una visión más completa sobre el comportamiento del material y permitiendo correlacionar los valores de dureza con los resultados obtenidos en los ensayos de tracción descritos previamente.

2.3.1.- Conceptos iniciales

La dureza de un material se puede definir como la capacidad que presenta éste a ser rayado, penetrado o deformado por otro cuerpo. La dureza es una propiedad física fundamental de un material, aunque hay que indicar de que existen diferentes rangos de dureza según el tipo de material [9].

Para determinar la dureza de un material se necesita realizar un ensayo de dureza, el cual se puede definir como una prueba mecánica que permite determinar la resistencia de un material a la penetración de un objeto más duro bajo condiciones controladas de carga, tiempo y forma del penetrador. El ensayo de dureza no destruye el material, es relativamente fácil de aplicar y nos dice mucho sobre cómo se va a comportar una pieza en el uso real, sobre todo frente al desgaste, el rayado o los impactos.

Según el tipo de medición y el tipo de penetrador se suelen clasificar en los siguientes tipos:

1. Ensayo Brinell (HB) – Normativa ISO 6506: Consiste en presionar una bola de acero o carburo de tungsteno de un diámetro determinado contra la superficie del material con una carga fija. La dureza se calcula midiendo el diámetro de la huella dejada. Es adecuado para materiales con estructuras gruesas y superficies irregulares.
2. Ensayo Vickers (HV) – Normativa 6507: Usa una punta piramidal de diamante con base cuadrada que se presiona contra el material con una carga específica. La dureza se determina midiendo las diagonales de la huella dejada. Es útil para materiales muy duros y también para piezas pequeñas o delgadas.
3. Ensayo Knoop (HK) – Normativa 4545: Similar al Vickers, pero con una punta de diamante alargada que produce una huella elíptica muy pequeña. Se utiliza para medir la dureza superficial o en capas finas, especialmente en materiales frágiles o muy delgados.
4. Ensayo Rockwell (HR) – Normativa ISO 6508 y DIN 50103.

El método de ensayo de dureza seleccionado para este trabajo es el ensayo Rockwell, concretamente utilizando la escala C (HRC). La elección de este método se fundamenta en el análisis previo de las fichas técnicas proporcionadas por el fabricante Markforged [6], donde los valores de dureza indicados están expresados en esta misma escala. Utilizar el mismo método y escala que el fabricante permite obtener una comparación directa y coherente de los resultados experimentales con los datos técnicos oficiales, facilitando la validación y el análisis crítico del comportamiento mecánico del material fabricado. Por tanto, la decisión de emplear el ensayo Rockwell C se justifica no solo por la concordancia con los valores de referencia del fabricante, sino también por la adecuación del método a las propiedades del material y las condiciones prácticas del estudio. Teniendo en cuenta lo anterior, se va a explicar de qué trata este ensayo en el siguiente apartado.

2.3.2.- Ensayo de dureza Rockwell

El ensayo de dureza Rockwell es un método de carácter no destructivo utilizado para evaluar la dureza de un material, especialmente cuando se requiere conocer su resistencia sin comprometer su integridad estructural. Este procedimiento fue desarrollado por Hugh M. Rockwell y Stanley P. Rockwell, quienes en 1919 llevaron a cabo las primeras pruebas y diseñaron las máquinas iniciales destinadas a este tipo de medición [10].

A día de hoy, el método Rockwell se considera uno de los más accesibles y sencillos de ejecutar en comparación con otros sistemas de ensayo como los métodos Vickers o Brinell. La dureza determinada mediante la escala Rockwell hace referencia a la capacidad de un material, por lo general metálico, para resistir la penetración de un penetrador bajo condiciones de carga controlada.

El proceso para realizar un ensayo empleado Rockwell es el siguiente:

1. Se coloca el material a ensayar sobre la máquina de ensayos.
2. Se procede a aplicar una carga inicial pequeña para asentar el penetrador usado y eliminar las irregularidades superficiales.
3. Tras esto, se aplica una carga de mayor valor, la cual depende de la escala Rockwell usada.
4. Una vez aplicada dicha carga, se retira y se mide la profundidad de la impresión que ha dejado el penetrador con la carga menor aún aplicada.
5. Se procede a medir el valor de la dureza directamente o por medio de unas fórmulas.

Los rangos de valores esperados de dureza a obtener de las piezas a ensayar, observando lo que dice el fabricante, se encuentra estimado entre 5 HRC y 50 HRC en función del material ensayado.

Las ventajas de usar el método Rockwell son las siguientes:

- Es un ensayo muy rápido y fácil de usar.
- Se requiere de una mínima preparación de la muestra.
- Se puede usar en una línea de producción para controlar la calidad del producto.
- Ofrece una lectura directa de la dureza, no requiere de un microscopio para realizar la medición.

Dicho todo lo anterior, se va a proceder a explicar la metodología de trabajo seguida para realizar los ensayos de dureza de cada una de las probetas fabricadas.

2.3.3.- Equipo empleado para los ensayos

Para realizar los ensayos de dureza se ha empleado el **Durómetro Centaur RB2** (Figura 8).



Figura 8.- Durómetro Centaur RB2 utilizado para los ensayos de dureza [Fuente propia]

El uso del durómetro era muy sencillo, presentaba en uno de los laterales un control manual que permitía elegir la escala de Rockwell que se quisiera utilizar y la máquina automáticamente mediante el accionamiento de una palanca, ejercía la carga máxima indicada por la escala Rockwell elegida y tras un tiempo, dejaba de aplicarla para mostrar en el reloj que presenta en su estructura el valor de la dureza resultante.

Presentada la máquina que se ha utilizado para los ensayos, se va a proceder a explicar la metodología de trabajo que se ha seguido para medir la dureza de cada una de las probetas fabricadas.

2.3.4.- Flujo de trabajo

La metodología de trabajo seguida para realizar los ensayos de dureza y la toma de datos de cada una de las probetas fabricadas ha sido el siguiente:

1. Selección de la probeta a ensayar

El primer paso consiste en la elección adecuada de la probeta que va a ser sometida al ensayo de dureza. Esta debe presentar unas dimensiones compatibles con los requisitos del durómetro, así como una superficie lo suficientemente plana y limpia para permitir una correcta aplicación de la carga y una medición fiable.

2. Colocación de la probeta en el durómetro

Una vez seleccionada la probeta, se procede a su colocación sobre la plataforma de apoyo horizontal del durómetro (Figura 9). Esta superficie ha sido diseñada específicamente para estabilizar la probeta durante todo el procedimiento de medición, garantizando así su correcta alineación con el penetrador.



Figura 9.- Colocación de la probeta en el durómetro [Fuente propia]

3. Configuración de los parámetros de ensayo

Para la ejecución del ensayo bajo la escala Rockwell C (HRC), se requiere la aplicación de una carga total de 150 kp (ó 1471 N). Esta configuración se establece previamente mediante los controles situados en el lateral del durómetro, que permiten seleccionar tanto la escala de dureza como la carga correspondiente, tal y como se ha indicado en apartados anteriores.

4. Ajuste de la probeta respecto al penetrador

Con la probeta en su lugar, se acciona manualmente el tornillo de elevación ubicado en la base del durómetro. Este tornillo se gira con precaución hasta que la probeta asciende lo suficiente para contactar con el penetrador de la máquina hasta aplicar la precarga de 10 kp (ó 98 N) correctamente.

5. Establecimiento del cero en el dial indicador

Una vez aplicada la precarga, se procede a calibrar la posición de partida girando el dial de lectura de manera que la aguja grande se sitúe exactamente en el valor cero.

6. Aplicación de la carga mayor

Para continuar con el ensayo, se acciona la palanca lateral situada en la parte superior del durómetro. Esta palanca permite liberar de forma progresiva y controlada la carga adicional necesaria hasta alcanzar los 150 kp totales requeridos por la escala Rockwell C. El mecanismo de liberación

automática de la palanca contribuye a una aplicación uniforme de la carga, minimizando errores por intervención manual.

7. Lectura del valor de la dureza

Con el ensayo finalizado, se devuelve la palanca lateral a su posición inicial. A continuación, se procede a la lectura directa del valor de dureza en la escala exterior negra del dial, que corresponde específicamente a la escala Rockwell C (HRC). Este valor representa la resistencia del material frente a la penetración del indentador bajo las condiciones normalizadas del ensayo.

8. Registro de resultados y preparación de una nueva medición

Finalmente, se anota el valor de dureza obtenido en la hoja de resultados correspondiente. Si existen más probetas por analizar, se repite el procedimiento desde el primer paso para cada una de ellas, asegurando que todas las mediciones se realicen bajo las mismas condiciones experimentales para garantizar la comparabilidad de los resultados.

2.4.- Análisis metalográfico

Además de los ensayos de tracción y de dureza Rockwell realizados, se consideró oportuno complementar el análisis experimental mediante un estudio metalográfico de una selección representativa de las probetas fabricadas. Este estudio adicional tiene como objetivo observar y caracterizar la microestructura interna de las piezas obtenidas, con el fin de obtener información detallada sobre la disposición de las capas, la presencia de posibles defectos internos, la calidad de la unión entre capas y, en general, el comportamiento microestructural resultante del proceso de fabricación empleado.

La incorporación de este análisis metalográfico permite ampliar la comprensión del comportamiento del material más allá de las propiedades macroscópicas obtenidas mediante los ensayos mecánicos convencionales, aportando así una visión más completa de las características intrínsecas del material fabricado.

Las imágenes microscópicas que se presentarán en los apartados correspondientes fueron obtenidas con la colaboración del personal técnico especializado del laboratorio del edificio de Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación (SCAI) de la Universidad de Málaga, un centro de referencia en el estudio de materiales. Gracias a su equipamiento avanzado y experiencia en microscopía electrónica y óptica, fue posible llevar a cabo un análisis riguroso de la estructura interna de las probetas. Esta colaboración ha sido clave para garantizar la calidad y fiabilidad de los resultados obtenidos.

Por tanto, la metalografía constituye una disciplina fundamental en la ciencia de materiales, enfocada en el estudio de la microestructura de las aleaciones metálicas. Se define con mayor precisión como la ciencia que se encarga de observar y analizar la estructura química, atómica y la distribución espacial de los diferentes constituyentes, fases o inclusiones presentes en los metales. Aunque se centra principalmente en materiales metálicos, los principios metodológicos de la metalografía pueden extrapolarse a la caracterización de otros tipos de materiales [11].

Es muy útil para:

- Verificar la calidad de tratamientos térmicos (como temple, recocido, etc.)
- Detectar defectos como porosidad, segregación, grietas, etc.
- Analizar cómo se comporta un material después de procesos como soldadura, fundición o fabricación aditiva, el cual este último va a ser el caso que se estudiará.

Como los ensayos metalográficos que se han llevado a cabo ha sido realizado por el equipo del SCAI, el procedimiento que se ha llevado a cabo exactamente es desconocido, pero se entiende que se habrá seguido un procedimiento similar al siguiente:

1. Corte de la muestra: Se selecciona un trozo del material que se quiera analizar y se corta con precisión, normalmente usando una tronzadora metalográfica.
2. Lijado y pulido: Se pule la superficie con lijas de grano progresivamente fino y luego con suspensiones abrasivas para obtener una superficie perfectamente lisa y reflectante.
3. Ataque químico (grabado): Se aplica un reactivo químico que "ataca" de forma controlada la superficie, revelando las diferentes fases o granos. Cada tipo de metal tiene su reactivo específico.
4. Observación al microscopio: Se observa la muestra bajo un microscopio óptico o electrónico para analizar su microestructura: tamaño de grano, fases presentes, distribución, etc.

Entendiendo todo lo anterior, en apartados posteriores, se mostrarán una serie de imágenes en donde se incidirá en los conceptos explicados. No obstante, hay que mencionar que el SCAI ha proporcionado las imágenes que se mostrarán en apartados posteriores "en bruto", es decir, no ha interpretado nada en ellas por lo que se va a intentar en el presente trabajo explicar un poco lo que se puede observar en las mismas.

2.5.- Materiales a ensayar

Se han empleado en total 4 materiales metálicos diferentes. Las características y propiedades de cada uno de ellos van a ser definidos en los siguientes apartados.

2.5.1.- Acero inoxidable 17-4PH

El acero inoxidable 17-4PH, también conocido como AISI 630, es un acero martensítico de endurecimiento por precipitación. Su designación "17-4" hace referencia a su composición química (véase Tabla 1.- Composición química del acero inoxidable 17-4PH [A1.1.1.- Acero inoxidable 17-4PH] Tabla 1) aproximada: 17% de cromo (Cr) y 4% de níquel (Ni), a los que se suman elementos como cobre (Cu) y niobio (Nb), que permiten su endurecimiento térmico.

Tabla 1.- Composición química del acero inoxidable 17-4PH [A1.1.1.- Acero inoxidable 17-4PH]

Composición	Porcentaje (en peso)
Cromo	15-17.5 %
Níquel	3-5 %
Cobre	3-5 %
Silicio	Máx. 1 %
Manganeso	Máx. 1 %
Niobio	0.15-0.45 %
Carbono	Máx. 0.07 %
Fósforo	Máx. 0.04 %
Azufre	Máx. 0.03 %
Hierro	Matriz

Entre las propiedades destacadas de este material se pueden indicar las siguientes:

1. **Resistencia a la corrosión:** El acero 17-4PH contiene aproximadamente 15-17.5% de cromo (Cr) y 3-5% de níquel (Ni), lo cual promueve la formación de una capa pasiva de óxido de cromo altamente estable. Esta capa actúa como barrera contra la oxidación, haciéndolo resistente a la corrosión en atmósferas húmedas, marinas moderadas, salinas o levemente ácidas. Aunque no alcanza los niveles de resistencia de los aceros austeníticos (como el 316L), supera notablemente a otros aceros martensíticos en ambientes moderadamente agresivos.
2. **Alta resistencia mecánica:** Puede alcanzar valores de resistencia a tracción superiores a 1000 MPa. Además, puede alcanzar unos valores de dureza Rockwell C entre 36-40 HRC según el tratamiento térmico aplicado.
3. **Buena tenacidad y dureza:** Aunque es más frágil que los aceros inoxidables austeníticos (como el 304 o el 316), el 17-4PH ofrece una excelente relación dureza/tenacidad, lo que lo hace ideal para componentes que requieren resistencia al impacto sin sacrificar rigidez estructural.
4. **Temperatura de trabajo:** Mantiene sus propiedades mecánicas hasta 300–315 °C), por lo que puede emplearse en ambientes de trabajo intermitente o continuo en caliente sin pérdida significativa de rendimiento estructural. No se recomienda su uso por encima de 315 °C de forma prolongada, ya que podría perder dureza por sobreenvejecimiento.

El acero inoxidable 17-4PH se utiliza en múltiples sectores industriales debido a su excelente combinación de resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y estabilidad térmica. En la industria aeronáutica, es empleado en componentes estructurales, ejes y herrajes sometidos a altas cargas y ambientes agresivos. En el sector de válvulas y sistemas hidráulicos, se aplica en asientos, cuerpos y husillos expuestos a fluidos corrosivos o presiones elevadas. También se usa en elementos de transmisión y ejes rotativos, donde se requiere alta resistencia al desgaste y a la fatiga. Por último, se emplea en estructuras metálicas sometidas a ambientes húmedos o marinos, donde la protección frente a la oxidación y la integridad mecánica son prioritarias.

Su combinación de resistencia a la corrosión, resistencia mecánica elevada y facilidad de procesamiento térmico lo convierte en un material muy versátil para fabricación aditiva con tecnología de sinterizado metálico como la que ofrece Markforged.

2.5.2.- Acero para herramienta A2

El acero A2 es un acero de herramientas de endurecimiento al aire, clasificado dentro de los aceros de trabajo en frío. Forma parte del grupo de los aceros grado A según la clasificación AISI (American Iron and Steel Institute), y está diseñado para combinar resistencia al desgaste, tenacidad y estabilidad dimensional. Se utiliza en aplicaciones donde las herramientas están sometidas a esfuerzos mecánicos severos, pero sin exposición prolongada a altas temperaturas. El acero A2 presenta una composición equilibrada que favorece la formación de carburos duros y martensita resistente (Tabla 2).

Tabla 2.- Composición química del acero para herramientas A2 [A1.1.2.- Acero para herramienta A2]

Composición	Porcentaje (en peso)
Cromo	4.75-5.5 %
Molibdeno	0.9-1.4 %
Carbono	0.95-1.05 %
Manganeso	0.4-1 %
Fósforo	Máx. 0.3 %
Vanadio	0.15-0.5 %
Silicio	0.1-0.5 %
Hierro	Matriz

Entre las propiedades destacadas de este material se pueden indicar las siguientes:

1. **Alta dureza:** Gracias a su composición rica en carbono y cromo el A2 proporciona una dureza elevada que permite el mecanizado de materiales con gran resistencia, así como mantener bordes cortantes afilados. Puede alcanzar 57-62 HRC después del tratamiento térmico, siendo ideal para cortes en frío, estampación y herramientas con alta exigencia de borde afilado.
2. **Resistencia al desgaste:** La presencia de carburos duros en su microestructura le confiere una excelente resistencia al desgaste por abrasión, lo que lo convierte en un material ideal para herramientas que trabajan con materiales duros o en entornos agresivos.
3. **Buena tenacidad:** Aunque presenta una tenacidad inferior a aceros como el H13 (más apropiado para trabajo en caliente), el A2 es notablemente más tenaz que otros aceros de alta

dureza como el D2, lo que le permite resistir impactos y cargas cíclicas sin fracturarse con facilidad.

4. **Estabilidad dimensional:** Una de sus mayores ventajas es la baja distorsión durante el tratamiento térmico, ya que, al endurecerse por enfriamiento al aire, no requiere temple en aceite ni en agua. Esto minimiza las deformaciones, facilitando el mecanizado previo y el ajuste de tolerancias en herramientas de precisión.

El acero A2 se emplea comúnmente en la fabricación de cuchillas industriales, troqueles de corte, punzones y herramientas de estampado debido a su excelente combinación de dureza, resistencia al desgaste y buena tenacidad. Es ideal para aplicaciones en frío donde las herramientas están sometidas a fricción, impacto o cargas repetitivas, como en procesos de corte, conformado o embutición ligera. Además, su estabilidad dimensional durante el endurecimiento al aire reduce deformaciones, lo que lo convierte en una opción fiable y duradera para entornos industriales exigentes a temperatura ambiente.

2.5.3.- Acero para herramienta H13

El acero H13 es un acero de herramienta de trabajo en caliente ampliamente reconocido por su excelente comportamiento en aplicaciones que implican altas temperaturas, choques térmicos y esfuerzos mecánicos intensos. Pertenece al grupo de aleaciones con base de cromo (Cr), molibdeno (Mo) y vanadio (V), lo que le confiere una combinación equilibrada de resistencia térmica, tenacidad, resistencia al desgaste y dureza en caliente (Tabla 3).

Tabla 3.- Composición química del acero para herramientas H13 [A1.1.3.- Acero para herramienta H13]

Composición	Porcentaje (en peso)
Cromo	4.7-5.5 %
Molibdeno	1.3-1.7 %
Silicio	0.8-1.2 %
Vanadio	0.8-1.2 %
Carbono	0.3-0.45 %
Manganeso	0.2-0.5 %
Fósforo	Máx. 0.03 %
Azufre	Máx. 0.03%
Hierro	Matriz

Entre las propiedades destacadas de este material se pueden indicar las siguientes:

1. **Resistencia térmica:** El acero H13 mantiene sus propiedades mecánicas esenciales, como la resistencia a tracción, dureza y tenacidad, a temperaturas de trabajo continuas cercanas a los 540 °C, y picos intermitentes superiores. Esta resistencia térmica se debe a su composición con altos contenidos de cromo, molibdeno y vanadio, que favorecen la formación de carburos estables a alta temperatura. Esto lo convierte en un material idóneo para aplicaciones de forja en caliente, fundición a presión y extrusión de metales, donde se producen ciclos térmicos severos y repetidos.

2. Alta dureza y resistencia al desgaste: Tras el tratamiento térmico (templado y revenido), el H13 puede alcanzar una dureza de entre 40 y 46 HRC, lo cual proporciona una excelente resistencia al desgaste por fricción, abrasión y presión. La presencia de carburos finos y bien distribuidos en su microestructura le otorga durabilidad frente al desgaste por deslizamiento.
3. Buena tenacidad: A diferencia de otros aceros de herramientas de dureza similar, el H13 presenta una tenacidad superior, entre un 20 % y un 200 % más de tenacidad frente a otros aceros de herramientas duros como el D2 y A2, especialmente bajo condiciones de trabajo en caliente, donde su resistencia a choques térmicos y mecánicos lo hace destacar.
4. Estabilidad dimensional: El acero H13 se caracteriza por una excelente estabilidad dimensional durante y después de los tratamientos térmicos, gracias a su baja distorsión y uniformidad de transformación. Esto permite conservar las tolerancias geométricas de las herramientas fabricadas, lo que es especialmente relevante en la producción de componentes que requieren precisión y repetibilidad, como moldes de inyección y matrices.

El acero H13 es ampliamente utilizado en industria automotriz, aeronáutica, fundición, inyección de plásticos y fabricación aditiva, gracias a su combinación de resistencia térmica, dureza, tenacidad y estabilidad dimensional. Está diseñado específicamente para trabajos en caliente, lo que lo hace ideal para herramientas que deben funcionar de forma continua bajo condiciones extremas.

2.5.4.- Inconel 625

El Inconel 625 es una superaleación avanzada a base de níquel (Ni), conocida por su extraordinaria resistencia mecánica y su sobresaliente comportamiento frente a la corrosión y la oxidación en condiciones extremas. Esta aleación se encuentra reforzada por solución sólida, lo que significa que su resistencia se deriva principalmente de la disolución homogénea de elementos de aleación (como molibdeno (Mo), cromo (Cr), hierro (Fe) y niobio (Nb)) dentro de la matriz de níquel (Ni), sin necesidad de endurecimiento por precipitación.

Tabla 4.- Composición química del Inconel 625 [A1.1.4.- **Inconel 625**]

Composición	Porcentaje (en peso)
Cromo	20-23 %
Molibdeno	8-10 %
Hierro	Máx. 5 %
Niobio	3.15-4.15 %
Cobalto	Máx. 1 %
Manganeso	Máx. 0.5 %
Silicio	Máx. 0.5 %
Aluminio	Máx. 0.4 %
Titanio	Máx. 0.4 %
Carbono	Máx. 0.1 %
Fósforo	Máx. 0.015 %
Azufre	Máx. 0.015 %
Níquel	Matriz

Entre las propiedades destacadas de este material se pueden indicar las siguientes:

1. Resistencia a altas temperaturas: El Inconel 625 conserva su integridad mecánica y estructural incluso a temperaturas de hasta 1000-1100 °C, lo que lo convierte en un material ideal para aplicaciones térmicamente exigentes como componentes de motores a reacción, intercambiadores de calor en centrales térmicas y sistemas de escape de turbinas. Esta resistencia se debe a su matriz austenítica de níquel reforzada por elementos como el molibdeno y el niobio, que retrasan la deformación por fluencia y mantienen la resistencia a largo plazo bajo carga.
2. Resistencia a la corrosión: El Inconel 625 muestra un comportamiento excepcional frente a corrosión por picaduras, corrosión intergranular, agrietamiento por corrosión bajo tensión y oxidación superficial, incluso en medios altamente agresivos como agua de mar, soluciones salinas concentradas, ácidos minerales (como ácido nítrico, fosfórico o sulfúrico) y atmósferas oxidantes.
3. Alta resistencia mecánica: Esta aleación posee una resistencia a tracción en torno a los 1200 MPa, y una dureza de entre 40-45 HRC en estado recocido, lo que significa que puede soportar cargas elevadas sin necesidad de tratamientos térmicos adicionales. Su resistencia se basa en el endurecimiento por solución sólida, lo que lo diferencia de otras aleaciones que requieren precipitados secundarios para mejorar sus propiedades mecánicas.
4. Buena soldabilidad: A pesar de tratarse de una superaleación, el Inconel 625 presenta una excelente soldabilidad debido a su baja segregación de fases frágiles durante la solidificación.

El Inconel 625 se emplea en sectores que requieren materiales con alta resistencia térmica y a la corrosión, como la industria aeroespacial (motores, sistemas de escape), la energética (intercambiadores de calor, sistemas de combustión) y la químico-petroquímica (reactores, válvulas, tuberías). También es común en entornos marinos, en componentes expuestos al agua salada y la corrosión bajo tensión. Gracias a su excelente comportamiento frente a la fatiga térmica y medios agresivos, es un material ideal para la fabricación aditiva de piezas metálicas funcionales en aplicaciones exigentes.

La selección de los materiales 17-4PH, acero para herramientas A2, acero para herramientas H13 e Inconel 625 responde a criterios de ingeniería orientados a cubrir un amplio espectro de requerimientos funcionales en entornos industriales exigentes. Esta combinación estratégica permite analizar materiales con comportamientos diferenciados frente a sollicitaciones mecánicas, térmicas y químicas, abarcando desde condiciones de trabajo en frío hasta aplicaciones en entornos de alta temperatura y fuerte agresividad corrosiva.

- El acero inoxidable 17-4PH representa una aleación martensítica endurecible por precipitación, con una excelente relación entre resistencia mecánica (>1000 MPa), tenacidad y resistencia a la corrosión, siendo idóneo para aplicaciones estructurales y de precisión en entornos húmedos o marinos.
- El acero para herramientas A2 aporta una combinación equilibrada de dureza (~60 HRC), resistencia al desgaste y estabilidad dimensional, útil para herramientas con alta exigencia de filo y resistencia al impacto.

- El acero para herramientas H13 se selecciona por su alta resistencia térmica (hasta 540 °C), dureza (40-46 HRC) y buena tenacidad, lo que lo hace óptimo para procesos de fundición a presión, forja y extrusión.
- El inconel 625, a base de níquel, extiende el rango de análisis hacia entornos extremos, gracias a su excepcional resistencia mecánica (aproximadamente 1200 MPa) y a la corrosión por picaduras, grietas o agentes oxidantes incluso a temperaturas de hasta 1000-1100 °C.

Además, la disponibilidad de estos cuatro materiales como filamentos certificados para fabricación aditiva mediante sinterizado metálico en la plataforma Markforged asegura plena compatibilidad con la tecnología empleada. Sus propiedades están contrastadas mediante ensayos normalizados y recogidas en las fichas técnicas del fabricante, incluidas en el ANEXO 1.- Fichas técnicas , lo que permite garantizar la trazabilidad de los datos y la fiabilidad del análisis comparativo. Esta selección permite así una evaluación técnica integral que abarca distintas aplicaciones de la fabricación aditiva metálica orientada al sector industrial.

3.- DESARROLLO

El desarrollo del presente trabajo se ha estructurado en una serie de etapas interconectadas que definen la metodología seguida a lo largo del mismo. Dichas etapas quedan reflejadas en el siguiente diagrama de flujo (Figura 10):

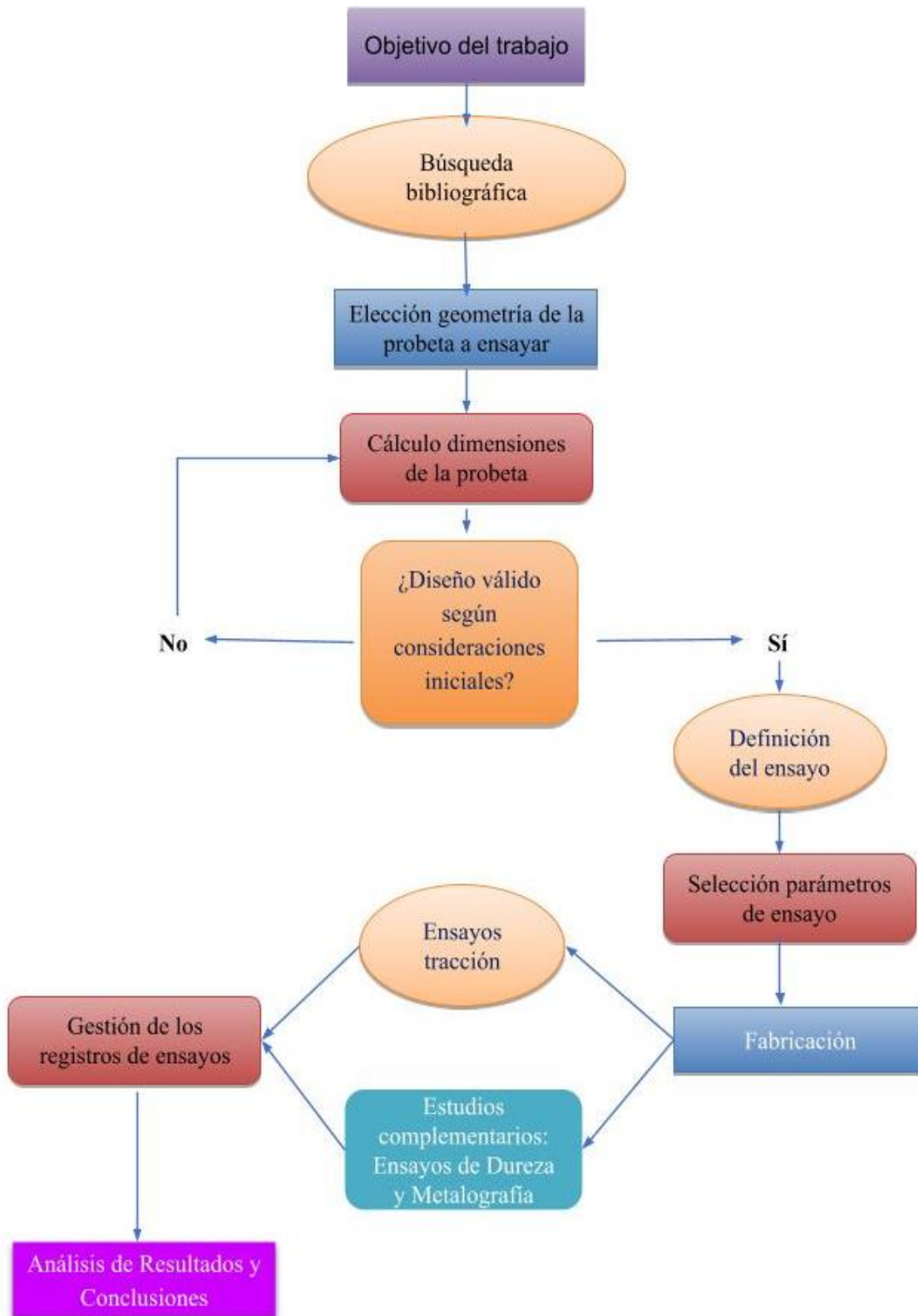


Figura 10.- Estructura desarrollo metodología [Fuente propia]

3.1.- Búsqueda bibliográfica y normativa de referencia

Antes de iniciar el desarrollo de este trabajo, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de literatura científica centrada en la fabricación aditiva de metales mediante la tecnología FFF/FDM. Esta revisión bibliográfica se enfocó en identificar cómo distintos investigadores han abordado el estudio de propiedades mecánicas y microestructurales de piezas metálicas fabricadas mediante este proceso.

Entre los artículos más relevantes que han servido de base y guía para el presente trabajo destaca el estudio de Caminero et al. [12], en el cual se analizan probetas fabricadas en acero inoxidable 316L mediante FFF, evaluando el efecto de la orientación de impresión sobre las propiedades mecánicas y la microestructura. El análisis incluyó ensayos de tracción y estudios metalográficos, concluyendo que las orientaciones planas y de canto ofrecen mejores resultados mecánicos, mientras que la orientación vertical se descarta debido a su menor rendimiento. Este hallazgo fue fundamental para definir las orientaciones de impresión de las probetas a ensayar en este trabajo.

Asimismo, el estudio realizado por Sławomir et al. [13] ha proporcionado pautas de diseño específicas y pronósticos sobre la influencia de la orientación en el comportamiento mecánico del acero 17-4PH fabricado mediante procesos aditivos, lo que ha facilitado la planificación experimental y la predicción de resultados. Por otro lado, el trabajo de Ahuir-Torres et al. [14] aportó un enfoque metodológico para el análisis de ensayos de tracción realizados en piezas de 17-4PH, aunque empleando un proceso diferente de fabricación aditiva, lo cual ha permitido enriquecer la interpretación de los resultados obtenidos en el presente estudio.

Finalmente, el análisis realizado por Martín-Fernández et al. [15] sobre el uso del equipo Markforged Metal X, que es el mismo utilizado en este trabajo, ha sido clave para comprender las ventajas e inconvenientes de esta tecnología específica en la fabricación aditiva de metales. Esta revisión ha permitido anticipar limitaciones técnicas y optimizar parámetros para la correcta fabricación y caracterización de las muestras.

Cabe destacar que, dada la ausencia de normativas específicas para el diseño y ensayo de probetas metálicas fabricadas mediante fabricación aditiva, se ha optado por seguir las normas internacionales vigentes para materiales metálicos producidos por procesos convencionales de fabricación. Estas normas, que están referenciadas en los últimos apartados de esta memoria, garantizan la validez y comparabilidad de los resultados mecánicos obtenidos mediante ensayos de tracción. No obstante, algunas de las más importantes se van a indicar a continuación.

- UNE EN-ISO 6892-1:2020. Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.
- DIN 50125:2022-08. Ensayo de materiales metálicos. Probetas de tracción.
- UNE-EN ISO 377:2017. Acero y productos de acero. Localización y preparación de muestras y probetas para ensayos mecánicos.

3.2.- Metodología de fabricación

3.2.1.- Consideraciones iniciales de diseño

Para el diseño de las probetas utilizadas en este trabajo, se han considerado diversas consideraciones clave que influyen en su tamaño y forma final:

1. **Limitaciones del tamaño:** Se ha tomado en cuenta tanto el tamaño del horno utilizado para sinterizar las piezas obtenidas de la impresora 3D como el de la propia cama de la impresora. Dado que el proceso de fabricación posterior implica la sinterización de las piezas, se diseñaron las probetas con dimensiones lo suficientemente pequeñas como para ser compatibles con la capacidad del horno. Esta decisión asegura que las probetas sean adecuadas para el proceso de postprocesamiento y sinterización sin comprometer la calidad o integridad de las muestras. No obstante, hay que mencionar que en todo momento las probetas que se van a diseñar y fabricar en el presente trabajo van a cumplir con todas las consideraciones recogidas en la normativa vigente aplicable. Se demostrará en apartados posterior su cumplimiento.
2. **Consideraciones de coste:** El uso de materiales metálicos en la fabricación aditiva puede ser más costoso en comparación con los plásticos u otros materiales. Por lo tanto, reducir el tamaño de las probetas no solo ayuda a cumplir con dichas limitaciones, sino que también contribuye a minimizar el coste de fabricación de cada probeta. Esta optimización del tamaño garantiza un uso eficiente de los materiales, lo cual es especialmente relevante en entornos donde la fabricación aditiva con metales puede ser más costosa.
3. **Requisitos del extensómetro:** La longitud de calibración ($L_c = L_e$) del extensómetro debe ser al menos de 70 mm para garantizar mediciones confiables de la deformación durante el ensayo. Por lo tanto, el diseño de las probetas incluye una longitud suficiente para permitir la instalación adecuada del extensómetro y la captura precisa de los datos de deformación durante las pruebas. Dicha longitud indicada se ha utilizado para poder dimensionar correctamente la probeta, realmente la longitud que necesita el extensómetro para realizar las mediciones es $L_e = 50$ mm. Dicha longitud será la que se utilizará como referencia para realizar los cálculos pertinentes. Por tanto, para diseñar se ha tomado como referencia 70 mm para colocar el extensómetro para analizar los resultados se ha utilizado 50 mm.

En resumen, el diseño de las probetas se ha optimizado teniendo en cuenta las limitaciones técnicas del proceso de fabricación, los costes asociados y los requisitos específicos para realizar mediciones precisas durante los ensayos de tracción. Esta planificación cuidadosa garantiza la calidad y la fiabilidad de los resultados obtenidos durante la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales mediante ensayos de tracción. Los artículos, normativas y trabajos que se han investigado para proceder a realizar el presente trabajo se han referenciado en la bibliografía desde la referencia [12] a la [30]. No obstante, todas no van a ser referenciadas en el texto, solo se van a indicar para que quede claro que se han tomado como referencia.

3.2.2.- Proceso de diseño de las probetas

A.- Normativa a cumplir y consideraciones iniciales

Tal y como se indicó en el apartado 3.1, para llevar a cabo el diseño y ensayo de probetas metálicas fabricadas mediante AM no existe actualmente una norma específica para dicho fin, por lo que para iniciar con el diseño de las probetas que se van a ensayar se ha seguido y cumplido con las consideraciones enunciadas en [1].

B.- Geometría de la probeta y cálculo de dimensiones

Primero, en la norma UNE EN-ISO 6892-1:2020 se recogen diferentes normas de diseño en función del origen y forma del material que se emplee para la fabricación de la probeta:

1. Tipos de probetas que se deben utilizar para productos delgados: chapas, flejes y productos planos de espesor entre 0,1 mm y 3 mm.
2. Tipos de probetas que se deben utilizar para alambres, barras y perfiles con un diámetro o espesor de menos de 4 mm.
3. Tipos de probetas que se deben utilizar para chapas y productos planos de espesor mayor o igual a 3 mm, y de alambres, barras y perfiles de diámetro o espesor mayor o igual a 4 mm.
4. Tipos de probetas que se deben utilizar para tubos.

Como en este trabajo el material empleado para la fabricación de las probetas parte de una bobina de filamento para AM, se ha determinado que, por sencillez y por facilidad para la fabricación de cada probeta, se va a tomar como referencia las dimensiones y características propias de probetas obtenidas a partir de chapas y productos planos de espesor mayor o igual a 3 mm ya que se espera emplear probetas planas con un espesor superior a 3 mm.

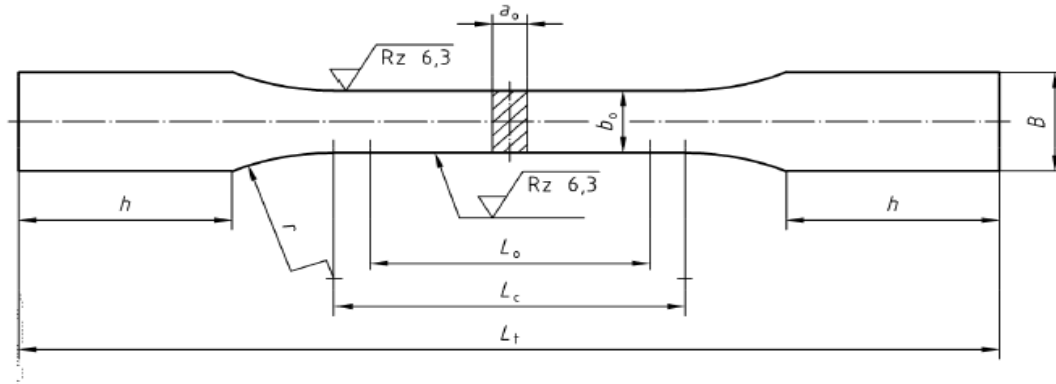
Se debe incidir en que dicha elección se ha tomado según las siguientes consideraciones:

1. Se van a diseñar y fabricar probetas planas debido a la mayor facilidad de impresión en comparación a probetas cilíndricas.
2. Se van a diseñar y fabricar probetas para unos espesores mayores de 3 mm ya que debido a las consideraciones iniciales de diseño (L_c mayor de 70 mm), para espesores menores de 3 mm no se puede diseñar ninguna probeta que cumpla con lo anterior.

Según la norma, para este tipo de productos se deben seguir con las siguientes dimensiones de referencia recogidas en la siguiente tabla (Tabla 5):

Tabla 5.- Dimensiones de referencia para probetas a partir de productos planos [26]

r_i	b_a	l_a	b	r mín.	h	l_c	l_t mín.
2	6	20	11	12	22	26	85
2	10	25	15	12	30	32	107
3	10	30	13	12	26	38	105
4	10	35	15	12	30	45	120

**Figura 11.-** Parámetros principales a calcular para el dimensionamiento de la probeta [26]

Se debe indicar que las dimensiones recogidas en la tabla anterior son solo ejemplos a tener en cuenta para el diseño final de las probetas que se van a emplear.

Como nos encontramos con una probeta con un espesor > 3 mm, ya que para un espesor < 3 mm la longitud L_c nunca sería mayor de 70 mm en ningún caso para probetas proporcionales, nos vamos al anexo D de [26] y se comprueba lo siguiente:

1. El radio de acuerdo mínimo para probetas no cilíndricas debe ser de mínimo 12 mm.
2. En principio, vamos a realizar el diseño teniendo en cuenta que la probeta va a ser proporcional, es decir, aquella que cumple con la relación que se enuncia en el siguiente apartado con referencia **$K = 5.65$ (coeficiente de proporcionalidad)**
3. Para probetas proporcionales, las probetas deben cumplir con la relación:

$$L_{0\text{marcas}} = K \cdot \sqrt{A}$$

Donde:

A: Área transversal de la probeta diseñada. Su valor sería el correspondiente al producto de:

$$A_0 = e \cdot b$$

4. Para probetas proporcionales, la longitud característica L_c debe ser igual o superior al resultado de la relación:

$$L_c \geq L_0 + 1.5 \cdot \sqrt{A_0}$$

Teniendo en cuenta lo anterior y considerando que la parte de la longitud calibrada L_c debe ser de al menos 70 mm para conseguir colocar el extensómetro en los ensayos, se ha llegado a diseñar la siguiente probeta cuyas dimensiones principales son las recogidas y desarrolladas en el siguiente apartado.

C.- Evolución del diseño

A lo largo del trabajo se han llevado a cabo tres diseños diferentes de probetas, las cuales siempre han mantenido el tipo elegido en el apartado anterior, es decir, se han diseñado probetas plantas de espesor superior a 3 mm.

Cada probeta diseñada se ha realizado en el software **SOLIDWORKS** y presenta unas dimensiones propias que cumplen con las condiciones recogidas en el apartado anterior. Las dimensiones nominales de cada una de las probetas diseñadas son las mostradas en la Figura 12. Sabiendo esto, la evolución del diseño ha sido la siguiente.

Modelo 1

El primer modelo (Figura 12) fue diseñado sin tener en cuenta la consideración de que L_c debía ser superior a 70 mm, por lo que las dimensiones obtenidas para el primer modelo fueron las siguientes (Tabla 6):

Tabla 6.- Parámetros principales del dimensionamiento del modelo 1

Parámetro	Símbolo [Unidad]	Valor
Espesor	a_0 [mm]	5
Ancho	b [mm]	10
Longitud entre puntos	L_0 [mm]	40
Anchura zona mordazas	B [mm]	15
Radio de acuerdo	r [mm]	12
Longitud zona mordazas	h [mm]	30
Longitud de control	L_c [mm]	51
Longitud total	L_t [mm]	126

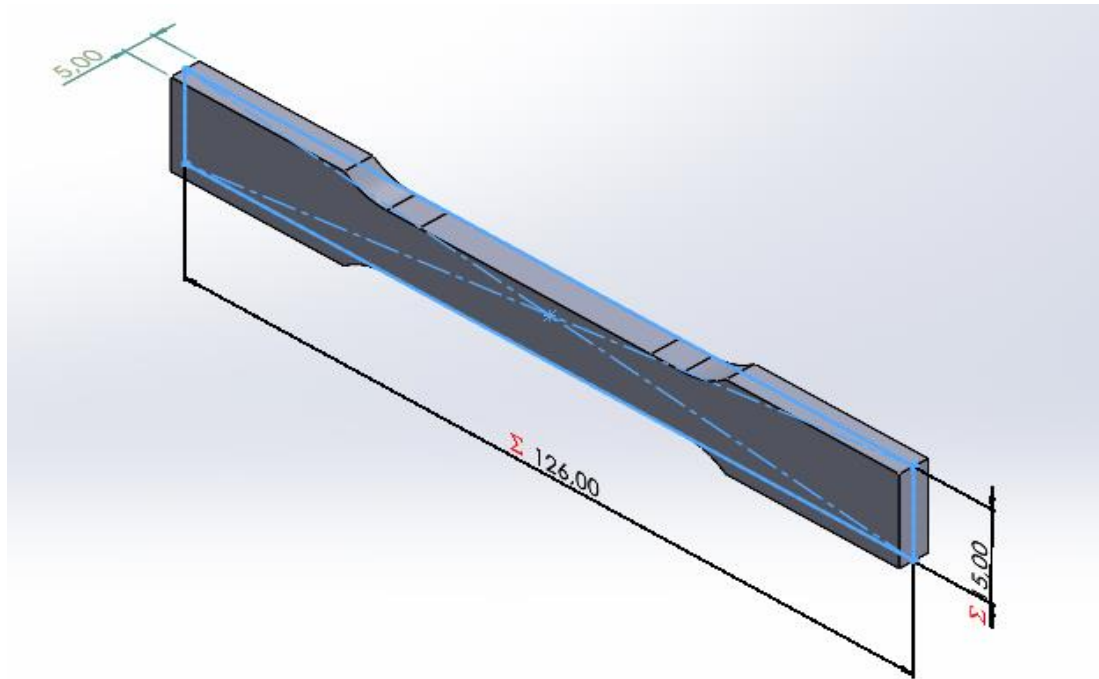


Figura 12.- Modelo 1 diseñado [Fuente propia]

Sin embargo, tras imprimir esta primera probeta y probarla en la máquina de ensayo se comprobó de que la longitud de la zona central, es decir, la longitud de L_c era insuficiente para colocar el extensómetro, por lo que se determinó en este momento que dicha magnitud debía medir como mínimo 70 mm. Es a partir de aquí que se impuso dicha consideración de diseño. Por otro lado, este incremento de longitud central no debía ocasionar un aumento de la longitud total de la probeta L_t , por lo que se determinó disminuir la longitud de agarre de las mordazas/sujeción para que L_t no aumente en exceso y eso implique un aumento tanto del coste como de tiempo en relación a la fabricación de cada una de las probetas que se van a emplear en los ensayos. Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a diseñar nuevos modelos.

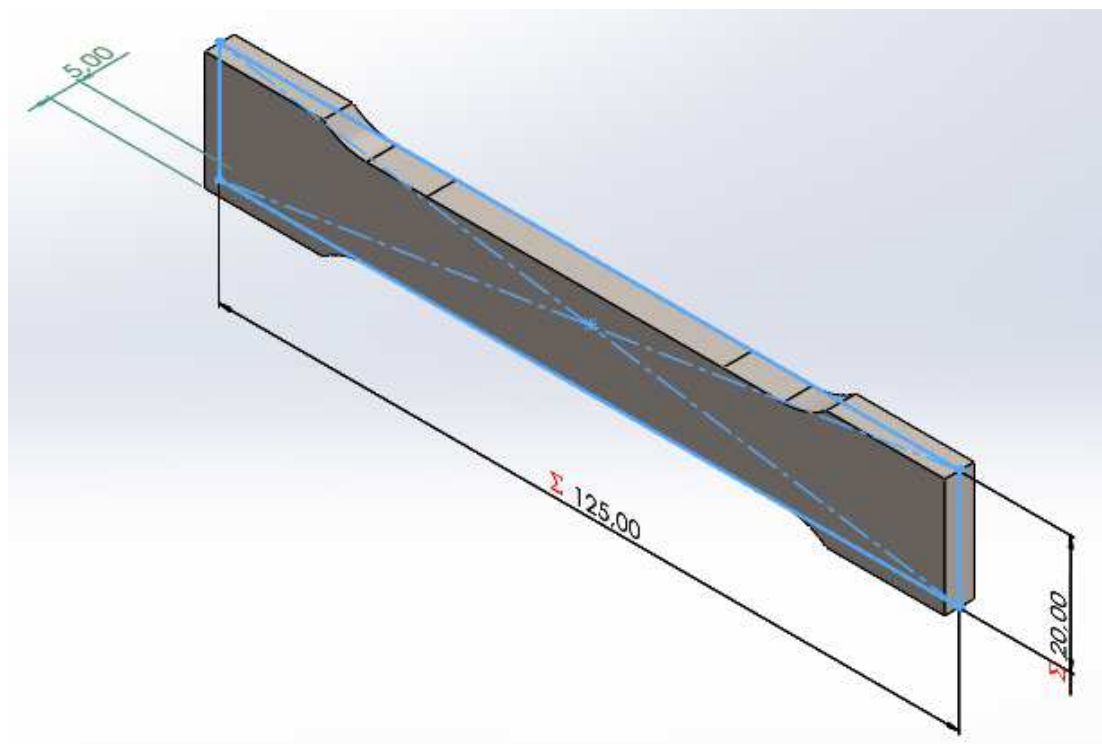
Modelo 2

Para el segundo modelo (Figura 13) se hizo un rediseño del modelo anterior, pero teniendo en cuenta las consideraciones de longitud mencionadas tras el análisis del primer modelo. Hay que volver a mencionar que dichas dimensiones se han obtenido teniendo en cuenta las condiciones recogidas para el diseño de probetas según [26] que se indicaron en apartados anteriores.

Para este caso, las dimensiones nominales del modelo son las siguientes:

Tabla 7.- Parámetros principales del dimensionamiento del modelo 2

Parámetro	Símbolo [Unidad]	Valor
Espesor	a_0 [mm]	5
Ancho	b [mm]	15.50
Longitud entre puntos	L_0 [mm]	50
Anchura zona mordazas	B [mm]	20
Radio de acuerdo	r [mm]	12
Longitud zona mordazas	h [mm]	20
Longitud de control	L_c [mm]	70.34
Longitud total	L_t [mm]	125

**Figura 13.-** Segundo modelo diseñado [Fuente propia]

Este modelo se ha considerado válido para llevar a cabo los ensayos.

Modelo 3

Aunque el modelo anterior era válido, se diseñó un tercer modelo (Figura 14) para comprobar si se podía realizar uno más eficiente, es decir, uno que sea igualmente válido para los ensayos pero que necesite menos material para la impresión y, por tanto, cuyo coste y tiempo de fabricación sea menor.

Las dimensiones nominales del tercer modelo diseñado son las siguientes:

Tabla 8.- Parámetros del modelo 3 diseñado

Parámetro	Símbolo [Unidad]	Valor
Espesor	a_0 [mm]	4
Ancho	b [mm]	12.50
Longitud entre puntos	L_0 [mm]	40
Anchura zona mordazas	B [mm]	20
Radio de acuerdo	r [mm]	12
Longitud zona mordazas	h [mm]	20
Longitud de control	L_c [mm]	70.57
Longitud total	L_t [mm]	128

Finalmente, este modelo fue el que se eligió para fabricar las probetas y llevar a cabo los ensayos.

D.- Justificación elección diseño final según normativa

El modelo finalmente elegido para llevar a cabo el diseño final de la probeta ha sido el **modelo 3**.

Las exigencias a cumplir según normativa vigente ya han sido indicadas en apartados anteriores, pero se quiere mostrar a continuación el procedimiento y los cálculos llevados a cabo para determinar y demostrar que las medidas del diseño de la probeta seleccionada cumplen con la normativa vigente. Dicha justificación es la siguiente:

1. Consideración de radio de acuerdo. Según normativa el radio de acuerdo de probetas cilíndricas debe ser de mínimo 12 mm, es por ello que se ha elegido $r = 12$ mm.
2. Se va a realizar el diseño de una probeta proporcional, es decir, que la relación entre sus longitudes es proporcional y, además, que sea simétrica.
3. Para obtener la longitud L_0 que se va a tomar como referencia en la probeta, se supuso unos valores de e y de b de 4 mm y 12.50 mm. Sustituyendo dichos valores en la expresión anterior se obtiene un valor de $L_0 = 39.95$ mm, el cual se redondeó a 40 mm, por lo que la consideración de proporcionalidad según normativa se cumple.
4. Por último, según normativa, en probetas proporcionales la longitud característica L_c debe ser igual o superior a la relación $L_c \geq L_0 + 1.5 \cdot \sqrt{b_0 \cdot a_0}$. Sustituyendo lo conocido se obtiene que $L_c \geq 50.61$ mm. Sabiendo esto, como L_c tenía que tener un valor superior a $L_c > 70$ mm

para cumplir con la condición del extensómetro, al diseñar se fijó su valor en 70.57 mm, un poco superior a lo que se exigía.

En resumen, los cálculos realizados y los valores obtenidos, recopilados en la Figura 9, demuestran que la probeta diseñada cumple con las exigencias especificadas en [26] para probetas planas con un espesor mayor de 3 mm. Estos análisis garantizan que la probeta seleccionada es adecuada y cumple con los estándares necesarios para llevar a cabo los ensayos de tracción de manera precisa y conforme a las regulaciones establecidas.

Por otro lado, la probeta finalmente diseñada en formato CAD (*.SLDPRT) es la mostrada en las siguientes imágenes (Figura 14 y Figura 15):

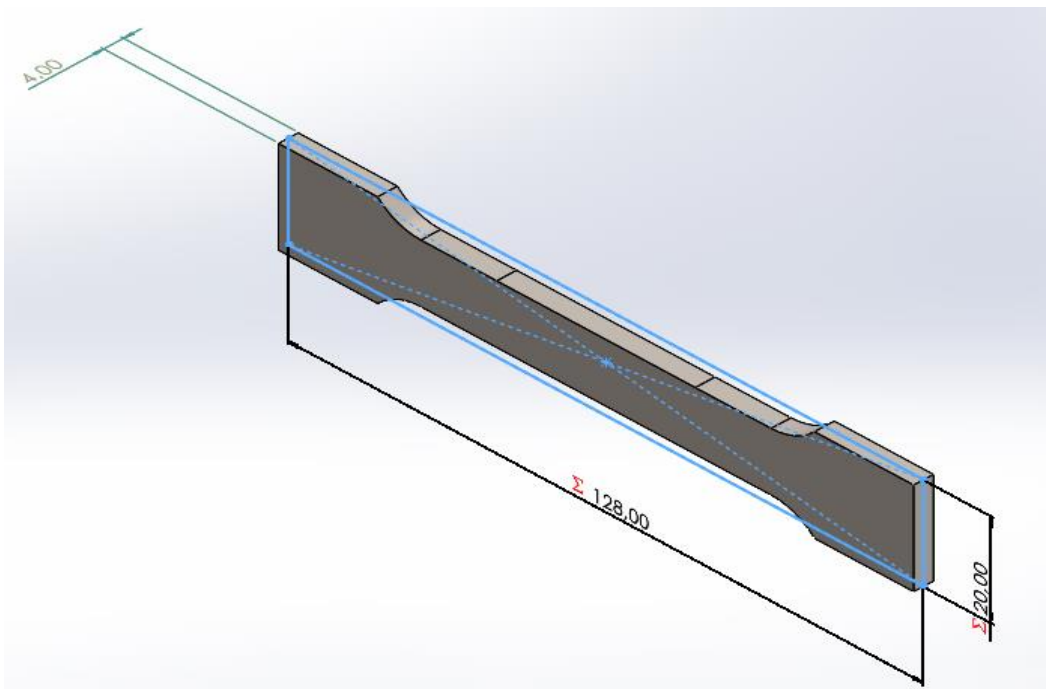


Figura 14.- Modelo final de la probeta a diseñar (Vista isométrica) [Fuente propia]

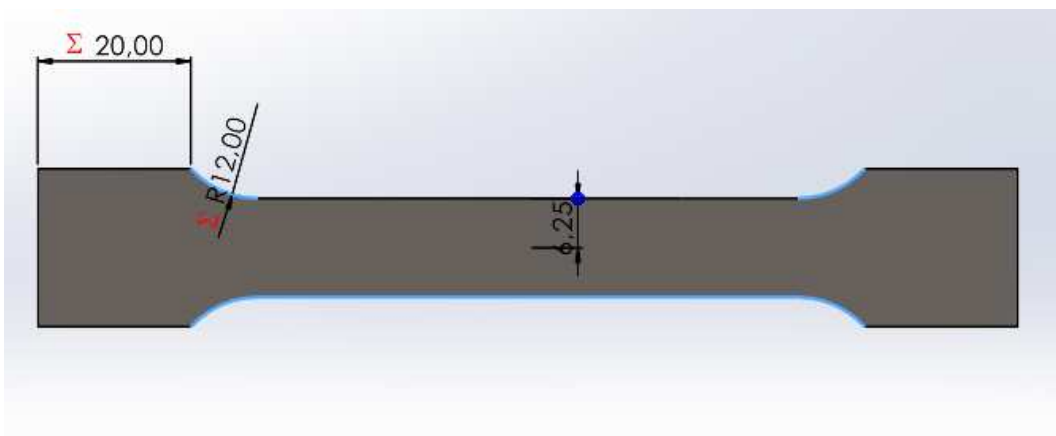


Figura 15.- Modelo final de la probeta a diseñar (Alzado) [Fuente propia]

Tabla 9.- Dimensiones de la probeta obtenidas en SolidWorks en mm

☐ Variables globales	
"Lt"	= 128
"B"	= 20
"ao"	= 4
"bo"	= 12.50
"Lo"	= 40
"r"	= 12
"h"	= 20
"Lc"	= 70.57

Hay que mencionar que, aunque no se haya mostrado ningún modelo, se han desarrollado otros modelos de probetas con un espesor de 3 mm. Sin embargo, se observó que la longitud total L_t resultante de estas probetas era demasiado grande para facilitar su posterior introducción en el horno, donde se pretende aprovechar al máximo el espacio y el tiempo al poder introducir un mayor número de probetas simultáneamente. Las dimensiones finales de la probeta diseñada se pueden ver en el plano adjunto en el presente trabajo (ANEXO 2.- Planos).

Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió trabajar con probetas con un espesor de al menos 4 mm, puesto que estas dimensiones finales resultan óptimas y adecuadas para su manejo durante los procesos posteriores de lavado y sinterizado en el horno. La selección de probetas con un espesor de 4 mm permite una disposición de las mismas de manera óptima, mejorando la capacidad de producción y asegurando condiciones adecuadas para los tratamientos térmicos o procesos adicionales necesarios para llevar a cabo los ensayos. Estos ajustes en el diseño de muestras contribuyen significativamente a la optimización de los procesos de fabricación y evaluación de materiales, proporcionando resultados confiables y reproducibles en proyectos científicos.

3.2.3.- Fabricación de probetas

A.- Parámetros de impresión

Una de las labores más importantes de este trabajo fue la de elegir los parámetros de impresión para cada una de las piezas metálicas que se iban a imprimir. No obstante, se pretendía utilizar en todos los casos un relleno del 100% aunque eso no implica que existan zonas donde no se haya extruido suficiente material y queden huecos entre las diferentes capas de impresión (luego analizaremos esto en el apartado de metalografía).

Por otro lado, se ha realizado la fabricación e impresión de las probetas empleando los cuatro materiales que ya se han indicado en apartados anterior donde hay que mencionar que no se ha diferenciado los parámetros para cada material ya que se han utilizado los mismos para todos los casos.

Dichos parámetros utilizados (Tabla 10), los cuales se han introducido manualmente en el software EIGER, son los siguientes:

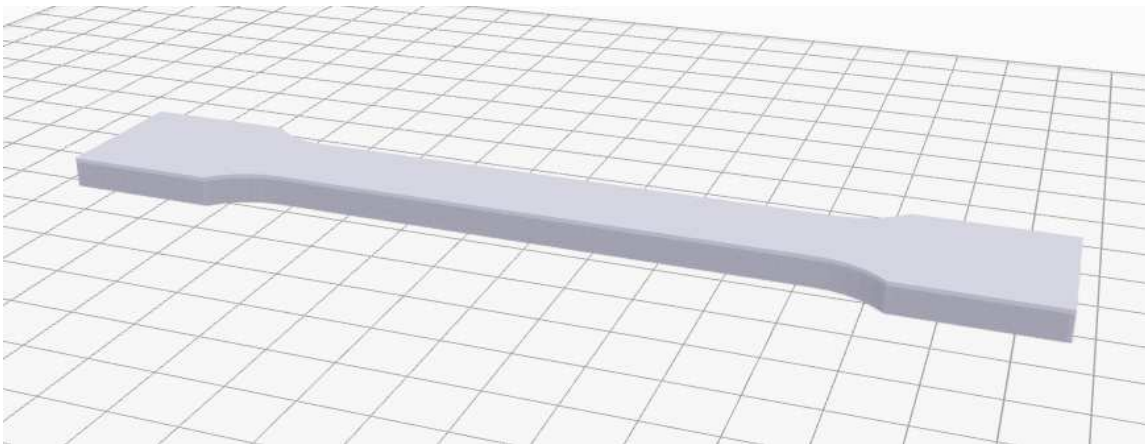
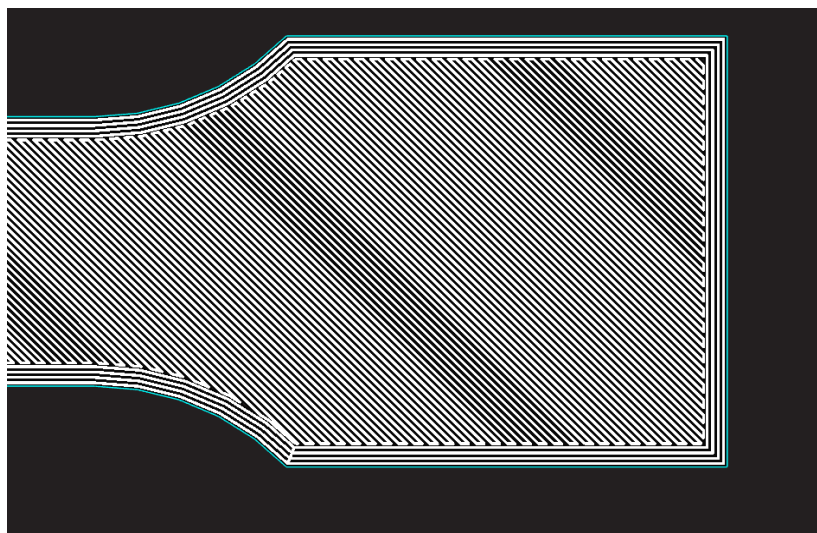
Tabla 10.- Parámetros de impresión elegidos para todos los materiales

Parámetro	Valor
Altura de capa (mm)	0.125
Diámetro de boquilla (mm)	0.4
Número capas paredes exteriores	4
Densidad de relleno	Relleno sólido (100%)

B.- Orientación de impresión

Las probetas para los cuatro materiales se van a imprimir en 2 orientaciones de impresión diferentes: **Orientación Plana u Orientación 1** y **Orientación de Canto u Orientación 2**.

- **Orientación Plana u Orientación 1**: la probeta se va a imprimir apoyada en su cara de mayor espesor sobre la cama de impresión, es decir, va a imprimirse con una orientación de 0° grados respecto su eje X o longitudinal.

**Figura 16.-** Orientación 1 de impresión de las probetas a ensayar [Fuente propia]**Figura 17.-** Líneas de impresión de las probetas impresas con orientación 1 [Fuente propia]

- Orientación de Canto u Orientación 2: la probeta se va a imprimir apoyada en su cara de menor espesor sobre la cara de impresión, es decir, va a imprimirse con una orientación de 90° respecto a su eje Y o transversal.

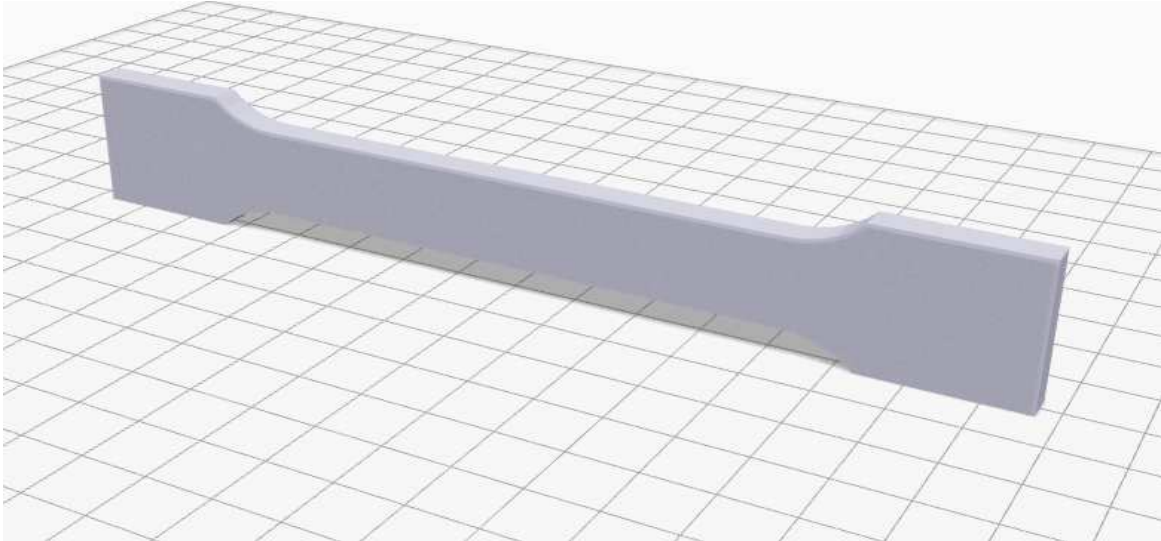


Figura 18.- Orientación 2 de impresión de las probetas a ensayar [Fuente propia]

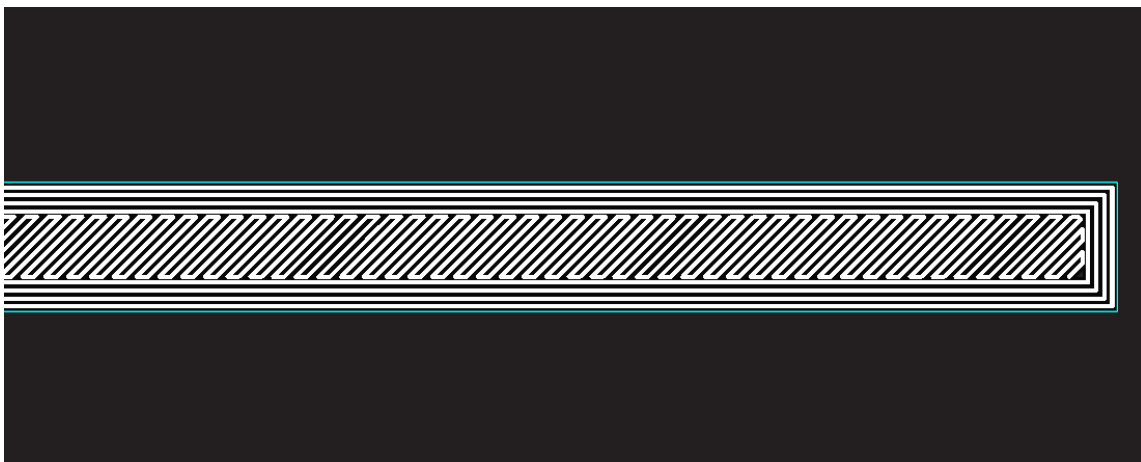


Figura 19.- Líneas de impresión de las probetas impresas con orientación 2 [Fuente propia]

C.- Impresión de las piezas en Metal X

El procedimiento de impresión de un material metálico en la impresora 3D Metal X de Markforged [6] consta de varias etapas esenciales que facilitan la elaboración de componentes metálicos a través de la fabricación aditiva. A continuación, se detalla este proceso paso a paso:

1. Preparación del Diseño

- El proceso inicia con la elaboración de un diseño CAD (diseño asistido por computadora) de la pieza que se quiere imprimir en 3D.
- El diseño tiene que considerar las especificaciones de producción, abarcando aspectos de soportes y estructuras de refuerzo.

2. Preparación del Archivo para Impresión

- El archivo CAD se importa a un software de preparación (slicing software) que divide el modelo en capas individuales para la impresión.
- Se seleccionan los parámetros de impresión, como la resolución, el relleno, la orientación de la pieza y los soportes necesarios.

3. Preparación del Material

- El material de impresión metálico, generalmente en forma de filamento, se carga en la impresora.
- El filamento contiene partículas metálicas finas mezcladas con un material aglutinante.

4. Proceso de Impresión

- La impresora 3D Metal X utiliza un proceso de deposición de material por extrusión para construir la pieza capa por capa.

5. Formación de la Pieza "Verde"

- Después de completar la impresión, se obtiene una pieza "**verde**" que consiste en el material impreso con el aglutinante aún presente (Figura 20).



Figura 20.- Muestra de algunas de las probetas "verdes" recién impresas [Fuente propia].

D.- Lavado de las piezas "verdes" en la máquina Wash-1

Una vez finalizada la impresión, las probetas no se consideran aún piezas definitivas. Antes de iniciar el proceso de lavado, es necesario realizar un pesaje inicial para determinar la masa de la pieza en su estado "verde", es decir, recién impresa y aún con la totalidad del aglutinante presente.

Este peso inicial servirá de referencia para evaluar la eficacia del proceso de lavado, cuyo objetivo es eliminar el aglutinante utilizado durante la impresión. Según las especificaciones del fabricante Markforged, cada material posee un porcentaje mínimo de pérdida de masa que debe alcanzarse tras

el lavado. Si, una vez completado el ciclo de lavado, la pieza no alcanza dicho porcentaje, será necesario repetir el proceso hasta cumplir con el umbral requerido.

Una vez completado adecuadamente el lavado, la pieza pasa a denominarse en estado “marrón”, indicando que está lista para la etapa de sinterización. Una orientación de lo que debe perder cada pieza “verde” tras cada lavado para considerarla válida viene recogido en la siguiente figura. Por ejemplo, para una pieza impresa de acero inoxidable, la pieza “verde” debe perder un 4.1% de masa para considerarla válida tras el lavado y proceder con el sinterizado.

Teniendo en cuenta lo anterior, el proceso para realizar el lavado de las piezas sería el siguiente:

1. Preparación inicial

- Se llena la estación Wash-1 con un fluido especializado que disuelve el material aglutinante usado en la impresión 3D.
- El volumen del fluido debe ser suficiente para sumergir completamente las piezas impresas.

2. Proceso de lavado

- Colocación e inmersión: Las piezas impresas ("verdes") se sumergen por completo para asegurar el contacto total con el fluido (Figura 21).
- Agitación: La estación agita el fluido, facilitando la disolución del aglutinante y la eliminación de residuos.
- Tiempo de lavado: Las piezas se dejan en el fluido durante un tiempo determinado, que varía según el tamaño, el tipo de pieza y el material utilizado.

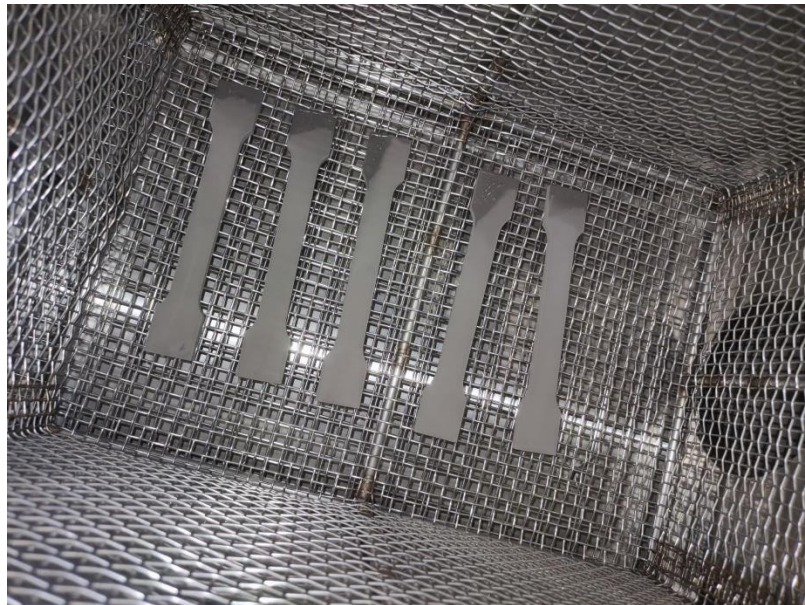


Figura 21.- Colocación de las piezas verdes en la máquina de lavado Wash-1 [Fuente propia]

3. Secado

- Las piezas se colocan en una zona de secado para eliminar el exceso de humedad o solvente.
- El secado es crucial antes de continuar con etapas como la sinterización.

4. Pesaje de la pieza

- Se pesa la pieza lavada para comprobar si ha perdido el porcentaje de masa necesaria. Si lo ha perdido se puede llevar para la fase de sinterizado y si no, debe volver a pasar por el proceso de nuevo para dejarla lista para el sinterizado.

E.- Proceso de sinterizado en Sinter-1

1. Preparación y configuración del horno

- **Carga de piezas:** Las piezas limpias se colocan cuidadosamente en la bandeja del horno para garantizar un calentamiento homogéneo (Figura 22a).
- **Programación de parámetros:** El sistema define de forma automática la secuencia de sinterizado, en función del material, mostrando durante el esquema de las etapas del proceso (Figura 22b).



Figura 22.- a) Colocación de las probetas para su introducción en Sinter-1 y b) Pantalla de control del horno de sinterizado [Fuente propia]

2. Fase de sinterización

- **Calentamiento gradual:** El horno incrementa progresivamente la temperatura hasta alcanzar la requerida para el sinterizado del polvo metálico.
- **Difusión de partículas:** Las partículas metálicas se funden entre sí, generando enlaces sólidos y formando una estructura metálica densa y cohesionada.
- **Tiempo de permanencia:** Las piezas se mantienen a temperatura máxima el tiempo necesario para asegurar la densificación del material.

3. Enfriamiento y retirada

- **Enfriamiento controlado:** Tras la sinterización, el horno enfría lentamente las piezas siguiendo un perfil programado, minimizando tensiones internas.
- **Extracción de piezas:** Una vez alcanzada una temperatura segura, se retiran del horno. Tras enfriar completamente, las piezas están listas para su uso o postprocesado.

Tras realizar todo lo anterior, se obtiene una probeta lista para proceder a ensayarla a tracción (Figura 23).



Figura 23.- Probetas listas para ensayar [Fuente propia]

F.- Resumen de parámetros y tiempos empleados en la fabricación de una probeta

Los tiempos de impresión, lavado y sinterizado de una probeta de cada material empleado se puede resumir en la siguiente tabla (Tabla 11).

Tabla 11.- Tabla resumen del tiempo y coste de fabricación de una probeta de cada material empleado

Código	SS	SSC	A2	A2C	H13	H13C	INC	INCC
Dimensión pieza impresa	153 mm x 23.9 mm x 4.8 mm (Planas) 153 mm x 4.8 mm x 23.9 mm (De Canto)							
Dimensión pieza final	128 mm x 20 mm x 4 mm (Planas) 128 mm x 4 mm x 20 mm (De Canto)							
Tiempo de impresión	2 h 46 m	6 h 19 m	5 h 32 m	9 h 31 m	2 h 42 m	5 h 21 m	2 h 52 m	5 h 44 m
Tiempo de lavado	12 h							
Tiempo de secado	4 h							
Masa pieza “verde” (g)	57.89	57.76	55.7	56.04	55.65	56.91	62.79	62.6
Masa pieza “marrón” (g)	55.52	55.39	53.42	53.74	53.37	54.58	60.40	60.22
Volumen metal (cm ³)	13.12	21.35	12.81	21.46	12.71	21.45	13.31	21.85

Volumen metal desechable (cm ³)	0	1.21	0	0.14	0	0.14	0	0.16
Coste pieza (USD)	8.53	14.48	14.73	24.75	14.62	24.74	21.96	36.13

G.- Número de probetas a ensayar

Al no existir una normativa propia para fabricación de probetas metálicas por AM mediante el proceso de fabricación FDM, se ha seguido lo recogido en las normas [29][30]. En estas normativas se recoge que para obtener en los ensayos de tracción un intervalo de confianza del 95% se necesitan ensayar al menos 5 probetas para cada ensayo. Por tanto, se van a fabricar 5 probetas por cada material y por cada orientación. Eso dará lugar a:

- Acero inoxidable 17-4PH: 5 probetas con orientación 0° y 5 probetas con orientación 90°.
- Acero A2: 5 probetas con orientación 0° y 5 probetas con orientación 90°.
- Acero H13: 5 probetas con orientación 0° y 5 probetas con orientación 90°.
- Inconel 625: 5 probetas con orientación 0° y 5 probetas con orientación 90°.

En total se van a ensayar 40 probetas, 10 de cada material y luego de esas 40, 20 serán fabricadas en posición plana (orientación 1) y 20 en posición de canto (orientación 2).

H.- Codificación de las probetas

La correcta numeración y codificación de las probetas que se van a ensayar es uno de las partes más esenciales de un ensayo para tener un control absoluto de todas las pruebas y para que el posterior análisis de resultados se realice de manera ordenada y sin ningún problema.

Para realizar la codificación de las probetas se ha utilizado una terminología parecida a la que se usa en las probetas plásticas. Sin embargo, para este caso se va a realizar la codificación diferenciando 3 partes.

- MATERIAL: Material que se ha utilizado para la fabricación de la probeta. En este caso aparecerá SS (Acero inoxidable 17-4PH), A2 (Acero para herramienta A2), H13 (Acero para herramienta H13) o INC 625 (Inconel 625)
- ORIENTACIÓN: Si la probeta se ha fabricado con orientación 2 (de canto), se añadirá una C tras el material. Si se ha fabricado con orientación 1 (plana) no se añadirá nada.
- NÚMERO DE PROBETA: Se añadirá tras la orientación un número (1, 2, 3, 4 o 5) para poder identificar cada una de las 5 probetas de cada material y orientación.

En resumen, el código empleado para codificar cada una de las probetas deberá ser el siguiente:

[MATERIAL] / [ORIENTACIÓN] / [NÚMERO DE PROBETA]

Pudiendo emplearse las siguientes opciones para cada una:

[SS/A2/H13/INC] / [-/C] / [1/2/3/4/5]



Figura 24.- Ejemplos de codificación de algunas de las probetas fabricadas [Fuente propia]

La codificación de cada una de las probetas se ha grabado sobre cada uno de los extremos de cada probeta por medio de un marcador permanente (Figura 24) para que tras la realización de los ensayos estas marcas no desaparezcan. Igualmente, si alguna de ellas no se ve muy bien se volverá a marcar tras el ensayo de tracción.

3.3.- Metodología de ensayo

3.3.1.- Equipo de ensayo

Para los ensayos de tracción se han utilizado fundamentalmente tres equipos: la máquina de ensayos que someterá a cada probeta la carga de tracción, el extensómetro que se empleará para medir la deformación de cada una de las probetas para el posterior cálculo de parámetros y, por último, el software necesario para introducir los parámetros de ensayos y registrar los resultados obtenidos.

Con respecto al primero de los mencionados, se ha utilizado la máquina de ensayos ubicada en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingenierías Industriales. Dicha máquina es la **Servosis MUE 403/65** de la marca Servosis S.L (Figura 25) [31].



Figura 25.- Máquina de ensayos Servosis MUE 403/65 [Fuente propia]

Las características principales de esta máquina son las siguientes (Tabla 12):

Tabla 12.- Características técnicas principales de la máquina de ensayos Servosis MUE 403/65 [A1.3.1.- Servosis MUE 403]

Tipos de ensayos que se pueden realizar	De tracción, compresión y flexión
Ensayos cíclicos	De hasta 5 Hz
Capacidad de carga	Entre 50 KN y 650 KN
Velocidad de ensayo	Hasta 200 mm/min
Tipos de materiales	Plástico, madera, compuestos, metálicos, etc.
Medida de fuerza	A través de una célula de carga

Con respecto al extensómetro, se ha de indicar que se ha utilizado el **Extensómetro Axial modelo 3452-050M-050-ST** de la marca Epsilon Technology Corp (Figura 26) [32].



Figura 26.- Extensómetro axial modelo 3452 utilizado [Fuente propia]

Las características técnicas principales de este equipo utilizado son las siguientes:

Tabla 13.- Características técnicas del extensómetro utilizado en los ensayos [A1.3.3.- Extensómetro Axial modelo 3452-050M-050-ST]

Longitud calibrada	50,00 ± 0.05 mm
Viaje máximo	-5 a 25 mm
Deformación máxima	De -10 % a 50 %
Rango de temperatura	De -40°C a 100 °C

3.3.2.- Software y selección de parámetros de ensayo

Para la realización de los ensayos se ha empleado principalmente un único programa: el programa **PCD2K de Servosis** (Figura 27a y 27b) [33].

El software PCD2K [A1.3.2.- Software de control PCD 2K Servosis MUE 403] está diseñado para el control eficiente de máquinas de ensayo. Esta herramienta, combinada con el hardware de adquisición y control de la empresa, ofrece una solución integral y robusta para la realización de pruebas con alta precisión. Su diseño permite al usuario acceder a un sistema de cálculo avanzado y opciones de personalización adaptables a diferentes necesidades, lo que lo convierte en una plataforma versátil para gestionar cualquier tipo de máquina de ensayo. Además, cuenta con módulos específicos y pantallas de ensayo optimizadas, facilitando la ejecución de tareas repetitivas y reduciendo al mínimo la intervención del operador.

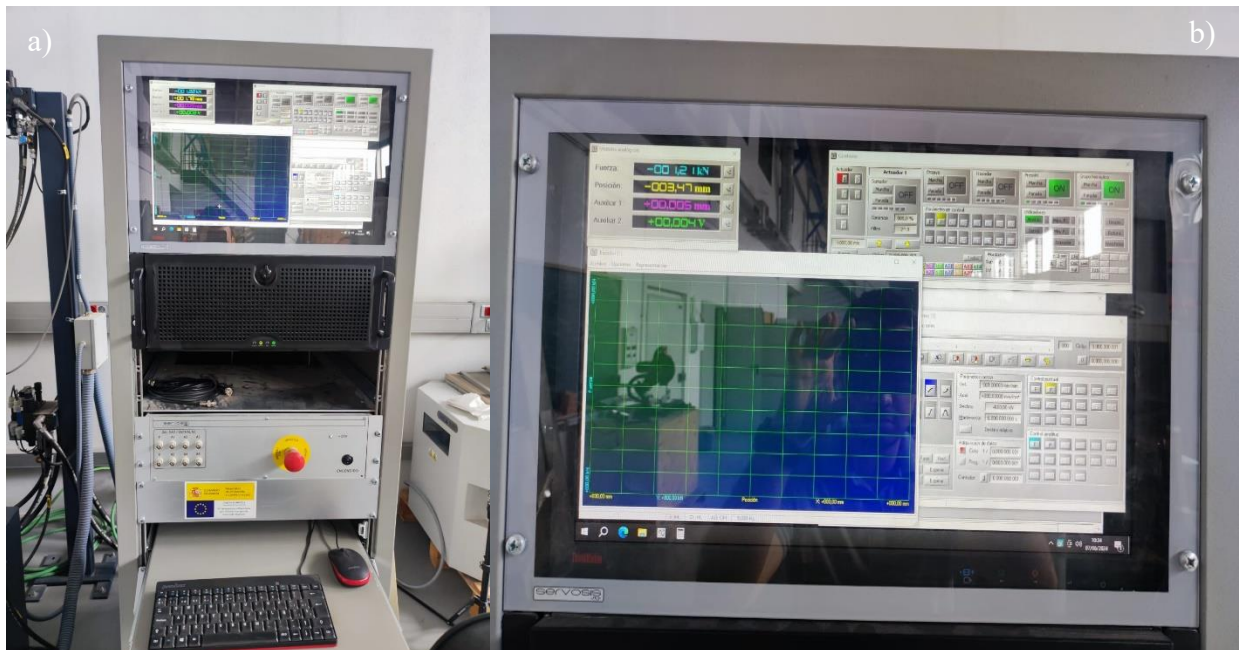


Figura 27.- a) Equipo utilizado para el control software durante los ensayos y b) Entorno de control del software de Servosis [Fuente propia]

3.3.3.- Parámetros de ensayo

Para la ejecución de los ensayos, se estableció previamente, en colaboración con el técnico de laboratorio, la utilización del método de carga máxima de 130 kN o fondo de escala 130 kN. Este procedimiento consiste en aplicar una fuerza de tracción progresiva sobre la probeta hasta alcanzar el umbral de 130 kN.

Dentro de este método, uno de los parámetros a determinar fue la velocidad de ensayo, la cual se configuró inicialmente en 2 mm/min con el objetivo de optimizar la duración de las pruebas. Se observó que, dependiendo del material analizado, algunos ensayos podían extenderse hasta aproximadamente una hora.

Por otro lado, el otro parámetro que faltaba por fijar era la frecuencia de captura de datos. En este caso, independientemente de la duración de cada ensayo según el material, se determinó que se iban a guardar en cada documento obtenido 1024 puntos. La pantalla para la elección de los parámetros de ensayo del software de Servosis viene mostrada en la siguiente Figura 28 y un resumen de los parámetros se ha recopilado en la Tabla 14.

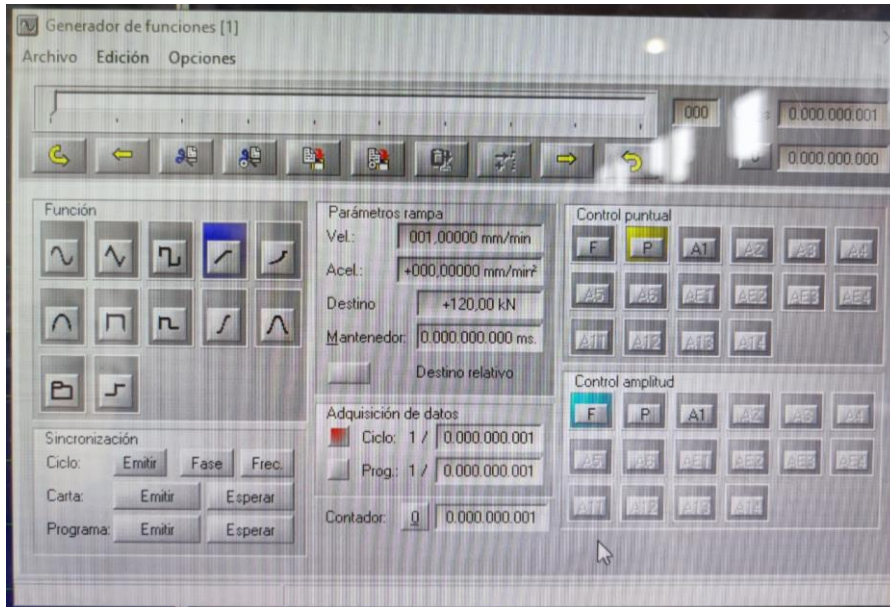


Figura 28.- Menú del software donde se elegían los parámetros de ensayo [Fuente propia]

En resumen, los parámetros de ensayo definidos fueron los siguientes:

Tabla 14.- Parámetros de ensayos seleccionados

Método de carga	Método de los 130 KN
Velocidad de ensayo	2 mm/min
Frecuencia de captura de datos	1024 puntos por cada archivo/ensayo

3.3.4.- Protocolo de ensayo

Antes de detallar el protocolo de ensayo seguido, es fundamental señalar que, en el momento de la realización del primer ensayo, no todas las probetas estaban completamente fabricadas. La producción de cada una de ellas implicó un proceso prolongado que abarcó varias etapas, incluyendo la fabricación aditiva, la limpieza posterior y el sinterizado, lo que demandó un tiempo considerable. En el caso particular de las probetas de acero inoxidable 17-4PH, no todas fueron sometidas a ensayo el mismo día, sino en jornadas distintas. Este aspecto podría haber introducido una variabilidad adicional en los resultados obtenidos, ya que las condiciones ambientales no fueron idénticas en todas las pruebas, lo que potencialmente pudo influir en las propiedades mecánicas registradas.

El protocolo de ensayo seguido para todas las probetas, una vez que la fabricación de cada una de ellas se encontraba completamente finalizada, se desarrolló bajo un procedimiento sistemático y estandarizado. Este protocolo se mantuvo invariable para todos los materiales ensayados, independientemente de su orientación de fabricación, asegurando así la homogeneidad en la ejecución de las pruebas. A continuación, se detallan los pasos seguidos durante el proceso de ensayo:

1. **Identificación de la probeta:** Cada probeta fue marcada con su código identificativo correspondiente antes de ser sometida a ensayo, lo que permitió un control riguroso y la trazabilidad de los resultados obtenidos.
2. **Colocación en la máquina de ensayo:** La probeta fue posicionada en la máquina de ensayos mecánicos **Servosis**, asegurando su correcta alineación en las mordazas. Dado que el equipo empleado presentaba ciertas limitaciones para la fijación precisa, el posicionamiento se realizó de manera visual, sin la posibilidad de utilizar herramientas auxiliares como escuadras o niveles de burbuja.
3. **Cierre de mordazas y ajuste de carga inicial:** Una vez ubicada la probeta, se procedió al cierre de las mordazas de sujeción. La carga inicial aplicada durante esta fase fue despreciada y ajustada a un valor nominal de **ceros**, de manera que la medición del esfuerzo aplicado comenzara desde un estado sin tensiones residuales registradas.
4. **Colocación del extensómetro:** El técnico de laboratorio fijó el **extensómetro axial** en la zona de medida correspondiente, con el objetivo de registrar los desplazamientos y deformaciones iniciales de la probeta bajo carga. Este dispositivo permitió obtener mediciones precisas del alargamiento en los primeros momentos del ensayo.
5. **Inicio del ensayo:** Una vez completados los pasos anteriores, se procedió al inicio del ensayo mediante la aplicación progresiva de carga, controlada a través del **software de la máquina de ensayo**. La carga fue incrementada de manera continua según los parámetros predefinidos, permitiendo evaluar el comportamiento del material sometido a tracción (Figura 29).
6. **Retiro del extensómetro en la zona plástica:** Cuando la probeta alcanzó la zona de **deformación plástica**, se retiró el extensómetro para evitar posibles daños en el dispositivo debido a la inminente falla del material.
7. **Finalización del ensayo tras la rotura de la probeta:** El ensayo continuó hasta que la probeta experimentó la **fractura final**. En este punto, se detuvo la aplicación de carga y el software de control finalizó automáticamente el programa de ensayo.
8. **Verificación de la fractura y validación del ensayo:** Se inspeccionó visualmente la zona de fractura para analizar el modo de fallo del material. Se verificó si la rotura ocurrió en la zona esperada y si el ensayo cumplía con los criterios establecidos para considerarse válido.
9. **Registro y almacenamiento de datos:** Finalmente, se almacenaron los datos obtenidos del ensayo en un archivo en formato **Excel**, utilizando como nombre del archivo el mismo código identificativo asignado a la probeta. Este procedimiento garantizó la organización y posterior análisis de los resultados experimentales.

Este protocolo de ensayo fue replicado para todos los materiales evaluados, sin distinción en cuanto a su orientación de fabricación, asegurando así la comparabilidad de los resultados y la coherencia en la metodología empleada.



Figura 29.- Probeta ensayada [Fuente propia]

3.3.5.- Tratamiento de datos

En lo que respecta al tratamiento de los datos experimentales obtenidos a partir de los ensayos de tracción, se debería haber seguido estrictamente las disposiciones establecidas en la normativa de referencia [1]. Dicha normativa establece que deben descartarse todas aquellas probetas que presenten fractura o deslizamiento dentro de las mordazas, así como aquellas cuya rotura ocurra fuera del tercio central de la distancia entre apoyos. Además, la norma exige que en estos casos se realicen ensayos adicionales utilizando probetas suplementarias para garantizar la validez de los resultados obtenidos. Sin embargo, la aplicación rigurosa de este criterio en el presente estudio ha resultado inviable debido a diversas limitaciones técnicas y económicas. En múltiples ensayos, la fractura de las probetas se ha producido en las zonas próximas a las mordazas o en la región colindante a los radios de acuerdo. Según la normativa UNE citada en [1], estas probetas deberían haber sido descartadas, requiriéndose la fabricación de nuevas muestras para su evaluación. No obstante, este procedimiento no ha resultado factible dentro del marco de este TFM, principalmente por dos razones fundamentales:

1. **Coste elevado de fabricación:** La producción de nuevas probetas metálicas implica un gasto significativo lo que dificulta la posibilidad de generar muestras adicionales para reemplazar aquellas que no cumplen estrictamente con el criterio normativo.
2. **Tiempo de fabricación considerable:** La fabricación de cada probeta conlleva un proceso prolongado que incluye etapas de impresión, limpieza, sinterizado y recocido. Repetir este procedimiento para obtener nuevas probetas, realizar nuevamente los ensayos y recopilar datos adicionales supondría una extensión del tiempo de ejecución del trabajo que no es compatible con los plazos establecidos para este estudio.

Además, si se hubiera seguido el criterio de la normativa de manera estricta, una parte significativa de las probetas ensayadas habría tenido que ser descartada, lo que implicaría rehacer el proceso de fabricación y someter las nuevas muestras a sinterización y ensayo nuevamente. Este escenario excede las posibilidades reales de ejecución de este trabajo y comprometería la viabilidad del trabajo dentro del marco de los recursos disponibles.

Por lo tanto, en este estudio se ha decidido considerar como válidos todos los ensayos realizados, incluso aquellos que no cumplen estrictamente con la normativa UNE mencionada. No obstante, se reconoce que este aspecto representa una limitación en la interpretación de los resultados y se espera que en futuras investigaciones se pueda profundizar en el análisis de estos datos, optimizando tanto el procedimiento experimental como la metodología de fabricación de las probetas para garantizar un mayor grado de cumplimiento con la normativa vigente.

3.4.6.- Cálculo de datos

Una vez obtenidas todas las hojas de cálculo de cada ensayo realizado, se va a proceder al cálculo de las propiedades mecánicas necesarias para determinar el comportamiento de las probetas metálicas a tracción. Todos los conceptos necesarios para explicar este apartado ya se han detallado en apartados anteriores, especialmente en el apartado 1.3 de definiciones y abreviaturas.

Para ello, hay que indicar que para los cálculos realizados se ha utilizado el método del límite elástico o de fluencia al 0.2% en tracción [29]. Dicho método es una técnica utilizada para determinar el límite elástico convencional de materiales que no presentan un punto de fluencia bien definido en su curva de esfuerzo-deformación, como ocurre en muchos metales dúctiles (por ejemplo, aleaciones de aluminio o aceros inoxidable). Cuando un material se somete a un ensayo de tracción, la relación entre el esfuerzo y la deformación inicial es lineal (comportamiento elástico). Sin embargo, en algunos materiales, la transición entre el comportamiento elástico y el plástico es gradual, sin un punto de fluencia claro. Para estos casos, se utiliza el límite elástico al 0.2% de deformación plástica como referencia.

Para calcularlo, hay que seguir los siguientes pasos:

- Trazar la recta elástica inicial: Se obtiene a partir de la región inicial de la curva esfuerzo-deformación, generalmente dentro del régimen elástico lineal, y su pendiente corresponde al módulo de elasticidad (E) del material.
- Aplicar un desplazamiento del 0.2%: Se traslada la recta elástica una deformación del 0.002 (0.2%) en la escala de deformación unitaria a lo largo del eje de las abscisas.
- Determinar el punto de intersección: El punto donde esta línea desplazada intersecta la curva esfuerzo-deformación experimental define el límite elástico al 0.2% ($\sigma_{0.2}$) (Figura 30).

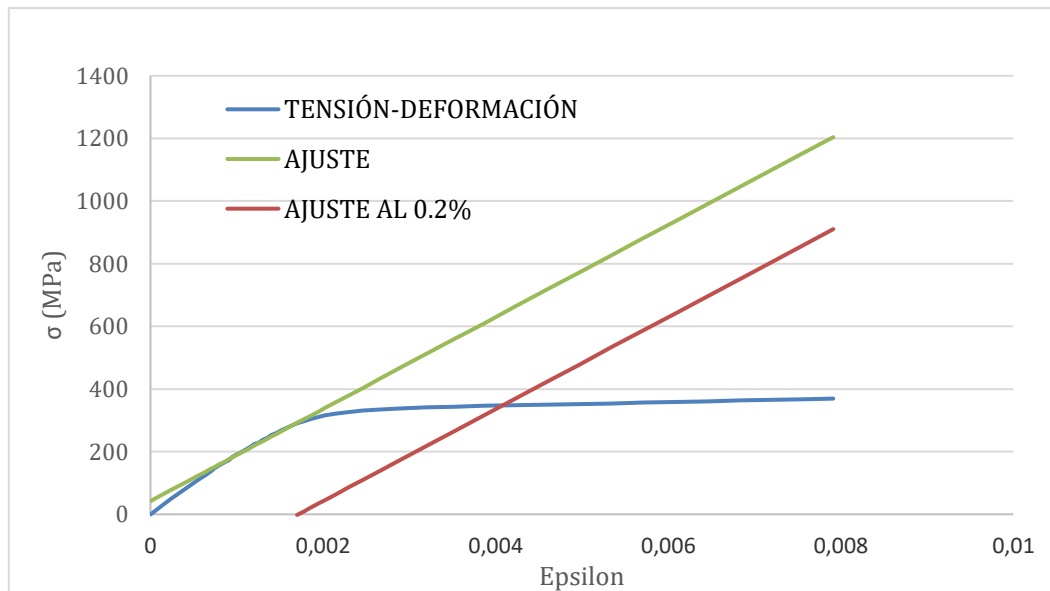


Figura 30.- Aplicación del límite al 0.2% (recta roja) sobre una de las probetas ensayadas para obtener el punto de fluencia (R_p) [Fuente propia]

Hay que indicar que los valores representados en el eje X en la gráfica anterior (Figura 30), se encuentran expresados en forma de fracción. Es decir, donde aparece 0.002 realmente equivale a un 0.2%, pero se ha dejado indicado en forma de fracción.

Para todos los cálculos que se han realizado se han utilizado las medidas del espesor a y de la anchura b de cada una de las probetas fabricadas. Se ha medido una a una y se ha obtenido el valor medio para obtener el valor de la longitud entre marcas $L_{0\text{marcas}}$ necesaria para marcar cada una de las probetas y tener en cuenta un valor fijo para calcular el alargamiento a la rotura de cada una de ellas. No obstante, hay que mencionar que todos estos cálculos y las gráficas asociadas a cada una de las probetas ensayadas se han obtenido mediante el empleo de una hoja de cálculo del software Excel de Microsoft Office. En la Figura 31 se puede ver el entorno de cálculo utilizado para uno de las probetas utilizadas en el presente trabajo.

Todos los datos obtenidos de dichas hojas de cálculo se han recopilado en una serie de fichas resumen con todos los resultados calculados para cada uno de las probetas ensayadas en el presente trabajo. Dichas fichas se encuentran adjuntadas en el ANEXO 3.- Ficha resumen probetas ensayadas al final del presente documento. Dichas fichas han servido como base para realizar el análisis de resultados y, por tanto, se han utilizado para realizar las conclusiones del trabajo.

Probeta	INC3		b (mm)	12,9	12,96	12,92	12,92666667	A (mm ²)	52,13755556
a)			e (mm)	4,08	4,02	4	4,033333333	lo (mm) ext	50
E (GPa)	167,0		E (Mpa)	166968		0,9920		ε límite	0,20
Rp (MPa)	364,009		ord_orig	22			Epsilon perman.		
			epsilon	-0,00012947			0,00187053		
	SE USA ESTE		Extensómetro						
Desplazamiento (mm)	Extensómetro (mm)	Fuerza (N)	Epsilon	Sigma (Mpa)	Epsilon	Ajuste	Epsilon	Ajuste bis	
-0,000117451	0,00056799	-69,080438	0	-1,32496502	0	21,61722012			
0,033676915	0,013194722	2430,59028	0,00025253	46,6188001	0,00025253	63,78233033	0,000252535		
0,069466536	0,023249653	4488,00586	0,00045363	86,0800975	0,00045363	97,35929097	0,000453633		
0,105038658	0,028050889	5405,49171	0,00054966	103,677506	0,00054966	113,3923099	0,000549658		
0,140722829	0,031584199	6140,94651	0,00062032	117,783552	0,00062032	125,1912773	0,000620324		
0,178359434	0,034804014	6742,99862	0,00068472	129,330931	0,00068472	135,943375	0,00068472		
0,211959682	0,037560496	7325,04244	0,00073985	140,494551	0,00073985	145,1482404	0,00073985		
0,247526926	0,040228758	7819,17339	0,00079322	149,971998	0,00079322	154,0585097	0,000793215		
0,283211726	0,042967824	8318,89398	0,000848	159,556655	0,000848	163,2052179	0,000847997		
0,319036818	0,045120809	8713,60405	0,00089106	167,127207	0,00089106	170,394794	0,000891056		
0,354648686	0,045584806	8878,18482	0,00090034	170,283872	0,00090034	171,9442421	0,000900336		
0,390350155	0,047744683	9194,09975	0,00094353	176,34313	0,00094353	179,1568322	0,000943534		
0,425992313	0,049455185	9642,06658	0,00097774	184,935148	0,00097774	184,8688015	0,000977744		
0,461680454	0,052463578	10110,8798	0,00103791	193,927	0,00103791	194,914887	0,001037912		
0,497331529	0,053943926	10529,3725	0,00106752	201,953705	0,00106752	199,8582939	0,001067519		
0,53298364	0,056317437	10976,4136	0,00111499	210,527968	0,00111499	207,7842825	0,001114989		
0,568705425	0,059175445	11475,2562	0,00117215	220,095785	0,00117215	217,3281784	0,001172149		
0,604295614	0,0612156	11905,1264	0,00121295	228,340708	0,00121295	224,1409762	0,001212952		
0,639929285	0,063595234	12333,5996	0,00126054	236,558839	0,00126054	232,0874131	0,001260545		
0,675179484	0,065384456	12891,9001	0,00129633	243,431054	0,00129633	238,0622564	0,001296329		
0,710952399	0,067768979	13104,2117	0,00134402	251,339203	0,00134402	246,0250209	0,00134402		
0,746575592	0,070257147	13567,8893	0,00139378	260,232554	0,00139378	254,3338912	0,001393783		
0,782303035	0,07261195	14012,8668	0,00144088	268,767238	0,00144088	262,1974074	0,001440879		
0,81787688	0,0753709	14461,9814	0,00149606	277,381271	0,00149606	271,4105143	0,001496058		
0,853557908	0,077794003	14870,5873	0,00154452	285,218345	0,00154452	279,5021112	0,00154452		
0,889181311	0,080578192	15270,2556	0,0016002	292,883997	0,0016002	288,7994996	0,001600204		
0,925080583	0,083582662	15727,5488	0,00166029	301,654893	0,00166029	298,8324841	0,001660293		
0,960637664	0,087079557	16152,9746	0,00173023	309,4314575	0,00173023	310,50985	0,001730231		
0,996190764	0,090586347	16588,908	0,00179997	318,175792	0,00179997	322,1534722	0,001799967		
1,031939057	0,094339927	16938,5527	0,00187544	324,881988	0,00187544	334,7547845	0,001875439	0,819519482	
1,067586244	0,098074495	17279,0509	0,00195013	331,412754	0,00195013	347,225826	0,00195013	13,29056104	
1,103289065	0,103255967	17645,3951	0,00205378	338,439248	0,00205378	364,5285881	0,00205376	30,59332113	
1,138920745	0,108771154	17982,6689	0,00216406	344,52457	0,00216406	382,9457422	0,002164063	49,01047718	
1,174593801	0,116305926	18247,1753	0,00231478	349,981413	0,00231478	408,1070036	0,002314759	74,17173856	
1,210213861	0,125219196	18422,826	0,00249302	353,350397	0,00249302	437,8715529	0,002493024	103,9362879	
1,245848474	0,136408056	18555,9629	0,00271678	355,903968	0,00271678	475,2284252	0,002716761	141,2931602	
1,281555172	0,151086785	18624,7083	0,00301038	357,222507	0,00301038	524,2525558	0,003010376	190,3172908	
1,317031892	0,168066705	18747,0971	0,00334997	359,589928	0,00334997	580,9544958	0,003349974	247,0192308	
1,352523803	0,187789684	18873,1435	0,00374403	361,987501	0,00374403	646,7496906	0,003744034	312,8144256	
1,388145844	0,207340357	18978,5164	0,00413545	364,008558	0,00413545	712,103069	0,004135447	378,167804	
1,423868896	0,228753034	19075,4495	0,0045637	365,867738	0,0045637	783,6075507	0,004563701	449,6722857	
1,459540276	0,249555253	19154,2212	0,00497975	367,378581	0,00497975	853,0734957	0,004979745	519,1382307	
1,495289093	0,271791173	19275,3792	0,00542446	369,702395	0,00542446	927,3270747	0,005424464	593,3918097	
1,530897199	0,294582825	19385,167	0,0058803	371,80813	0,0058803	1003,436438	0,005880297	669,5011733	
1,566638996	0,317025476	19495,4565	0,00632915	373,923485	0,00632915	1078,380363	0,00632915	744,4450978	
1,602193772	0,338715362	19588,2812	0,00676295	375,703867	0,00676295	1150,81054	0,006762947	816,8752753	
1,637887688	0,360689731	19680,1729	0,00720243	377,466352	0,00720243	1224,190711	0,007202435	890,2554457	
1,6736386	0,380747486	19761,9357	0,00760359	379,034565	0,00760359	1291,170827	0,00760359	957,2353617	

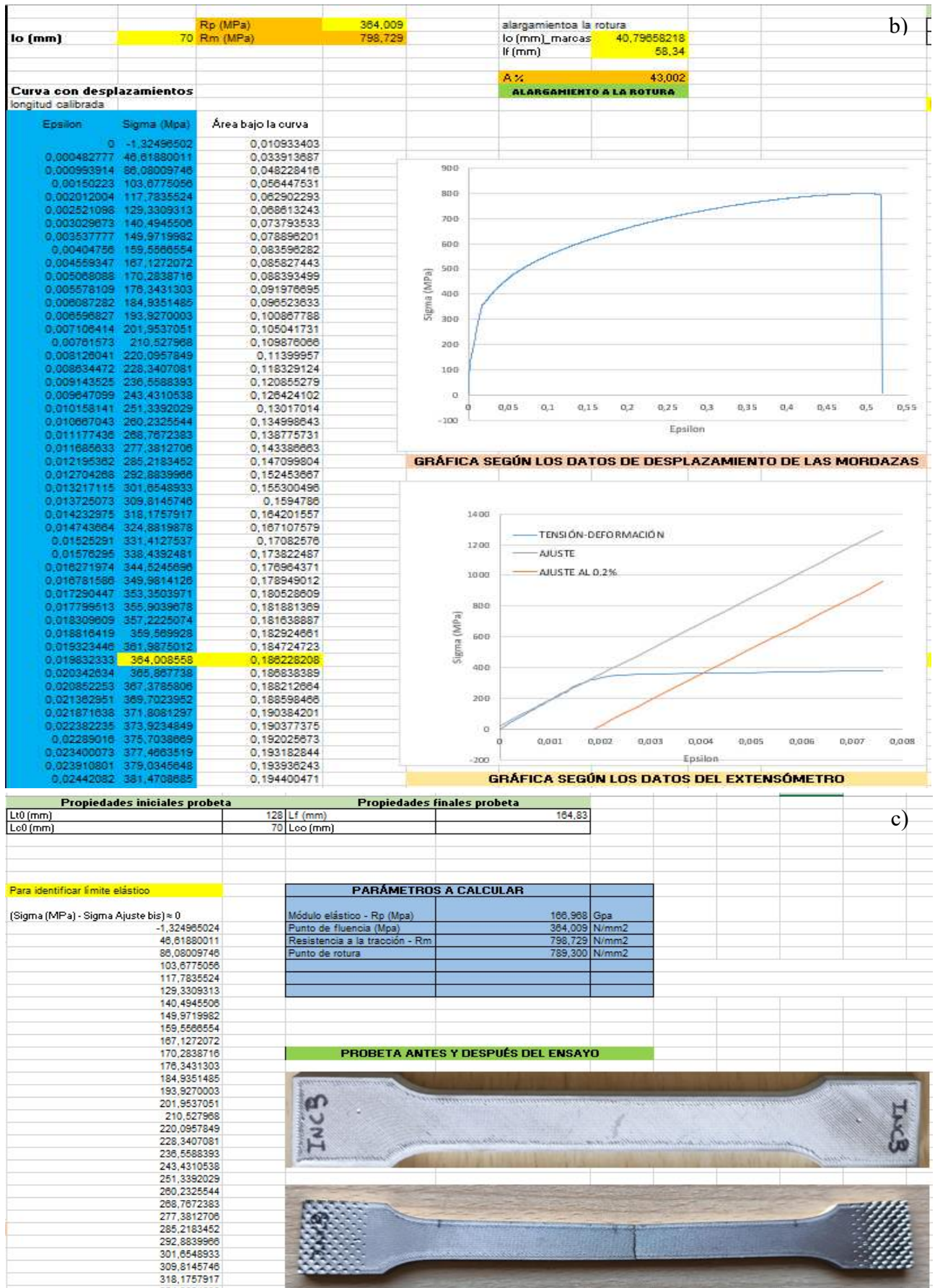


Figura 31.- a) Zona de la hoja de cálculo donde se realiza la aproximación al 0.2%, b) Representación de las gráficas tensión-deformación y c) Resumen resultados finales obtenidos [Fuente propia]

4.- PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez explicado todo el marco teórico en el que se centrará el consiguiente análisis de resultados, hay que indicar varias consideraciones iniciales a tener en cuenta antes del análisis final puesto que su conocimiento es de elevada importancia para entender algunos de los resultados que se ha obtenido y el por qué algunas cosas se han hecho de una manera diferente a las enunciadas anteriormente.

4.1.- Obtención de parámetros de estudio

4.1.1.- Cálculo del alargamiento a la rotura

En el caso del diseño de la probeta modelo 3 se indicó que la dimensión de L_0 debía presentar un valor mínimo de $L_0 = 40$ mm, todo ello considerando que el espesor y la anchura de la probeta fabricada se mantuviese constante. No obstante, se ha verificado que cada probeta que se ha fabricado presenta una anchura y un espesor no uniforme a lo largo del cuerpo de la probeta, lo que ha implicado que en algunos casos este valor L_0 fuese diferente de 40 mm. Tomando en cuenta lo anterior, se ha hecho el cálculo individual de cada una de las probetas en función del ancho medio y el espesor medio de cada una para obtener un parámetro denominado $L_{0\text{marcas}}$, el cual se puede definir como la longitud mínima entra marcas de la probeta fabricada. Dicha longitud se ha marcado en todas las probetas equidistante desde el punto medio, y en el lado izquierdo y el derecho, de manera simétrica, dejando siempre 5 mm desde el punto medio al lado más cercano, para tener una longitud de medida mayor por si la rotura de la probeta tras el ensayo no se producía en una zona cercana al punto medio (adjunto una imagen de unas de las probetas fabricadas antes de ensayar para observar mejor las marcas mencionadas).

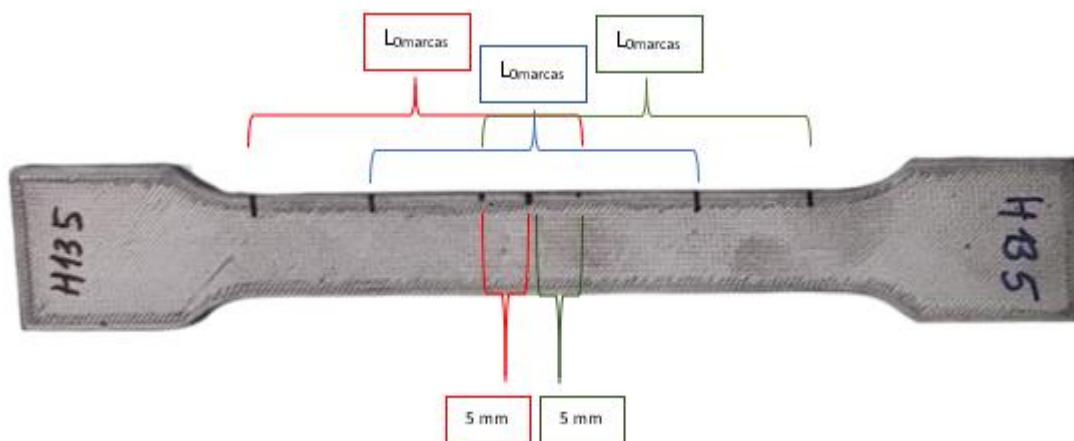


Figura 32.- Marcado de la probeta correspondiente al valor $L_{0\text{marcas}}$ [Fuente propia]

Si la probeta rompiese dentro de algunas de las 3 marcas realizadas (Figura 32) el alargamiento a la rotura se podría calcular midiendo la longitud final de las marcas (L_{fmarcas}) y comparándola con la longitud inicial ($L_{0\text{marcas}}$).

Por otro lado, se ha decidido utilizar como referencia este valor puesto que el valor del extensómetro, de valor $L_e = 50$ mm, no se llegó a marcar en cada una de las probetas antes de comenzar los ensayos y, además, en algunos casos que ya se comentarán más adelante, por problemas del software

empleado los valores de deformaciones obtenidas con el extensómetro no han sido representados correctamente.

Si por un caso la probeta rompiese en el radio de acuerdo o en la mordaza, se procedería del mismo modo midiendo una de las 3 longitudes marcadas, pero, obviamente, los valores no serían correctos, pero serviría para realizar una aproximación del posible valor que podría resultar del alargamiento de dicha probeta ensayada.

4.1.2.- Número de probetas ensayadas

En apartados anteriores se calculó que, para cumplir un coeficiente de fiabilidad de los resultados del 95%, se debían fabricar 5 probetas de cada material y orientación, es decir, 40 probetas en total. Sin embargo, debido a diversos problemas surgidos durante la fabricación y la realización de los ensayos, se han logrado fabricar lo siguiente:

- Acero inoxidable 17-4PH: Se han fabricado 4 con orientación 1 y 4 con orientación 2. Total: 8 probetas. De aquí hay que mencionar que se fabricaron dos probetas llamadas SS1 y SSC1, pero debido a que eran las primeras que se fabricaban y se ensayaban, no se dispone de los resultados del ensayo para poder analizarlas por lo que se ha decidido excluir ambas del estudio.
- Acero para herramienta A2: se han fabricado 5 con orientación 1 y 5 con orientación 2.
- Acero para herramienta H13: se han fabricado 6 con orientación 1 y 5 con orientación 2.
- Inconel 625: se han fabricado 4 con orientación 1 y 6 con orientación 2.

En total, se han fabricado y ensayado 39 probetas. Se ha decidido no fabricar más ni sustituir las que han salido mal puesto que, como ya se ha dicho en apartados anteriores, el proceso de fabricación es muy costoso y lento y, por tanto, se ha decidido estudiar y analizar únicamente todas las probetas que se han mencionado.

4.2.- Análisis de resultados

4.2.1.- Análisis y comparación de los resultados en función de la orientación con los teóricos

En el presente apartado se presenta de manera sistemática la recopilación y organización de todos los datos experimentales obtenidos durante la fase de ensayo, los cuales han sido previamente registrados y procesados mediante una hoja de cálculo de Microsoft Excel, específicamente diseñada para facilitar el análisis cuantitativo y comparativo de las propiedades de los materiales evaluados.

Los resultados consolidados han sido sintetizados en fichas técnicas individuales para cada material, que pueden consultarse en el anexo correspondiente de este documento. No obstante, con el fin de ofrecer una visión global y facilitar su posterior interpretación, en los siguientes apartados se procederá a la integración de todos estos datos en un cuerpo común. Esta recopilación conjunta permitirá abordar con mayor profundidad el análisis comparativo del comportamiento mecánico de

las diferentes probetas sometidas a estudio, en función de los distintos ensayos realizados, los cuales se detallarán en fases posteriores del estudio.

Es importante señalar que los valores obtenidos a partir de las mediciones experimentales serán promediados con el fin de reducir la variabilidad inherente al proceso y obtener una estimación representativa del comportamiento medio de cada material y también en función de su orientación de fabricación. Dichos valores medios se contrastarán, en primer lugar, con los valores teóricos proporcionados por el fabricante (véase Fichas de materiales adjuntas en el anexo del presente trabajo) para cada uno de los materiales utilizados en el presente trabajo, fabricados mediante tecnologías de fabricación aditiva.

Asimismo, se llevará a cabo una segunda comparación con valores teóricos correspondientes a los mismos materiales obtenidos mediante procesos de fabricación convencionales, no aditivos. Este contraste tiene por objetivo evaluar el grado de aproximación de las propiedades mecánicas alcanzadas mediante AM respecto a las que se logran con métodos tradicionales de manufactura, lo que permitirá valorar la eficacia y fiabilidad del proceso aditivo empleado.

Una vez contextualizado el enfoque analítico, a continuación, se presentan los resultados obtenidos en esta fase del estudio.

A.- Acero inoxidable 17-4PH

Los resultados y curvas obtenidas para las probetas de acero inoxidable 17-4PH en las hojas de cálculos de Microsoft Excel empleadas en el trabajo son los siguientes para cada parámetro de interés:

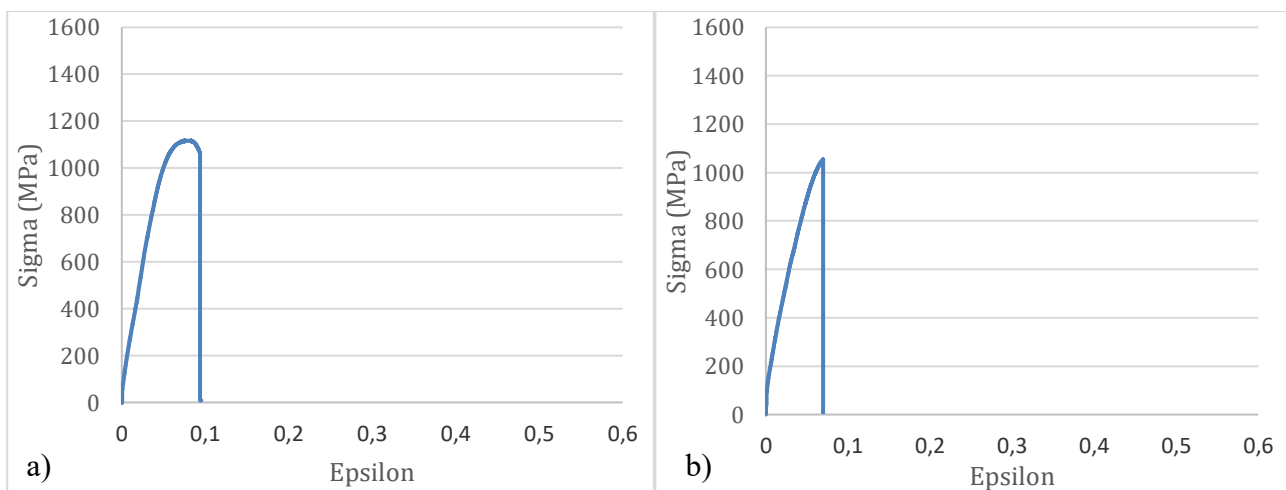


Figura 33.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) SS2 y b) SSC2 [Fuente propia]

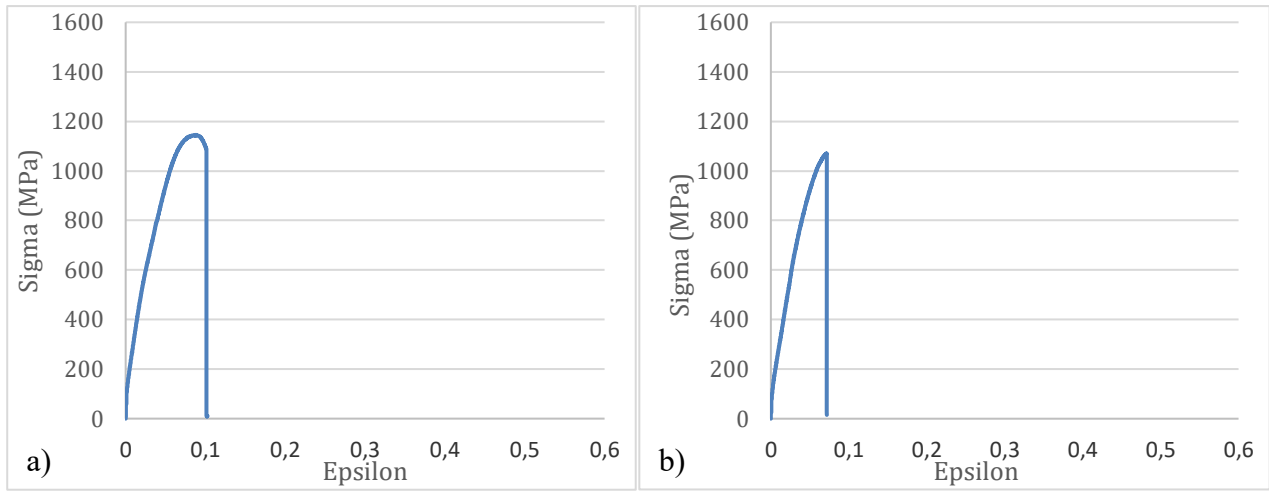


Figura 34.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) SS3 y b) SSC3 [Fuente propia]

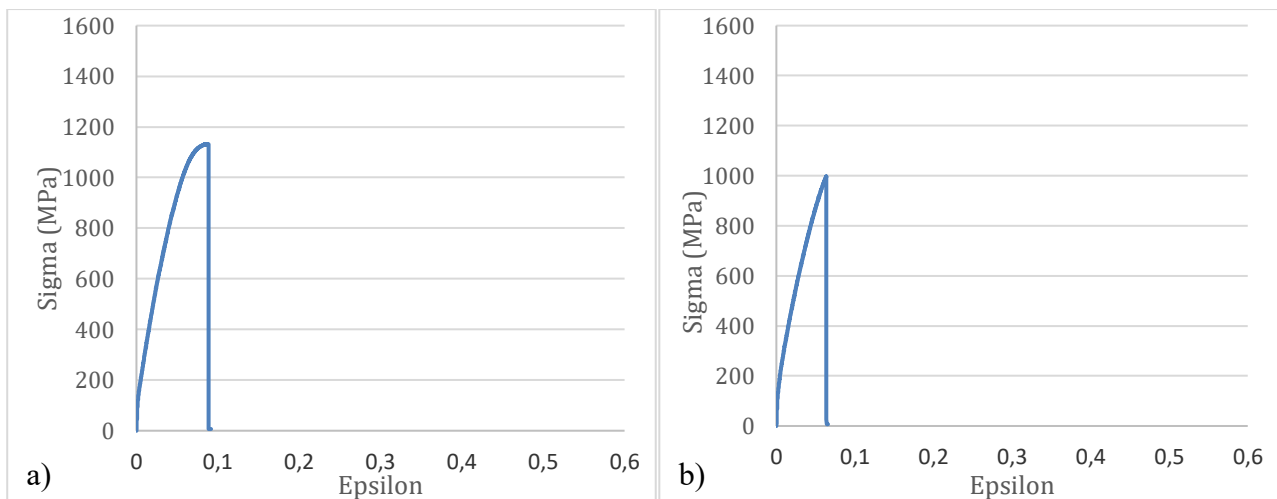


Figura 35.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) SS4 y b) SSC4 [Fuente propia]

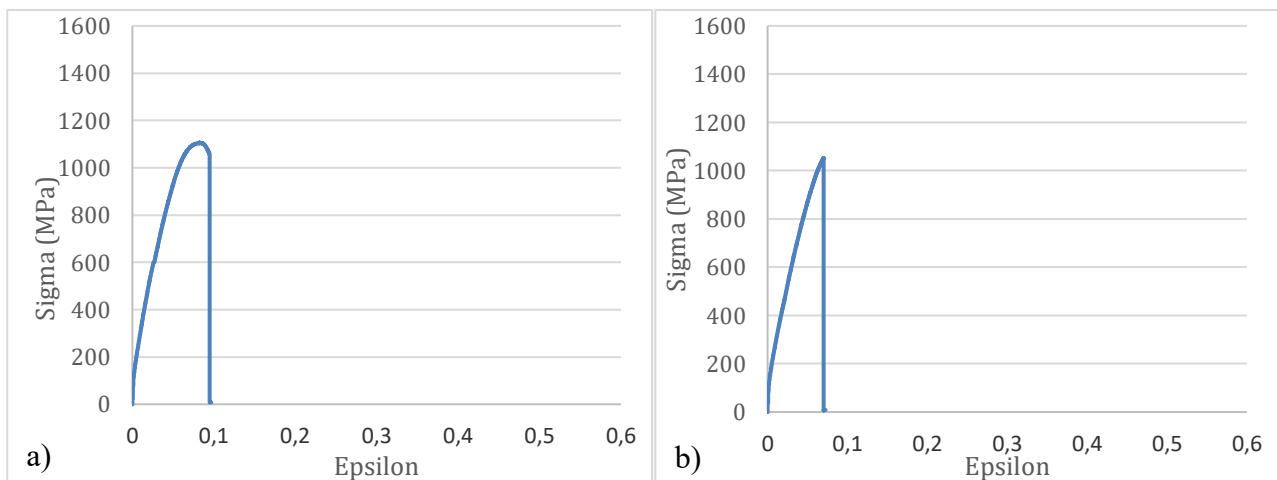


Figura 36.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) SS5 y b) SSC5 [Fuente propia]

Tabla 15.- Valores característicos calculados para las probetas planas de 17-4PH

		SS2	SS3	SS4	SS5	Media	SD (\pm)
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	138,08	155,27	151,78	146,21	147,84	6,49
Límite de Fluencia	R _p [MPa]	822,90	742,70	706,13	730,90	750,66	43,75
Resistencia a la Tracción	R _m [MPa]	1117,20	1144,46	1132,14	1105,40	1124,80	14,79
Límite de Rotura	R _u [MPa]	1062,39	1086,77	1131,18	1058,67	1084,75	28,90
Longitud final probeta	L _{tf} [mm]	134,96	133,53	132,56	133,02	133,51	0,90
Longitud entre marcas	L _{fmarcas} [mm]	43,12	42,68	43,08	43,29	43,04	0,22
Alargamiento a la rotura	A [%]	4,28	4,01	4,71	4,97	4,49	0,37

Tabla 16.- Valores característicos calculados para las probetas de canto de 17-4PH

		SSC2	SSC3	SSC4	SSC5	Media	SD (\pm)
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	158,25	159,36	159,58	175,75	163,24	7,24
Límite de Fluencia	R _p [MPa]	750,36	739,31	683,67	689,65	715,75	29,42
Resistencia a la Tracción	R _m [MPa]	1053,73	1069,23	997,53	1053,05	1043,38	27,25
Límite de Rotura	R _u [MPa]	1053,42	1068,89	997,53	1053,05	1043,22	27,14
Longitud final probeta	L _{tf} [mm]	130,46	131,20	130,37	130,62	130,66	0,32
Longitud entre marcas	L _{fmarcas} [mm]	42,51	42,90	42,80	42,34	42,63	0,22
Alargamiento a la rotura	A [%]	2,23	3,17	1,71	2,36	2,37	0,52

Los valores teóricos recogidos en la ficha de Markforged para el presente material y el teórico obtenido para otro proceso de fabricación diferente [34] son los siguientes (Tabla 17):

Tabla 17.- Valores teóricos de los parámetros a tener según Markforged y el teórico según otro fabricante para el mismo material, pero no en AM [34]

		AM Markforged (Teórico MF)	17-4PH laminado (no AM)
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	152	200
Límite de Fluencia	R _p [MPa]	710	860
Resistencia a la Tracción	R _m [MPa]	1180	930
Límite de Rotura	R _u [MPa]	---	---
Alargamiento a la rotura	A [%]	7	16-18

Teniendo en cuenta lo anterior, las gráficas quedarían de la siguiente manera:

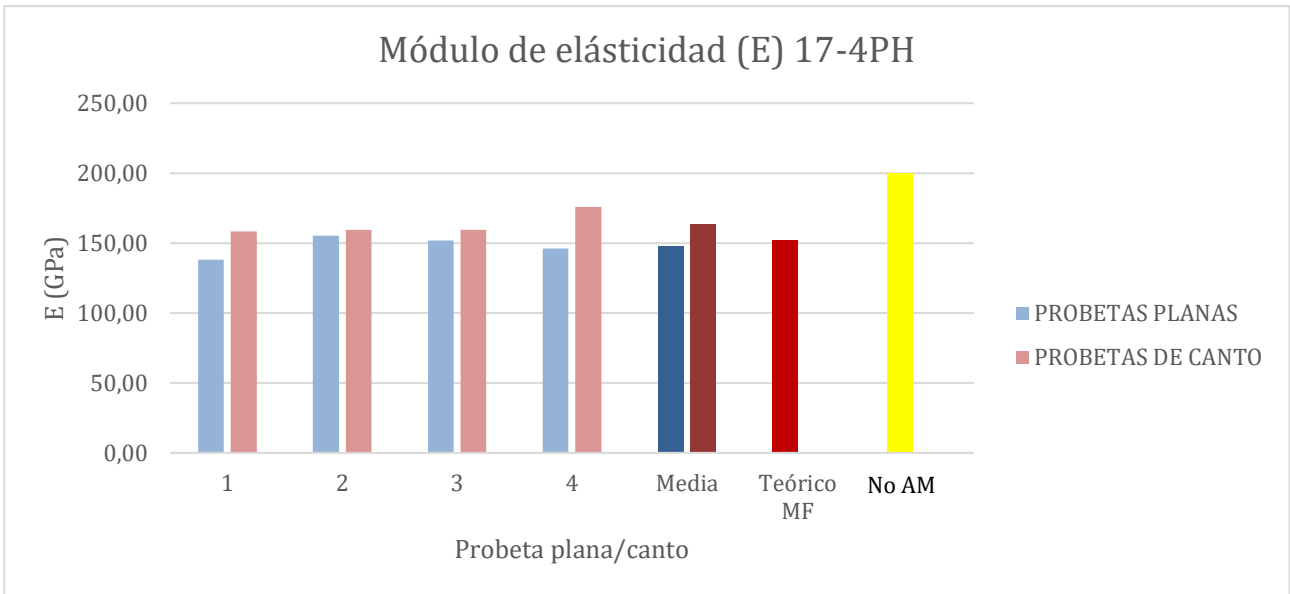


Figura 37.- Módulo de elasticidad medio, teórico y de cada probeta ensayada de 17-4PH [Fuente propia]

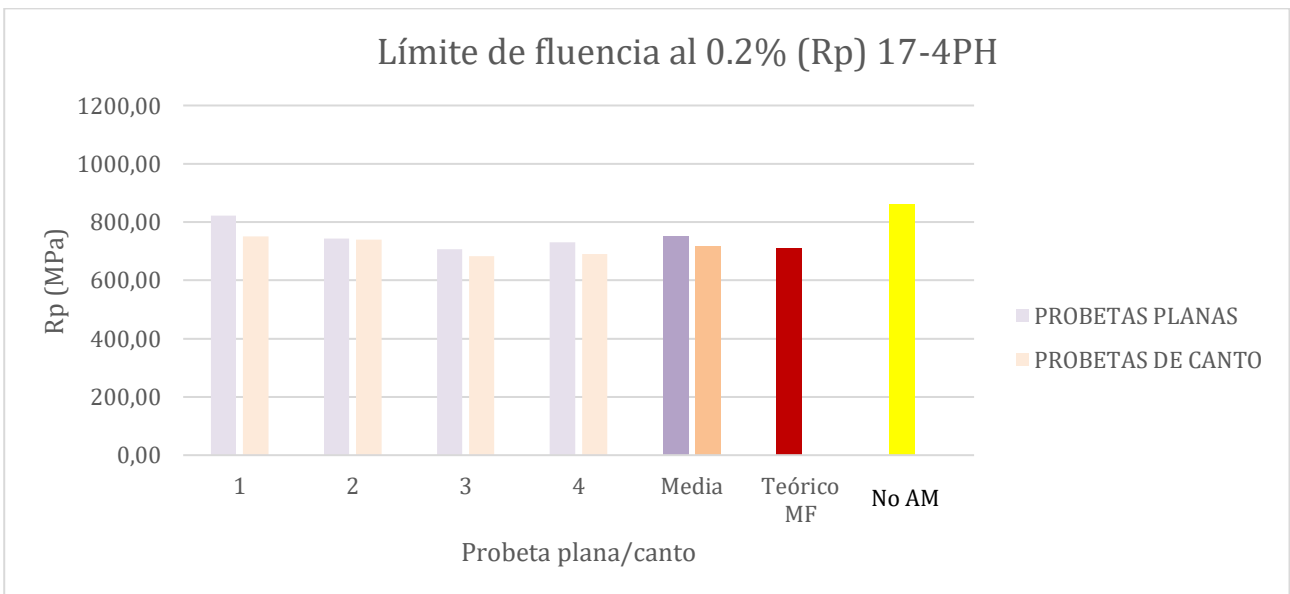


Figura 38.- Límite de fluencia Rp al 0.2% medio, teórico y de cada probeta ensayada de 17-4PH [Fuente propia]

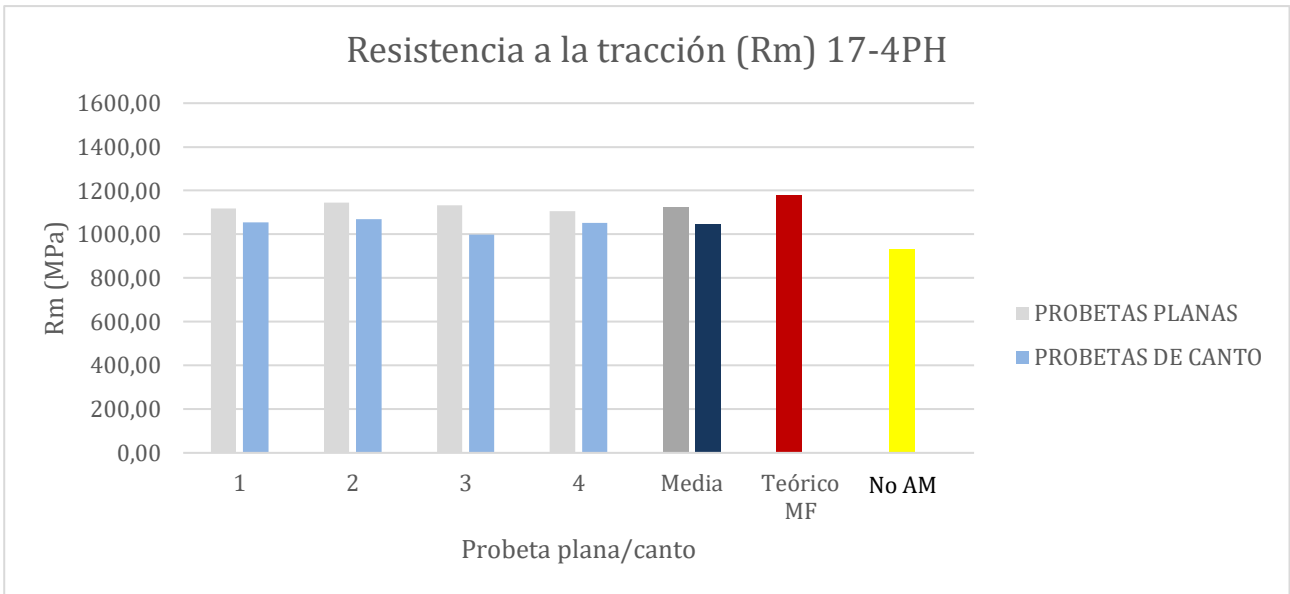


Figura 39.- Resistencia a la tracción Rm media, teórica y de cada probeta ensayada de 17-4PH [Fuente propia]

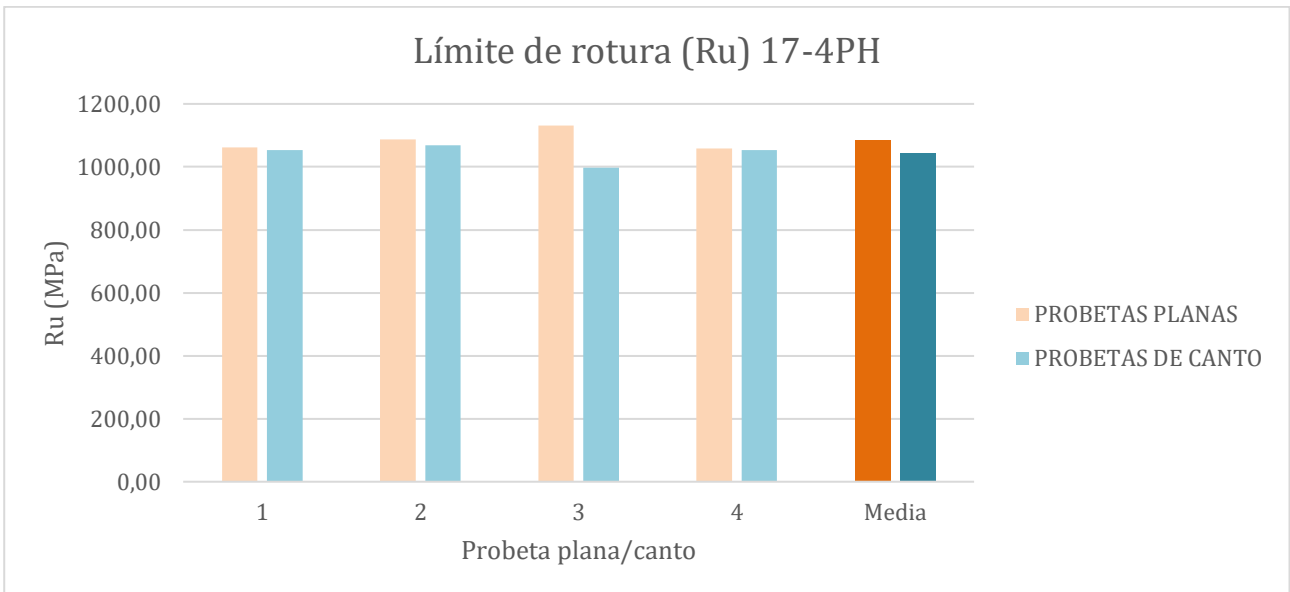


Figura 40.- Límite de rotura Ru medio, teórico y de cada probeta ensayada de 17-4PH [Fuente propia]

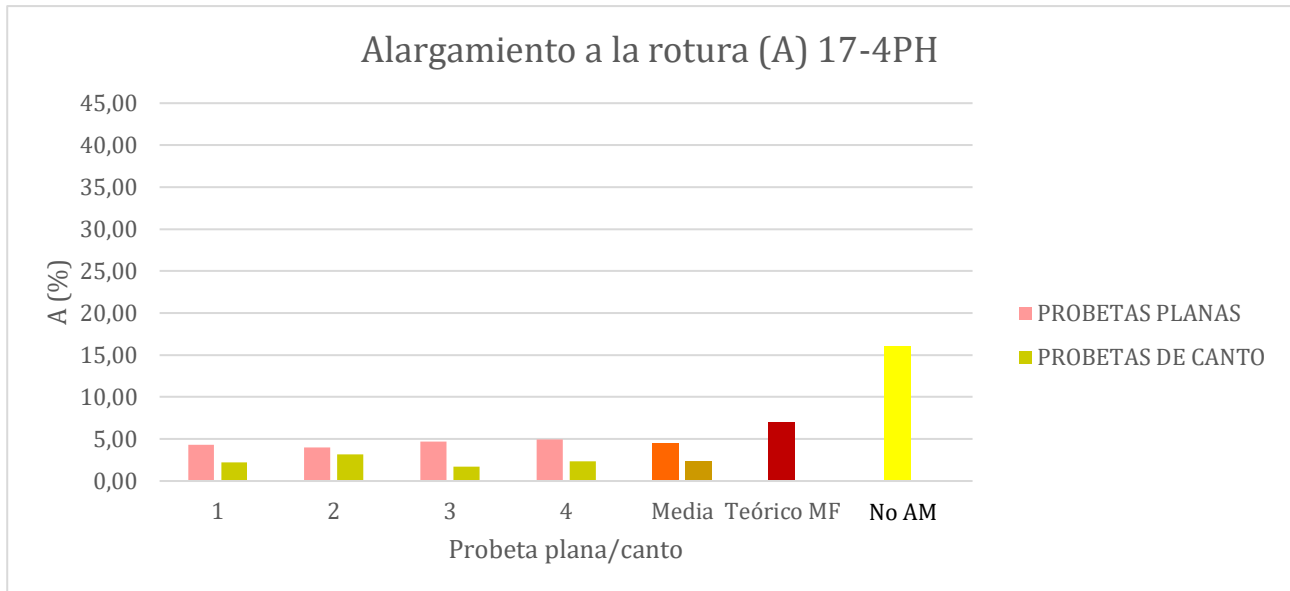


Figura 41.- Alargamiento a la rotura medio, teórico y de cada probeta ensayada de 17-4PH [Fuente propia]

De las gráficas anteriores presentadas (Figuras 37-41) se puede deducir lo siguiente:

Módulo de Elasticidad: en lo que respecta al análisis del módulo de elasticidad, los resultados obtenidos indican que las probetas fabricadas con orientación 2 (probetas de canto) presentan, en general, valores ligeramente superiores al módulo de elasticidad comparadas con las probetas fabricadas en orientación 1 (probetas planas). Esta tendencia se mantiene en prácticamente todos los casos, a excepción del par de probetas SSC5, donde se observa una diferencia más significativa. Por otro lado, respecto a la variación de los valores experimentales de los teóricos (Tabla 18), se observa que las probetas planas presentan unos valores más próximos al valor teórico de Markforged pero siempre por debajo, mientras que las probetas de canto presentan una desviación positiva del 4.11% al 15.63%. Por otra parte, si se amplía la comparación incluyendo el valor teórico del módulo de elasticidad del mismo acero producido mediante un proceso convencional, que asciende a 200 GPa, se observa que todos los módulos de elasticidad obtenidos experimentalmente, así como el valor teórico proporcionado por el fabricante Markforged, son significativamente inferiores a este valor de referencia. Hay que indicar que para la siguiente Tabla 14 y en las posteriores donde se van a recopilar datos similares, los valores de porcentaje se van a indicar **en verde** si el valor experimental es superior al teórico y **en rojo** si ocurre lo contrario.

Tabla 18.- Variación de los valores experimentales de E obtenidos en relación a los valores teóricos

Módulo de elasticidad (E) 17-4PH		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
SS2	-9,15	-30,96
SS3	2,15	-22,36
SS4	-0,14	-24,11
SS5	-3,81	-26,89
Media _{PLANAS}	-2,74	-26,08
SSC2	4,11	-20,87
SSC3	4,85	-20,32

SSC4	4,99	-20,21
SSC5	15,63	-12,12
MediaCANTO	7,40	-18,38

Límite de Fluencia al 0,2%: en cuanto a los resultados del límite de fluencia al 0,2% de deformación, el comportamiento observado es inverso al detectado en el módulo de elasticidad. El valor experimental máximo registrado se obtuvo en la probeta SS2, con un límite de fluencia de 822,90 MPa. Al analizar los valores medios, se constata esta tendencia: las probetas planas superan en promedio a las de canto. Sin embargo, al contrastar estos resultados con el valor teórico (Tabla 19) de límite de fluencia proporcionado por la ficha técnica de Markforged (710 MPa), se observa que las probetas de canto presentan una mayor proximidad al valor de referencia, mientras que las planas lo sobrepasan en todos los casos, salvo en SS4. Por otro lado, al comparar los valores obtenidos experimentalmente con el valor teórico del límite de fluencia al 0,2 % correspondiente a un proceso de fabricación convencional, se observa una tendencia similar a la ya mencionada para el módulo de elasticidad: los valores experimentales obtenidos son inferiores al valor teórico de 860 MPa. No obstante, existe una excepción destacable en el caso de la probeta SS2, cuyo valor experimental se encuentra muy próximo al límite de fluencia teórico asociado a dicho proceso tradicional de fabricación, no obstante, sigue siendo inferior en un -4.31%.

Tabla 19.- Variación de los valores experimentales de Rp obtenidos en relación a los valores teóricos

Límite de fluencia Rp al 0.2% (Rp) 17-4PH		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
SS2	15,90	-4,31
SS3	4,61	-13,64
SS4	-0,54	-17,89
SS5	2,94	-15,01
MediaPLANAS	5,73	-12,71
SSC2	5,68	-12,75
SSC3	4,13	-14,03
SSC4	-3,71	-20,50
SSC5	-2,87	-19,81
MediaCANTO	0,81	-16,77

Resistencia a la Tracción Máxima: en lo referente a la resistencia máxima a la tracción alcanzada durante los ensayos, se repite el patrón observado para el límite de fluencia: las probetas planas muestran valores superiores en todos los casos respecto a las probetas de canto. No obstante, al comparar estas medias experimentales con el valor teórico (Tabla 20) esperado (1180 MPa), se constata que tanto las probetas planas como las de canto presentan resistencias a tracción inferiores a la teórica. En relación con el valor teórico de resistencia máxima a la tracción del acero 17-4PH obtenido mediante un proceso de fabricación convencional (930 MPa), se observa una tendencia opuesta a la detectada en los parámetros anteriores. En este caso, tanto los valores proporcionados por el fabricante para fabricación aditiva como los resultados obtenidos en los ensayos experimentales

superan dicho valor teórico en un 7.26% como mínimo. Es decir, en todos los casos analizados, la resistencia máxima a la tracción resultante es mayor que la del proceso convencional.

Tabla 20.- Variación de los valores experimentales de Rm obtenidos en relación a los valores teóricos

Resistencia máxima a la tracción (Rm) 17-4PH		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
SS2	-5,32	20,13
SS3	-3,01	23,06
SS4	-4,06	21,74
SS5	-6,32	18,86
Media _{PLANAS}	-4,68	20,95
SSC2	-10,70	13,30
SSC3	-9,39	14,97
SSC4	-15,46	7,26
SSC5	-10,76	13,23
Media _{CANTO}	-11,58	12,19

Límite de Rotura: respecto al límite de rotura, es decir, el punto final antes de la fractura del material, se observa que los valores obtenidos son bastante consistentes entre todas las probetas, independientemente de su orientación de fabricación. Sin embargo, se identifican excepciones significativas en los casos de las probetas SS4 y SSC4, donde se detecta una discrepancia algo más notable respecto al resto de las muestras (Tabla 21). A pesar de estas variaciones puntuales, los valores medios de ambas orientaciones (plana y de canto) solo se diferencian en un 3.98%, siendo el de las planas por lo general mayores.

Tabla 21.- Variación de los valores experimentales de Ru obtenidos entre pares de probetas

Límite de rotura (Ru) 17-4PH	
Probeta	Variación entre par de probetas (%)
SS2/SSC2	0,85
SS3/SSC3	3,17
SS4/SSC4	5,83
SS5/SSC5	0,53
Media _{PLANAS} / Media _{CANTO}	3,98

Alargamiento a la Rotura: finalmente, en lo relativo al alargamiento a la rotura se concluye que las probetas planas han registrado valores superiores de deformación en comparación con las probetas de canto. No obstante, al comparar estos resultados con el valor teórico de referencia (Tabla 22) estimado en un 7% según la documentación técnica de Markforged, se evidencia que los valores medios obtenidos en ambos tipos de probetas se encuentran por debajo del alargamiento esperado (mínimo un -29.03% por debajo). En comparación con el valor teórico de alargamiento a la rotura asociado a un proceso de fabricación convencional (16–18%), se observa que, en todos los casos

analizados, los valores obtenidos experimentalmente resultan aún más inferiores al rango teórico establecido para dicho proceso.

Tabla 22.- Variación de los valores experimentales de A obtenidos en relación a los valores teóricos

Alargamiento a la rotura (A) 17-4PH		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
SS2	-38,80	-73,23
SS3	-42,66	-74,91
SS4	-32,64	-70,53
SS5	-29,03	-68,95
Media _{PLANAS}	-35,78	-71,90
SSC2	-68,04	-86,02
SSC3	-54,64	-80,16
SSC4	-75,46	-89,26
SSC5	-66,24	-85,23
Media _{CANTO}	-66,10	-85,17

B.- Acero para herramientas A2

Los resultados y curvas obtenidas para las probetas de acero para herramientas A2 en las hojas de cálculos de Microsoft Excel empleadas en el trabajo son los siguientes para cada parámetro de interés:

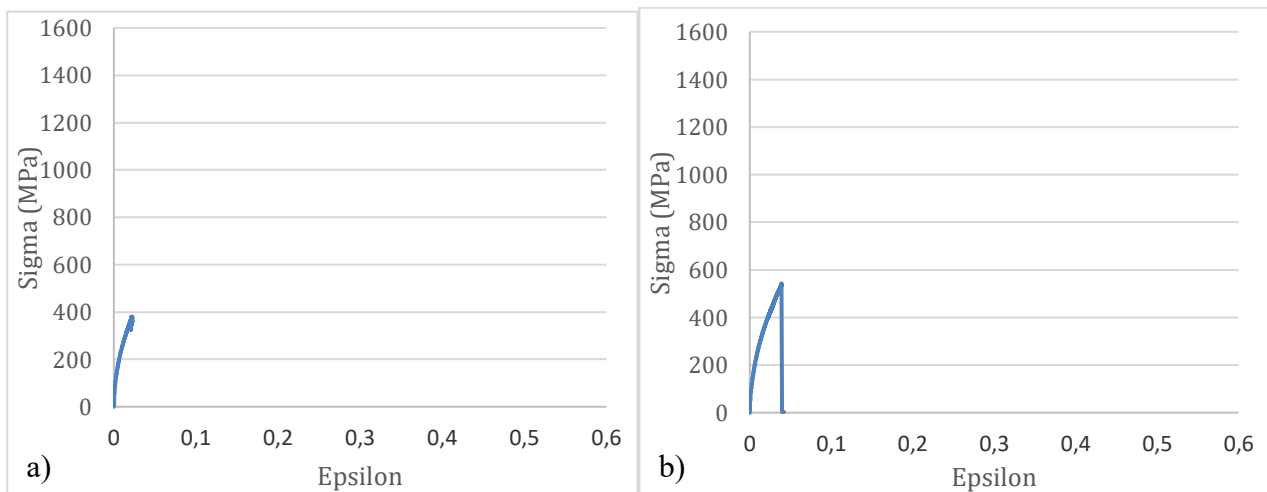


Figura 42.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) A21 y b) A2C1 [Fuente propia]

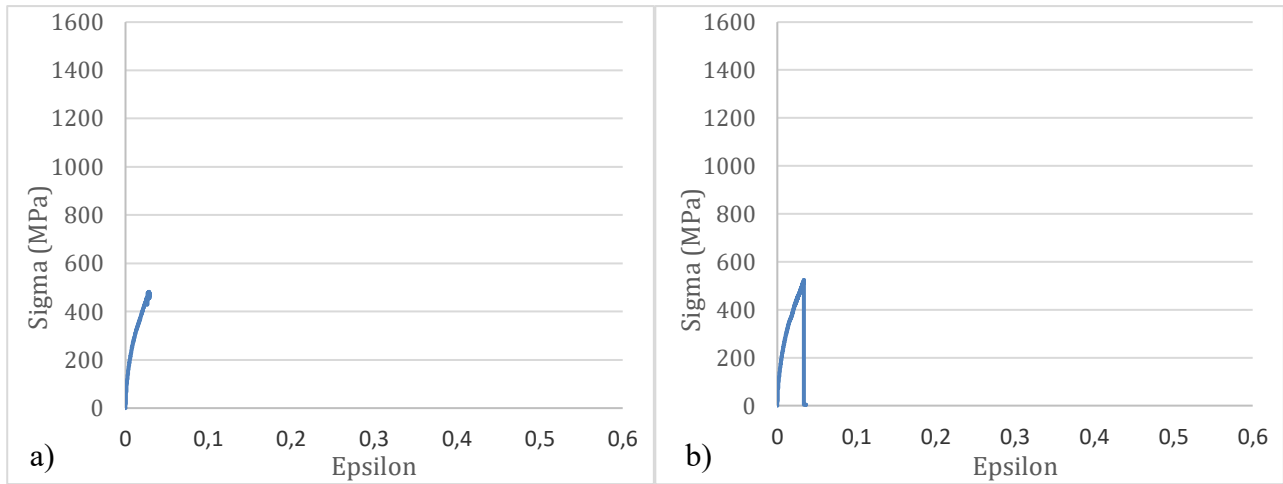


Figura 43.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) A22 y b) A2C2 [Fuente propia]

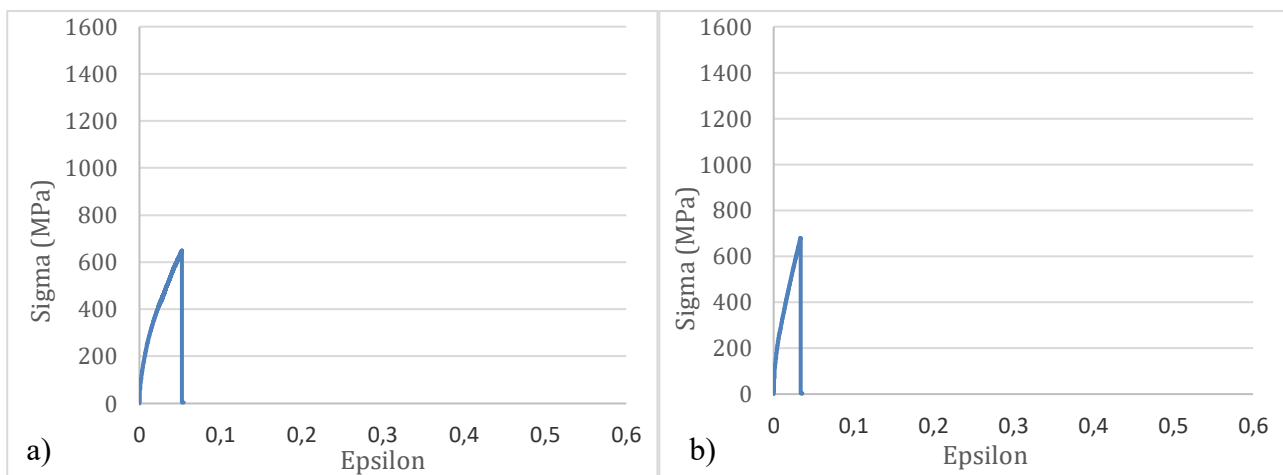


Figura 44.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) A23 y b) A2C3 [Fuente propia]

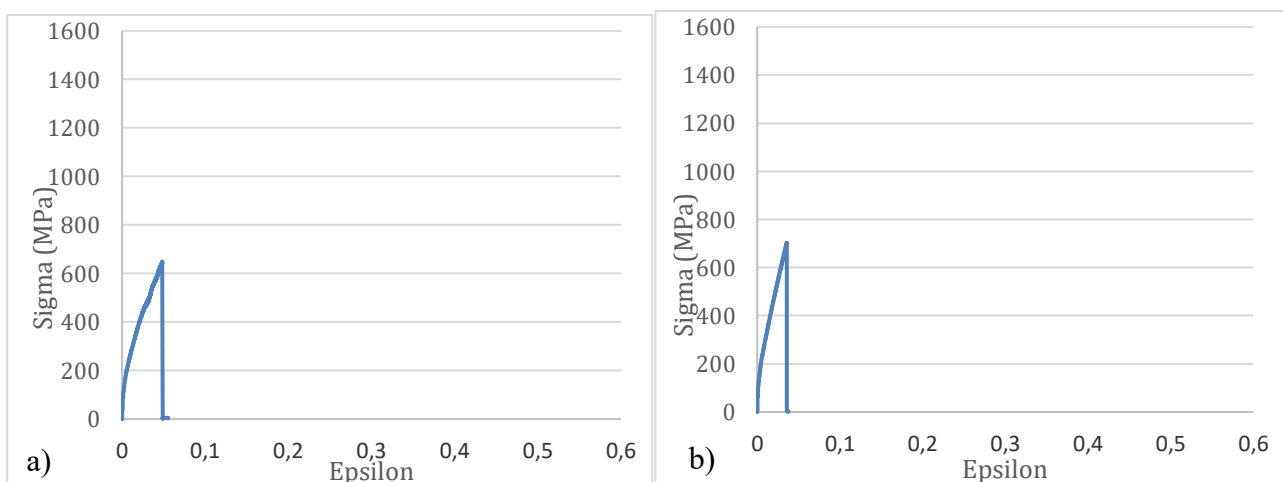


Figura 45.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) A24 y b) A2C4 [Fuente propia]

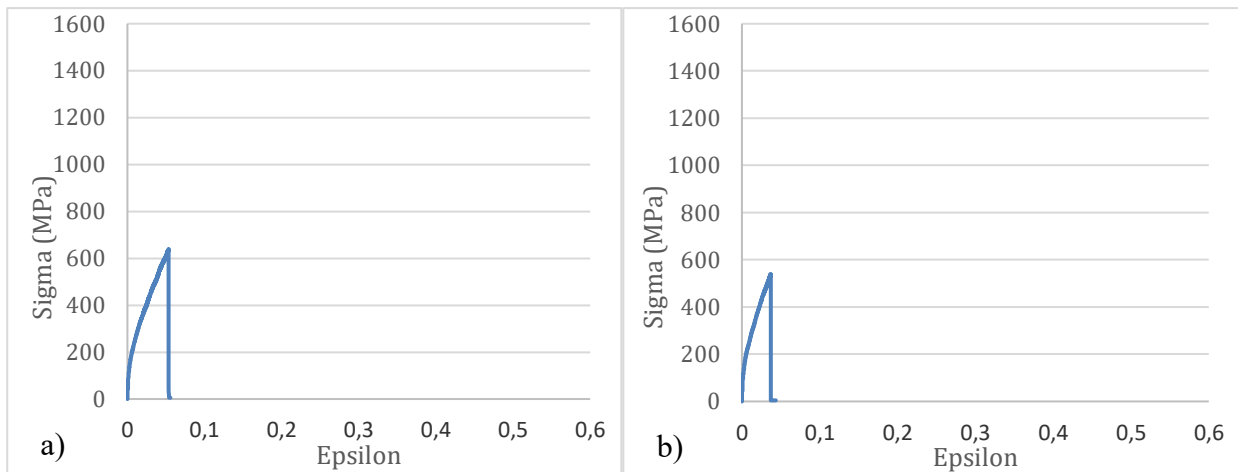


Figura 46.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) A25 y b) A2C5 [Fuente propia]

Tabla 23.- Valores característicos calculados para las probetas planas de A2

		A21	A22	A23	A24	A25	Media	SD (\pm)
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	157,38	117,94	197,66	142,36	110,96	145,26	31,06
Límite de Fluencia	R_p [MPa]	301,39	347,60	352,77	297,89	269,38	313,81	31,75
Resistencia a la Tracción	R_m [MPa]	380,25	482,02	649,38	648,51	638,40	559,71	109,87
Límite de Rotura	R_u [MPa]	359,23	463,20	648,72	648,15	633,00	550,46	118,48
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	132,82	132,76	131,80	131,88	131,91	132,23	0,45
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41,75	41,64	41,96	41,36	41,37	41,61	0,22
Alargamiento a la rotura	A [%]	0,14	0,96	0,78	0,79	0,81	0,70	0,28

Tabla 24.- Valores característicos calculados para las probetas de canto de A2

		A2C1	A2C2	A2C3	A2C4	A2C5	Media	SD (\pm)
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	160,85	165,29	172,72	165,11	171,24	167,04	4,35
Límite de Fluencia	R_p [MPa]	327,50	345,32	421,00	410,05	293,55	359,48	48,81
Resistencia a la Tracción	R_m [MPa]	543,40	523,41	679,13	702,61	538,13	597,34	77,00
Límite de Rotura	R_u [MPa]	543,40	520,20	679,13	702,61	532,14	595,50	78,56
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	131,15	131,12	130,35	130,40	131,10	130,82	0,36
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	42,34	41,74	41,26	41,11	41,42	41,57	0,43
Alargamiento a la rotura	A [%]	0,85	0,78	0,80	0,83	0,92	0,84	0,04

Los valores teóricos recogidos en la ficha de Markforged para el presente material y el teórico obtenido para otro proceso de fabricación diferente [35] son los siguientes (Tabla 25):

Tabla 25.- Valores teóricos de los parámetros a tener según Markforged y el teórico según otro fabricante para el mismo material, pero no en AM [35]

		AM Markforged (Teórico MF)	A2 laminado (no AM)
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	160	170
Límite de Fluencia	R_p [MPa]	450	1100
Resistencia a la Tracción	R_m [MPa]	700	1170
Límite de Rotura	R_u [MPa]	---	---
Alargamiento a la rotura	A [%]	---	---

Antes de proceder con el análisis de los resultados experimentales obtenidos en los ensayos realizados sobre las probetas fabricadas con acero para herramientas tipo A2, es necesario realizar una aclaración técnica relevante. Este material, según la información proporcionada en la ficha técnica oficial del fabricante Markforged (ANEXO 1.- Fichas técnicas), no está específicamente diseñado ni recomendado para ensayos de tracción. En efecto, el fabricante no proporciona datos ni curvas de comportamiento mecánico bajo esfuerzos de tracción, sino que orienta su caracterización principalmente hacia ensayos de compresión.

Esta ausencia de información técnica relativa a ensayos de tracción implica que el comportamiento del acero A2 bajo este tipo de carga puede no ajustarse a las expectativas convencionales de materiales metálicos, pudiendo presentar respuestas atípicas, dispersión en los datos o incluso comportamientos no representativos debido a su estructura interna y a las condiciones del proceso de fabricación aditiva empleado (FDM con sinterizado posterior).

A pesar de ello, con el objetivo de ampliar el conocimiento sobre el rendimiento de este material y explorar sus posibles aplicaciones más allá de lo estipulado por el fabricante, se han realizado ensayos de tracción cuyas observaciones y resultados se presentan a continuación. No obstante, es importante destacar que las conclusiones que se extraigan deben interpretarse con cautela, teniendo en cuenta las limitaciones mencionadas. Las implicaciones derivadas de esta consideración serán tratadas de forma más detallada en el apartado final de esta memoria.

Teniendo en cuenta lo anterior, las gráficas quedarían de la siguiente manera:

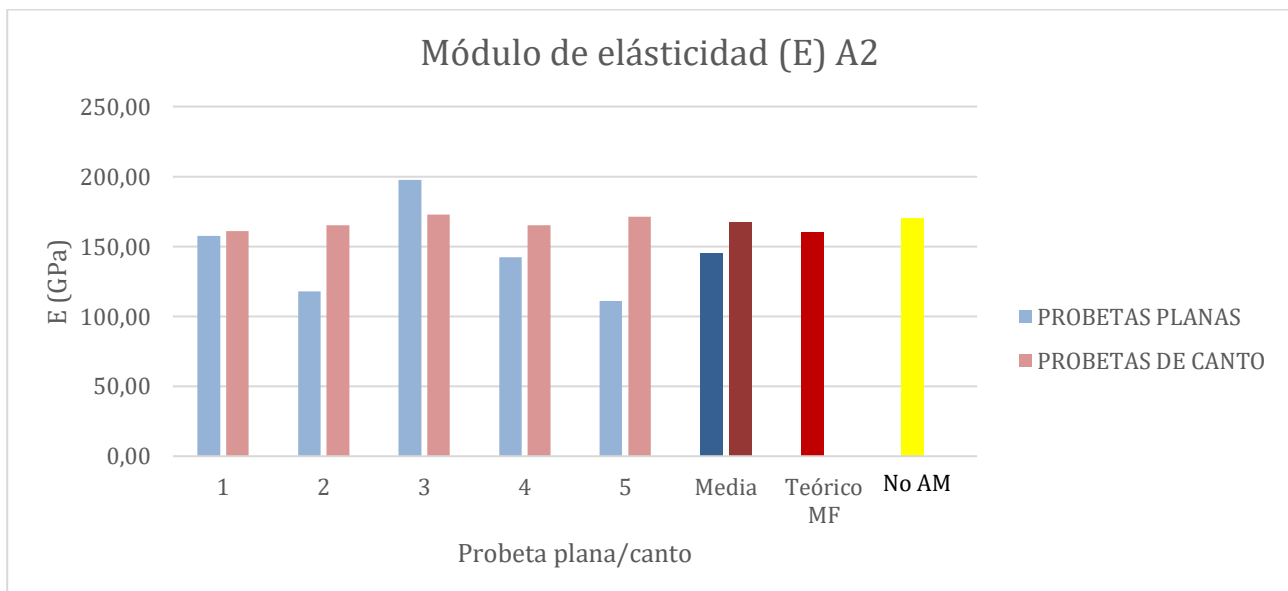


Figura 47.- Módulo de elasticidad medio, teórico y de cada probeta ensayada de A2 [Fuente propia]

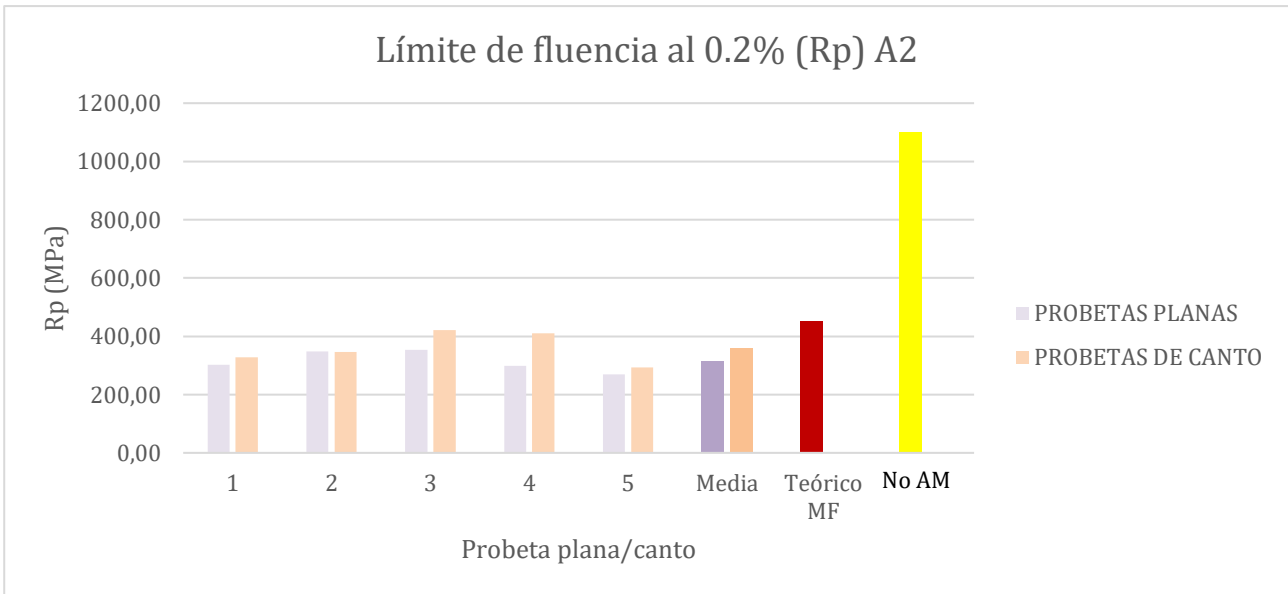


Figura 48.- Límite de fluencia Rp al 0.2% medio, teórico y de cada probeta ensayada de A2 [Fuente propia]

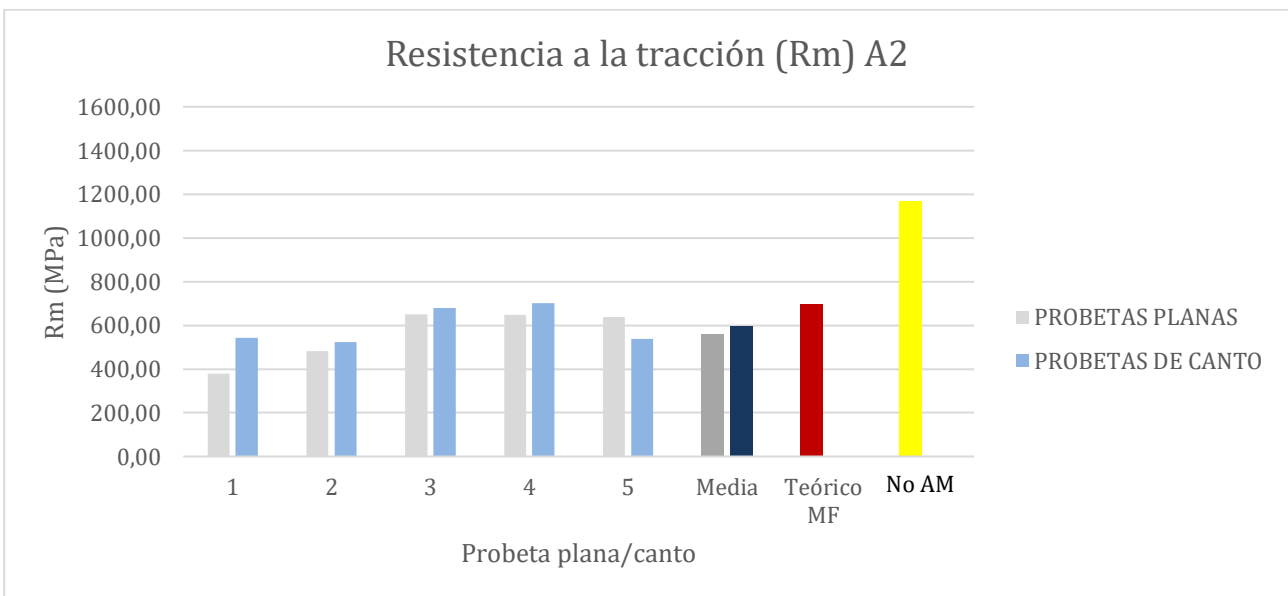


Figura 49.- Resistencia a la tracción Rm media, teórica y de cada probeta ensayada de A2 [Fuente propia]

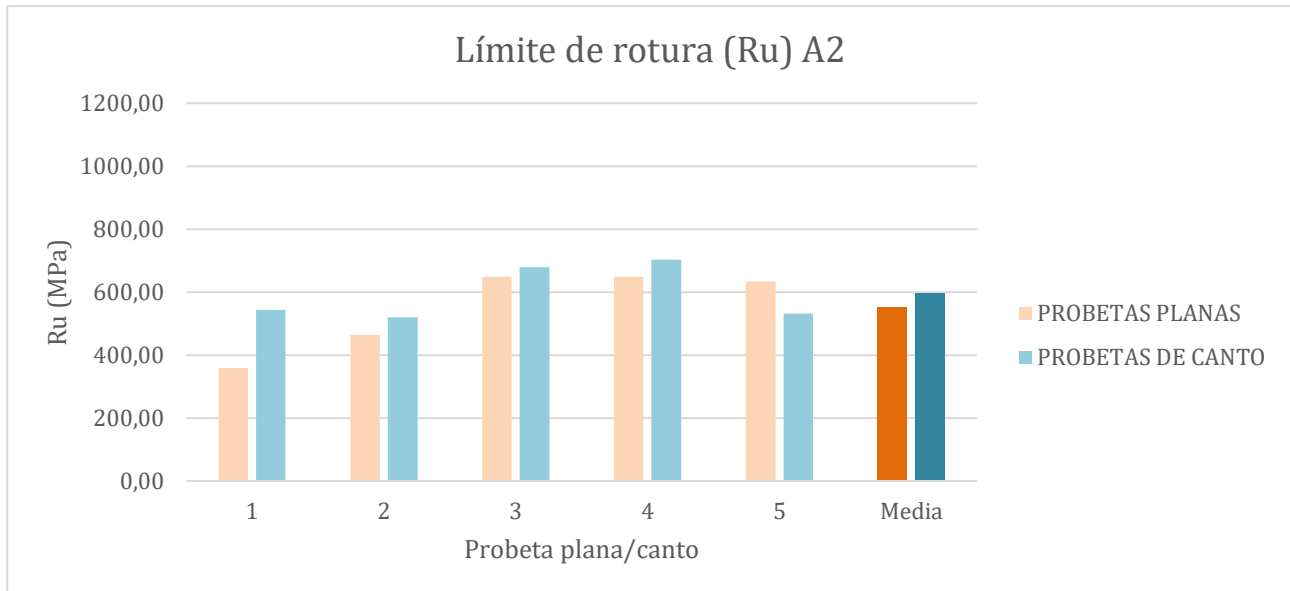


Figura 50.- Límite de rotura Ru medio, teórico y de cada probeta ensayada de A2 [Fuente propia]

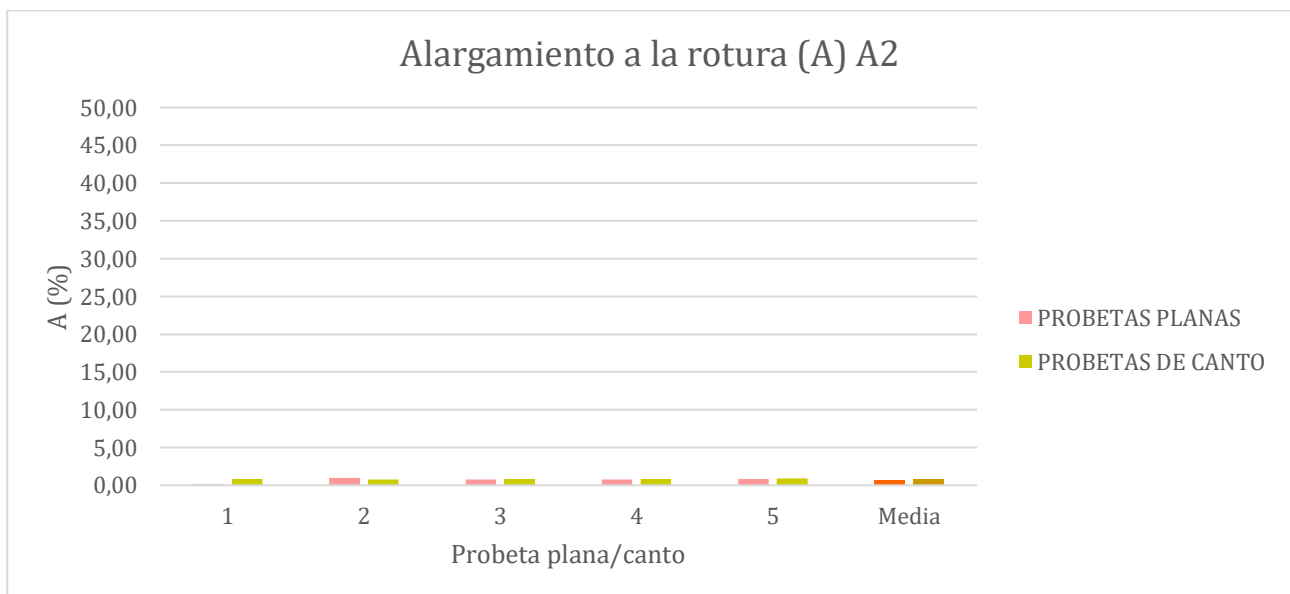


Figura 51.- Alargamiento a la rotura medio, teórico y de cada probeta ensayada de A2 [Fuente propia]

De las gráficas anteriores presentadas (Figuras 47-51) se puede deducir lo siguiente:

Módulo de Elasticidad: en lo que respecta al análisis del módulo de elasticidad del acero A2, se ha podido comprobar un comportamiento similar al observado previamente en las probetas de acero inoxidable 17-4PH. En general, los valores obtenidos para las probetas con orientación de canto han resultado ser superiores a los de las probetas planas. Una excepción destacable a esta tendencia es la probeta A23, correspondiente a una probeta plana, que presentó el valor más elevado registrado en este conjunto de ensayos. Sin embargo, al calcular la media de los valores según la orientación de fabricación, se observa que el promedio del módulo de elasticidad de las probetas de canto es superior al de las planas. Además, esta media (Tabla 26) se aproxima con mayor exactitud al valor teórico esperado para este material, el cual es de aproximadamente 160 GPa. En relación con el valor teórico del módulo de elasticidad para un proceso de fabricación convencional, se observa que los resultados

obtenidos se aproximan en general a los 170 GPa aunque obviamente son todos inferiores. Incluso el valor proporcionado por Markforged muestra una gran similitud con dicho valor teórico.

Tabla 26.- Variación de los valores experimentales de E obtenidos en relación a los valores teóricos

Módulo de elasticidad (E) acero para herramientas A2		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
A21	-1,64	-7,42
A22	-26,29	-30,62
A23	23,54	16,27
A24	-11,02	-16,26
A25	-30,65	-34,73
Media _{PLANAS}	-9,21	-14,55
A2C1	0,53	-5,38
A2C2	3,31	-2,77
A2C3	7,95	1,60
A2C4	3,20	-2,87
A2C5	7,03	0,73
Media _{CANTO}	4,40	-1,74

Límite de Fluencia al 0,2%: se constata nuevamente una tendencia favorable en las probetas fabricadas con orientación de canto. En la mayoría de las comparaciones entre pares de probetas de diferentes orientaciones, los valores del límite de fluencia fueron superiores en las probetas de canto. El valor máximo de este parámetro se registró en la probeta A2C3, con un valor de 421 MPa. Sin embargo, al comparar las medias obtenidas con el valor teórico de referencia (Tabla 27) proporcionado por el fabricante, que asciende a 450 MPa, se evidencia una desviación significativa. Por el contrario, al analizar el valor del límite elástico al 0,2 % correspondiente a un proceso de fabricación convencional, se observa una diferencia significativa respecto a los valores obtenidos experimentalmente. En todos los casos analizados, los resultados experimentales se sitúan muy por debajo, mínimo un -61.73%, del valor teórico establecido, que es de 1100 MPa. Esta discrepancia es tan marcada que incluso el valor teórico proporcionado por el fabricante Markforged para piezas obtenidas mediante fabricación aditiva se aleja notablemente de dicho valor convencional.

Tabla 27.- Variación de los valores experimentales de Rp obtenidos en relación a los valores teóricos

Límite de fluencia al 0.2 % (Rp) acero para herramientas A2		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
A21	-33,02	-72,60
A22	-22,75	-68,40
A23	-21,61	-67,93
A24	-33,80	-72,92
A25	-40,14	-75,51
Media _{PLANAS}	-30,26	-71,47

A2C1	-27,22	-70,23
A2C2	-23,26	-68,61
A2C3	-6,44	-61,73
A2C4	-8,88	-62,72
A2C5	-34,77	-73,31
Media _{CANTO}	-20,11	-67,32

Resistencia a la Tracción Máxima: en cuanto a la resistencia máxima a la tracción alcanzada antes de la rotura, los resultados individuales reflejan una ligera ventaja de las probetas de canto frente a las planas. No obstante, al observar las medias agrupadas por orientación, la diferencia entre ambas no resulta especialmente relevante, siendo bastante cercana. De todos modos, al contrastar estas medias con el valor teórico (Tabla 28) de referencia para el acero A2, que es de aproximadamente 700 MPa, se confirma que los valores experimentales se sitúan claramente por debajo de lo establecido por el fabricante menos para la probeta A2C4 cuyo valor lo supera en un 0.37%. Al realizar una comparación global entre los resultados obtenidos mediante fabricación aditiva y los valores teóricos correspondientes a un proceso de fabricación convencional, se aprecia una tendencia clara y constante: los valores experimentales obtenidos son notablemente inferiores en todos los casos analizados. Esta diferencia es especialmente significativa si se tiene en cuenta lo observado también en el parámetro del límite elástico o de fluencia, donde ya se había detectado una disminución considerable respecto al valor teórico convencional.

Tabla 28.- Variación de los valores experimentales de Rm obtenidos en relación a los valores teóricos

Resistencia máxima a la tracción (Rm) acero para herramientas A2		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
A21	-45,68	-67,50
A22	-31,14	-58,80
A23	-7,23	-44,50
A24	-7,36	-44,57
A25	-8,80	-45,44
Media _{PLANAS}	-20,04	-52,16
A2C1	-22,37	-53,55
A2C2	-25,23	-55,26
A2C3	-2,98	-41,95
A2C4	0,37	-39,95
A2C5	-23,12	-54,01
Media _{CANTO}	-14,67	-48,95

Límite de Rotura: el análisis del límite de rotura pone de manifiesto una diferencia más acusada entre orientaciones que la observada en el caso del acero inoxidable 17-4PH. En casi todos los pares de probetas evaluadas (Tabla 29), se observa que las probetas de canto presentan un límite de rotura superior al de las planas, a excepción del conjunto A25/A2C5, donde esta relación se invierte. A pesar de ello, los valores promedio para ambas orientaciones resultan bastante próximos entre sí, aunque ligeramente superiores en el caso de las probetas de canto, concretamente de media un 7.56% mayor.

Tabla 29.- Variación de los valores experimentales de Ru obtenidos entre pares de probetas

Límite de rotura (Ru) acero para herramientas A2	
Probeta	Variación entre par de probetas (%)
A21/A2C1	-33,89
A22/A2C2	-10,96
A23/A2C3	-4,48
A24/A2C4	-7,75
A25/A2C5	18,95
Media _{PLANAS} / Media _{CANTO}	-7,56

Alargamiento a la Rotura: los valores obtenidos para este parámetro han sido muy reducidos (Tabla 30) en todos los casos, tanto en probetas planas como en probetas de canto. Lo cual se puede ver en la tabla 26 donde, por lo general, los valores de alargamiento a la rotura de las probetas de canto son mayores menos en el caso del par de probetas A22/A2C2 donde el valor de A de A22 es mayor en un 22.65% a su equivalente de canto.

Tabla 30.- Variación de los valores experimentales de A obtenidos entre pares de probetas

Alargamiento a la rotura (A) acero para herramientas A2	
Probeta	Variación entre par de probetas (%)
A21/A2C1	-82,53
A22/A2C2	22,65
A23/A2C3	-2,73
A24/A2C4	-4,90
A25/A2C5	-10,98
Media _{PLANAS} / Media _{CANTO}	-16,43

C.- Acero para herramientas H13

Los resultados y curvas obtenidas para las probetas de acero para herramienta H13 en las hojas de cálculos de Microsoft Excel empleadas en el trabajo son los siguientes para cada parámetro de interés:

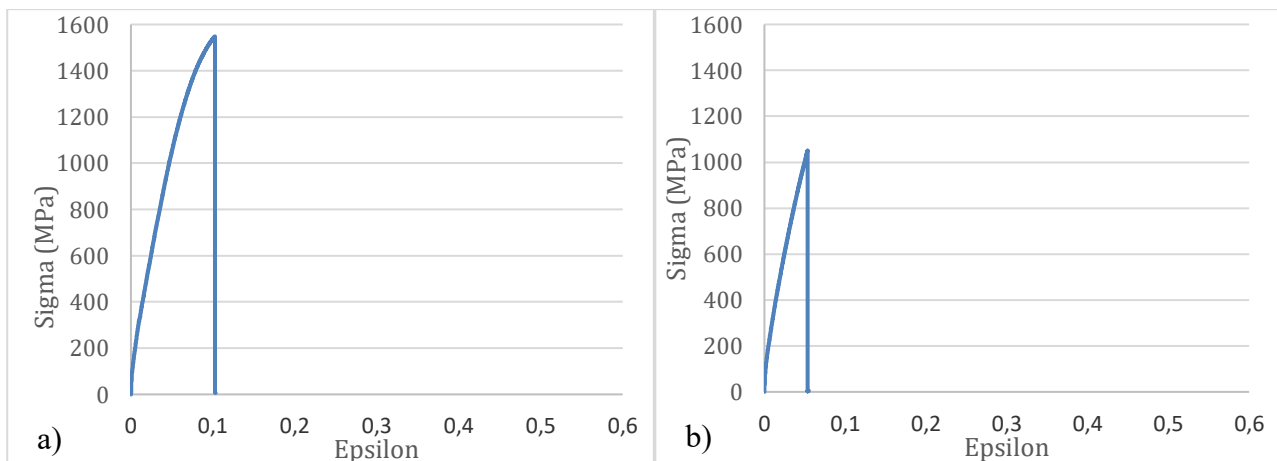


Figura 52.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) H131 y b) H13C1 [Fuente propia]

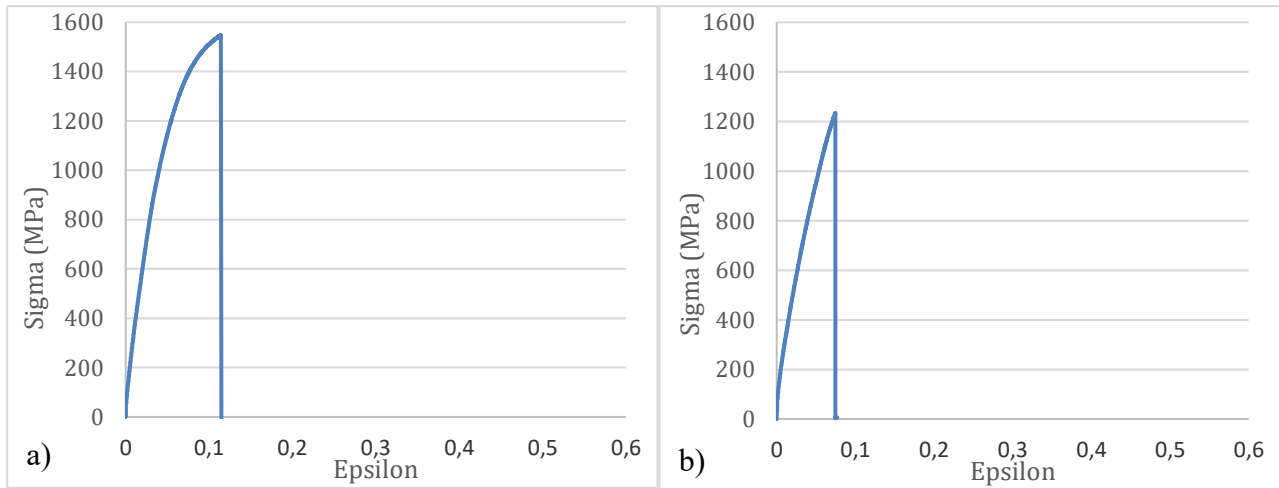


Figura 53.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) H132 y b) H13C2 [Fuente propia]

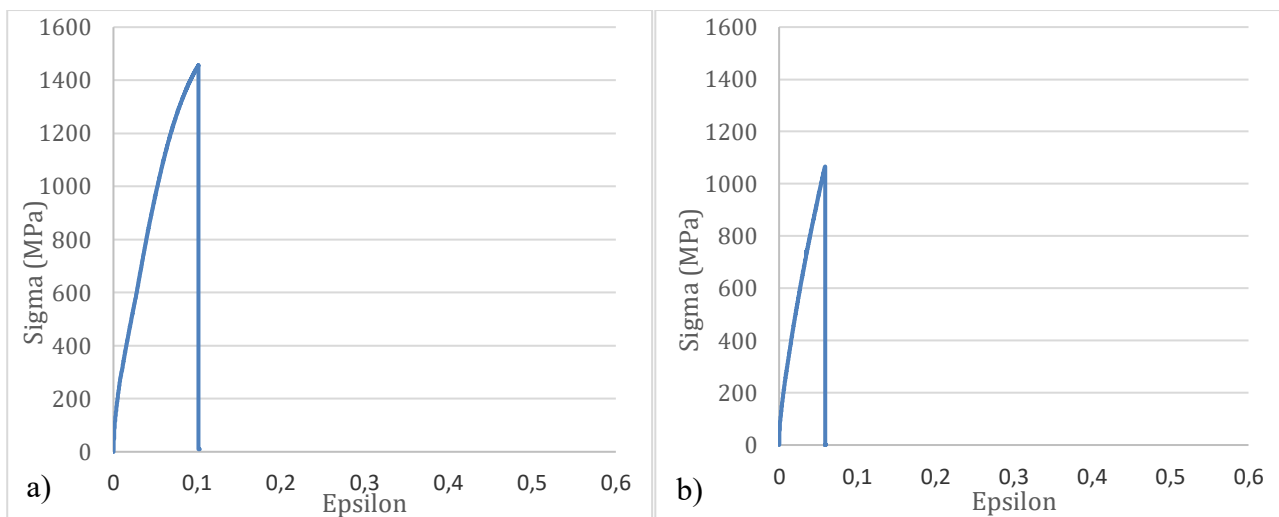


Figura 54.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) H133 y b) H13C3 [Fuente propia]

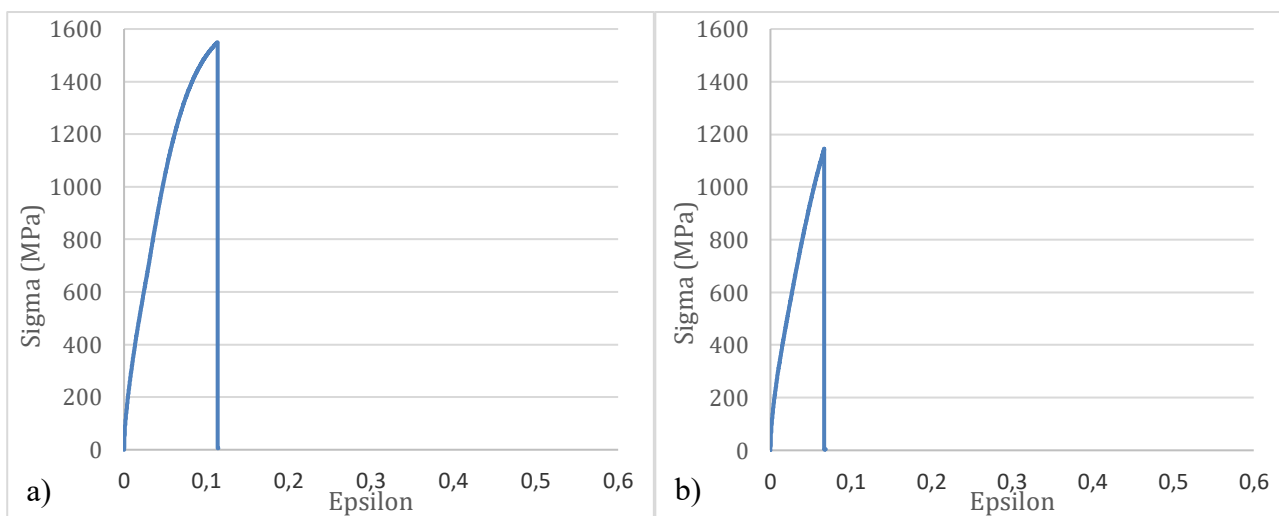


Figura 55.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) H134 y b) H13C4 [Fuente propia]

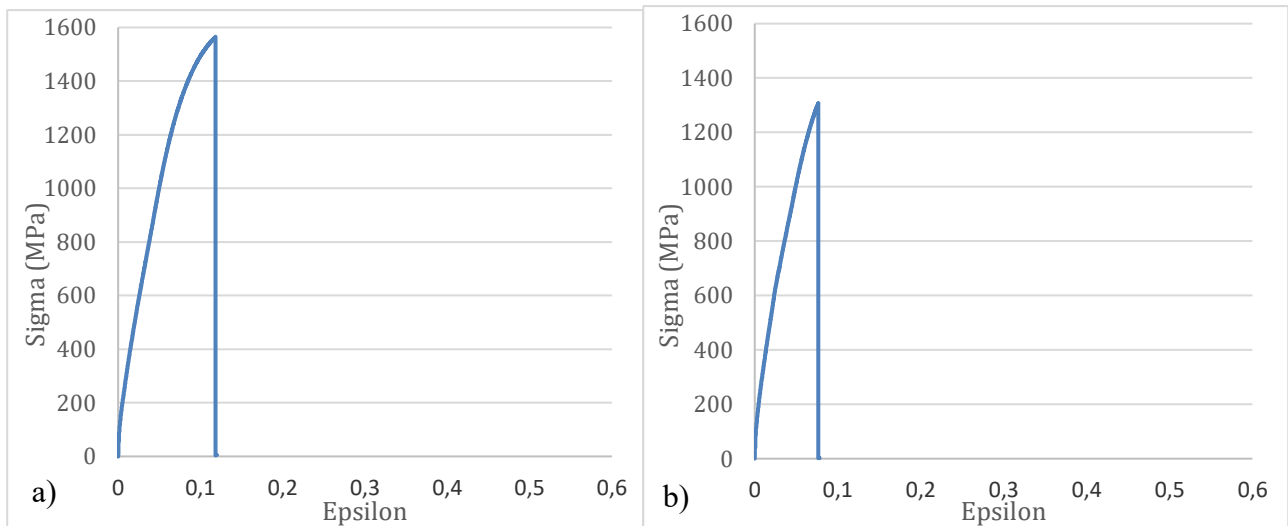


Figura 56.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) H135 y b) H13C5 [Fuente propia]

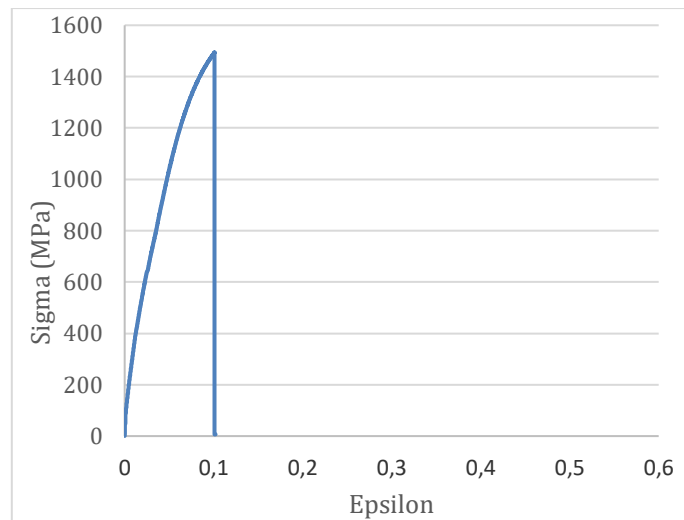


Figura 57.- Curva tensión-deformación de la probeta H136 [Fuente propia]

Tabla 31.- Valores característicos calculados para las probetas planas de H13

		H131	H132	H133	H134	H135	H136	Media	SD (±)
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	203,77	174,16	167,46	166,85	157,79	164,36	172,39	14,83
Límite de Fluencia	R _p [MPa]	932,01	1018,06	739,47	746,46	744,37	788,96	828,22	107,96
Resistencia a la Tracción	R _m [MPa]	1548,48	1548,13	1456,47	1549,37	1565,01	1493,43	1526,81	38,63
Límite de Rotura	R _u [MPa]	1548,41	1548,13	1456,47	1549,26	1565,01	1493,34	1526,78	38,63
Longitud final probeta	L _{if} [mm]	133,52	135,22	133,11	133,82	133,67	133,43	133,79	0,67
Longitud entre marcas	L _{fmarcas} [mm]	41,86	42,44	41,86	41,98	41,98	41,42	41,92	0,29
Alargamiento a la rotura	A [%]	3,74	4,73	2,62	3,57	3,04	1,22	3,15	1,08

Tabla 32.- Valores característicos calculados para las probetas de canto de H13

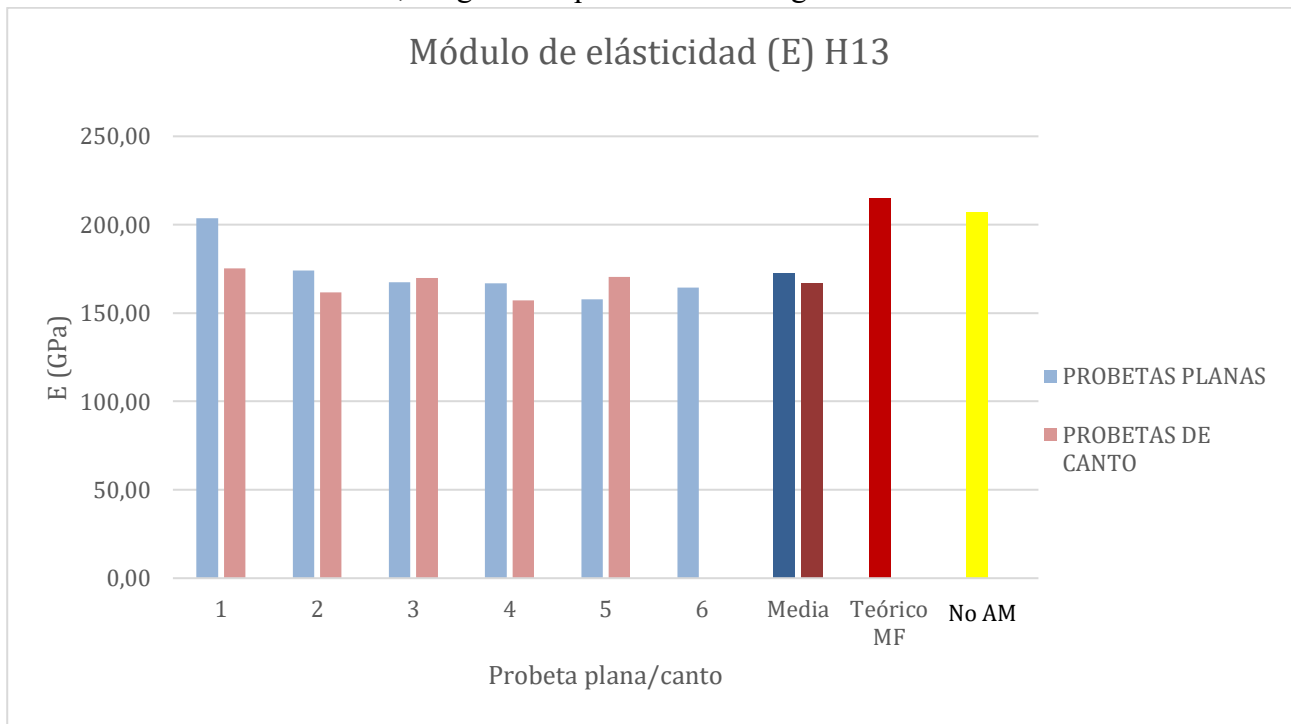
		H13C1	H13C2	H13C3	H13C4	H13C5	Media	SD (\pm)
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	175,343	161,58	169,88	157,30	170,35	166,89	6,51
Límite de Fluencia	R _p [MPa]	741,38	724,61	741,28	692,34	777,14	735,35	27,50
Resistencia a la Tracción	R _m [MPa]	1050,61	1233,40	1066,38	1145,31	1306,84	1160,51	97,87
Límite de Rotura	R _u [MPa]	1050,62	1233,41	1066,38	1145,32	1306,85	1160,51	97,87
Longitud final probeta	L _{tf} [mm]	130,60	131,28	130,84	130,90	131,31	130,98	0,27
Longitud entre marcas	L _{fmarcas} [mm]	41,36	41,97	41,84	41,92	41,44	41,70	0,25
Alargamiento a la rotura	A [%]	0,69	0,87	0,82	0,87	0,91	0,83	0,07

Los valores teóricos recogidos en la ficha de Markforged para el presente material y el teórico obtenido para otro proceso de fabricación diferente [36] son los siguientes (Tabla 33):

Tabla 33.- Valores teóricos de los parámetros a tener según Markforged y el teórico según otro fabricante para el mismo material, pero no en AM [36]

		MARKFORGED	H13 Laminado (no AM)
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	215	207
Límite de Fluencia	R _p [MPa]	800	1000
Resistencia a la Tracción	R _m [MPa]	1420	1200
Límite de Rotura	R _u [MPa]	---	---
Alargamiento a la rotura	A [%]	5	---

Teniendo en cuenta lo anterior, las gráficas quedarían de la siguiente manera:

**Figura 58.-** Módulo de elasticidad medio, teórico y de cada probeta ensayada de H13 [Fuente propia]

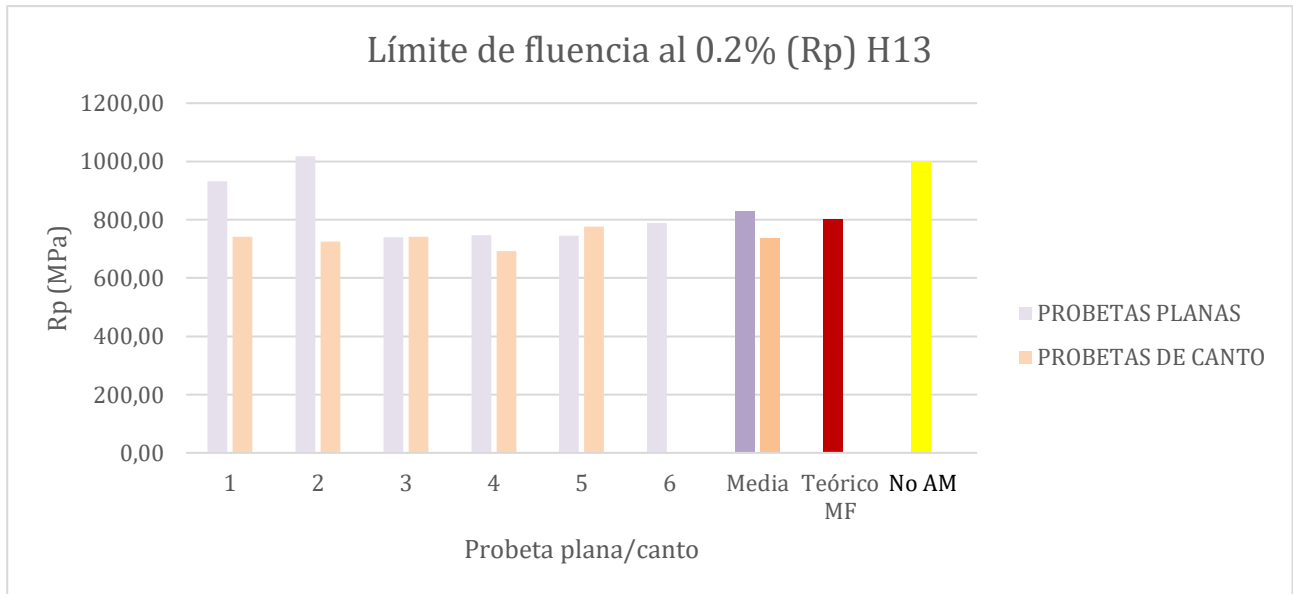


Figura 59.- Límite de fluencia Rp al 0.2% medio, teórico y de cada probeta ensayada de H13 [Fuente propia]

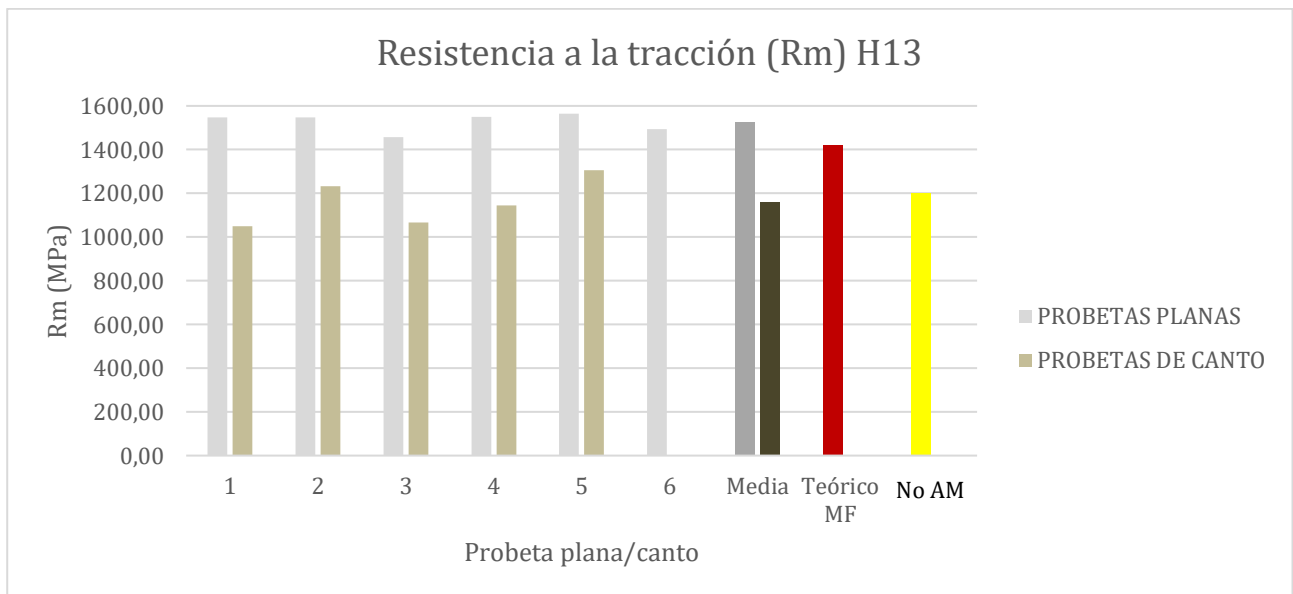


Figura 60.- Resistencia a la tracción Rm media, teórica y de cada probeta ensayada de H13 [Fuente propia]

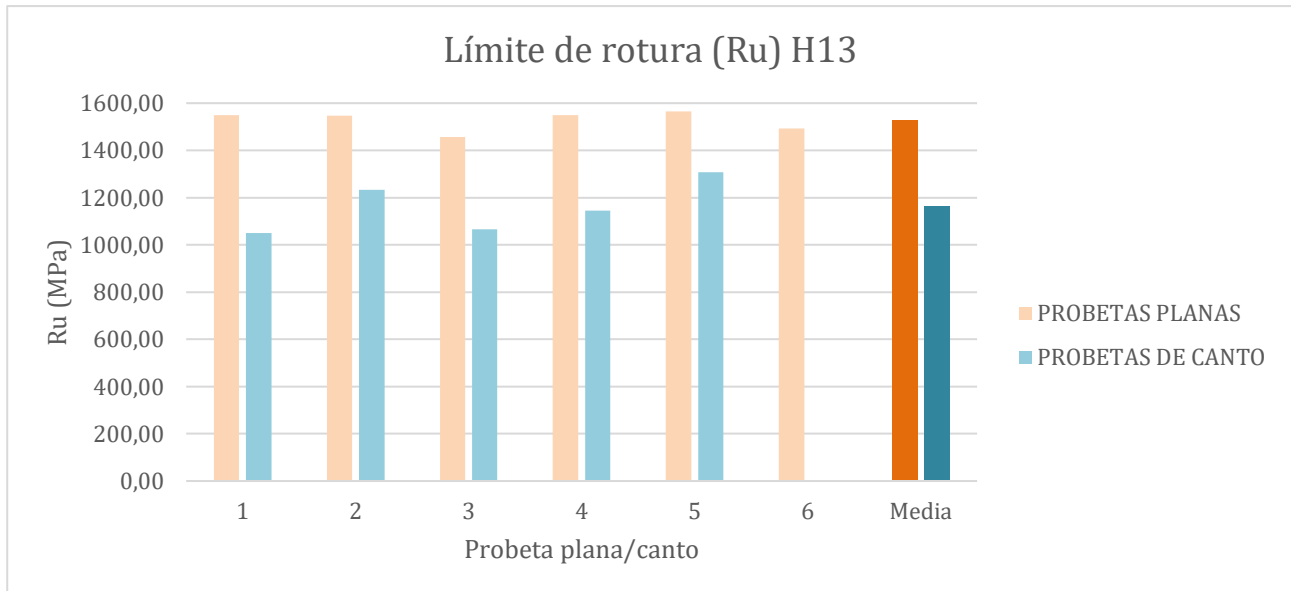


Figura 61.- Límite de rotura Ru medio, teórico y de cada probeta ensayada de H13 [Fuente propia]

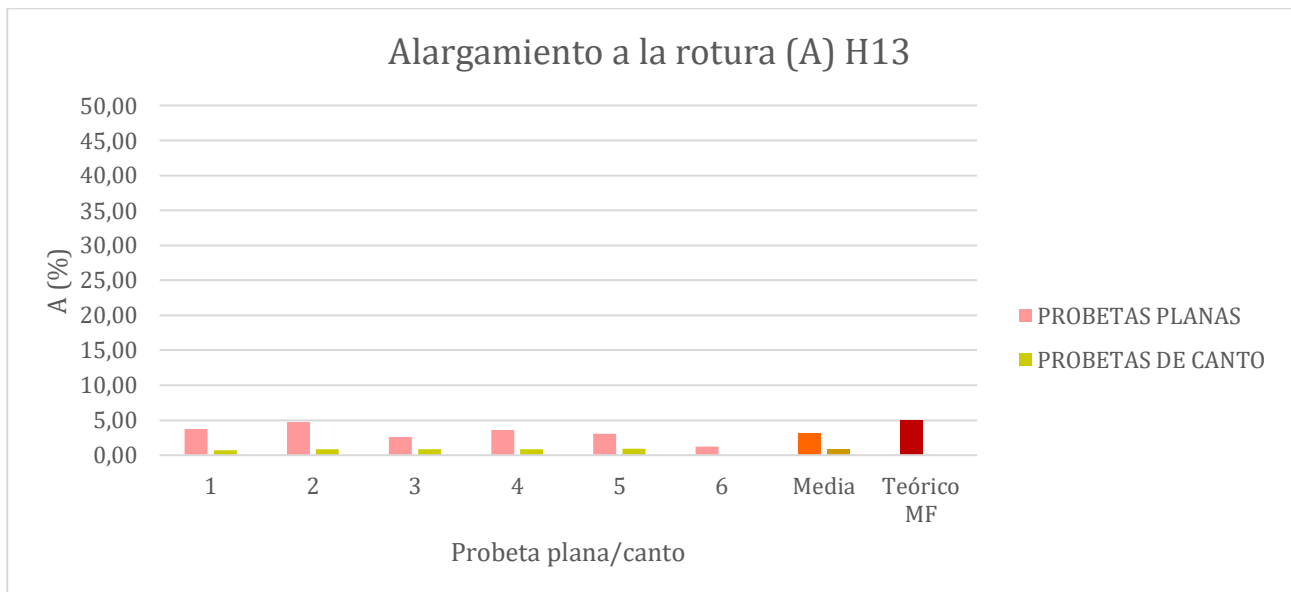


Figura 62.- Alargamiento a la rotura medio, teórico y de cada probeta ensayada de H13 [Fuente propia]

De las gráficas anteriores presentadas (Figuras 58-62) se puede deducir lo siguiente:

Módulo de Elasticidad: al analizar los valores del módulo de elasticidad obtenidos en las probetas ensayadas de acero H13, se observa que, en general, no existen diferencias significativas entre los valores correspondientes a las distintas orientaciones de fabricación. La única excepción destacable es la probeta H131 (orientación plana), que alcanza un valor de 203,77 GPa, considerablemente superior al resto. Al calcular los valores promedio para cada tipo de orientación (plana y de canto), se constata que estos son bastante similares entre sí. No obstante, al comparar estos promedios con el valor teórico especificado por el fabricante Markforged, que asciende a 215 GPa, se aprecia una desviación considerable (Tabla 34). La mayoría de los valores obtenidos en los ensayos experimentales se encuentran muy por debajo de dicho valor de referencia, siendo la probeta H131 la

única que se aproxima al mismo, pero se diferencia igualmente en un -5.22%. En relación con el valor teórico de 207 GPa correspondiente a un proceso de fabricación convencional, puede observarse que la tendencia general de los resultados experimentales coincide con la observada respecto al valor teórico proporcionado por Markforged. En ambos casos, la mayoría de los valores experimentales del módulo de elasticidad se sitúan por debajo del valor teórico convencional, no obstante, para el H131 el valor experimental solo se encuentra un 1.56% por debajo del teórico convencional.

Tabla 34.- Variación de los valores experimentales de E obtenidos en relación a los valores teóricos

Módulo de elasticidad (E) acero para herramientas H13		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
H131	-5,22	-1,56
H132	-18,99	-15,86
H133	-22,11	-19,10
H134	-22,41	-19,41
H135	-26,61	-23,77
H136	-23,55	-20,60
Media _{PLANAS}	-19,82	-16,72
H13C1	-18,45	-15,29
H13C2	-24,84	-21,94
H13C3	-20,98	-17,93
H13C4	-26,83	-24,01
H13C5	-20,76	-17,70
Media _{CANTO}	-22,37	-19,37

Límite de Fluencia al 0,2%: En cuanto al análisis del límite de fluencia los resultados presentan una mayor variabilidad. Exceptuando las probetas H131 y H132 (ambas planas), el resto de las muestras ensayadas arrojan valores muy similares entre sí, independientemente de su orientación. Las probetas H131 y H132 destacan notablemente, alcanzando valores de 932,01 MPa y 1018,16 MPa respectivamente, lo que eleva significativamente el promedio general de las probetas planas. Esta situación introduce un sesgo en la comparación entre orientaciones, dado que, sin estas dos muestras, las diferencias entre promedios serían menores. En cualquier caso, al contrastar estos resultados con el valor teórico (Tabla 35) de 800 MPa proporcionado por el fabricante, se observa que la mayoría de los valores, incluidos los promedios, se encuentran por debajo de este umbral. Al comparar los resultados con el valor teórico correspondiente a un proceso de fabricación convencional (1000 MPa), se observa que solo la probeta H132 presenta un valor experimental superior a dicho umbral. El resto de las probetas muestran resultados considerablemente inferiores. Además, cabe destacar que el valor teórico proporcionado por Markforged (800 MPa) también se sitúa notablemente por debajo del valor teórico convencional, lo que refuerza la diferencia entre ambos métodos de fabricación en cuanto al límite de fluencia.

Tabla 35.- Variación de los valores experimentales de Rp obtenidos en relación a los valores teóricos

Límite de fluencia al 0.2 % (Rp) acero para herramientas H13		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
H131	16,50	-6,80
H132	27,26	1,81
H133	-7,57	-26,05
H134	-6,69	-25,35
H135	-6,95	-25,56
H136	-1,38	-21,10
MediapLANAS	3,53	-17,18
H13C1	-7,33	-25,86
H13C2	-9,42	-27,54
H13C3	-7,34	-25,87
H13C4	-13,46	-30,77
H13C5	-2,86	-22,29
MediacANTO	-8,08	-26,46

Resistencia Máxima a la Tracción: en lo relativo a la resistencia máxima a la tracción se observa una clara superioridad en las probetas con orientación plana frente a las de canto. Todas las probetas planas presentan valores de resistencia a la tracción mayores en comparación con sus homólogas de canto. El valor medio obtenido en las planas no solo supera ampliamente al promedio de las probetas de canto, sino que incluso excede el valor teórico establecido (Tabla 36) por el fabricante, el cual es de 1420 MPa en un 7.52%. En relación con el valor teórico de 1200 MPa correspondiente a un proceso de fabricación convencional, se observa que todas las probetas planas presentan valores experimentales superiores a dicho umbral. Sin embargo, en el caso de las probetas de canto, los resultados se mantienen por debajo de ese valor teórico. Es relevante señalar que el valor teórico convencional también resulta inferior al valor previsto por el fabricante Markforged.

Tabla 36.- Variación de los valores experimentales de Rm obtenidos en relación a los valores teóricos

Resistencia a la tracción máxima (Rm) acero para herramientas H13		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
H131	9,05	29,04
H132	9,02	29,01
H133	2,57	21,37
H134	9,11	29,11
H135	10,21	30,42
H136	5,17	24,45
MediapLANAS	7,52	27,23
H13C1	-26,01	-12,45
H13C2	-13,14	2,78
H13C3	-24,90	-11,14

H13C4	-19,34	-4,56
H13C5	-7,97	8,90
MediaCANTO	-18,27	-3,29

Límite de Rotura: los valores del límite de rotura también reflejan una tendencia clara: las probetas fabricadas en orientación plana exhiben valores sustancialmente más altos que las de orientación de canto. La diferencia entre los valores promedio de ambas orientaciones alcanza los 400 MPa, lo cual es una diferencia considerable en términos de resistencia estructural. Se ha excluido en la obtención de la variación del % a la probeta H136 (Tabla 37).

Tabla 37.- Variación de los valores experimentales de Ru obtenidos entre pares de probetas

Límite de rotura (Ru) acero para herramientas H13	
Probeta	Variación entre par de probetas (%)
H131/H13C1	47,39
H132/H13C2	25,52
H133/H13C3	36,58
H134/H13C4	35,27
H135/H13C5	19,75
MediaPLANAS/ MediaCANTO	31,56

Alargamiento a la Rotura: en lo referente a la capacidad de deformación plástica antes de la fractura se ha observado que las probetas planas, en todos los casos, presentan mayores valores que las de canto. No obstante, incluso en los casos más favorables (Tabla 38), los valores medios obtenidos están lejos del valor teórico de referencia, que es del 5%. El más cercano es el de la probeta H132 cuyo valor varía en un -5.26% respecto el teórico de Markforged.

Tabla 38.- Variación de los valores experimentales de A obtenidos en relación a los valores teóricos

Alargamiento a la rotura (A) acero para herramientas H13	
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)
H131	-25,10
H132	-5,26
H133	-47,56
H134	-28,50
H135	-39,08
H136	-75,54
MediaPLANAS	-36,84
H13C1	-82,58
H13C2	-83,54
H13C3	-82,46
H13C4	-81,85
H13C5	-81,70
MediaCANTO	-83,27

D.- Inconel 625

Antes de proceder con la representación gráfica de los resultados, es importante señalar una cuestión relevante en el análisis del módulo de elasticidad. Durante el estudio, se ha observado que los valores obtenidos para las probetas INC1, INC2, INCC1, INCC2, INCC3 e INNC4 presentan una desviación considerable respecto tanto a los valores teóricos como a los resultados obtenidos para las probetas INC3, INC4, INCC5 e INCC6. Debido a esta notable discrepancia, se ha decidido excluir dichos valores del análisis comparativo del módulo de elasticidad, con el fin de evitar interpretaciones erróneas. No obstante, sí se incluirán en las gráficas correspondientes, con el objetivo de mostrar visualmente la diferencia con el resto de los resultados. Esta anomalía se debe a un fallo en el proceso de recogida de datos del extensómetro durante los ensayos, ya que, aunque el dispositivo estaba correctamente colocado, no registró adecuadamente los datos. Como consecuencia, el módulo de elasticidad de estas probetas tuvo que ser estimado a partir de los desplazamientos generales, lo que ha generado una importante desviación en los resultados finales.

Teniendo en cuenta lo anterior, los resultados y curvas obtenidas para las probetas de acero para herramienta H13 en las hojas de cálculos de Microsoft Excel empleadas en el trabajo son los siguientes para cada parámetro de interés.

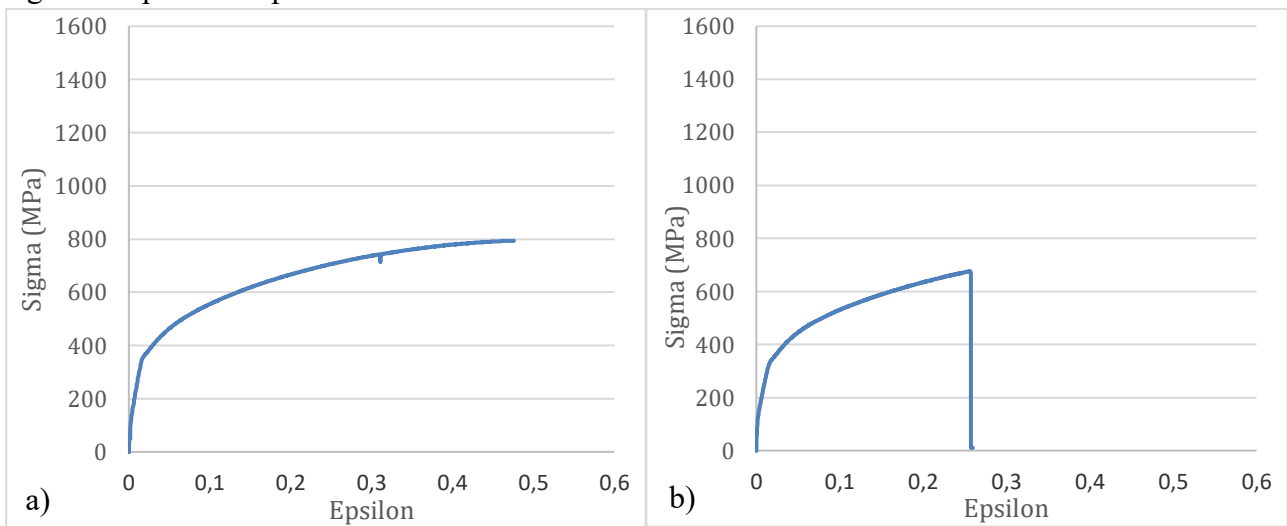


Figura 63.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) INC1 y b) INCC1 [Fuente propia]

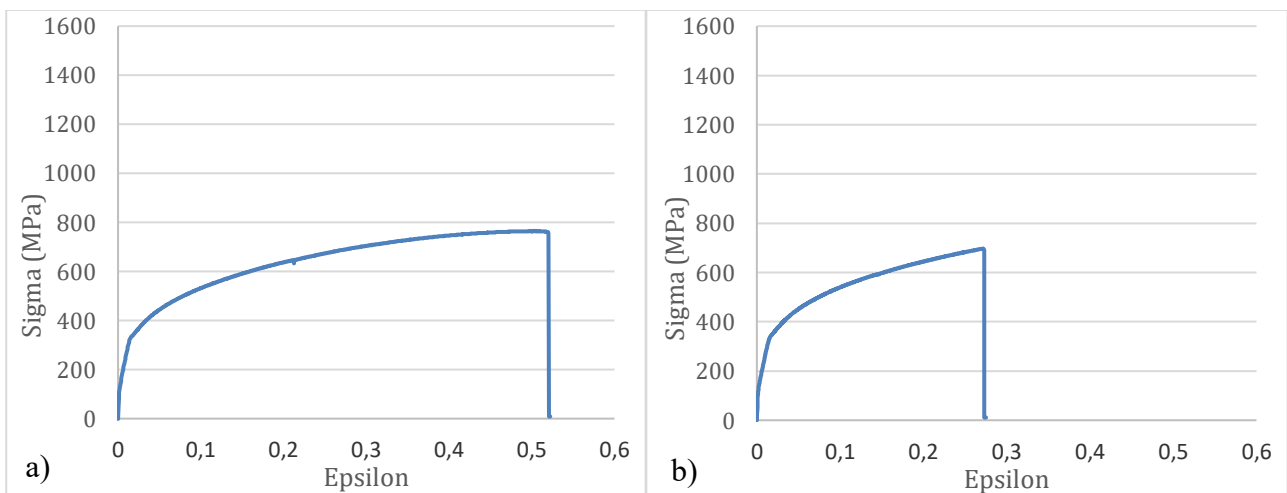


Figura 64.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) INC2 y b) INCC2 [Fuente propia]

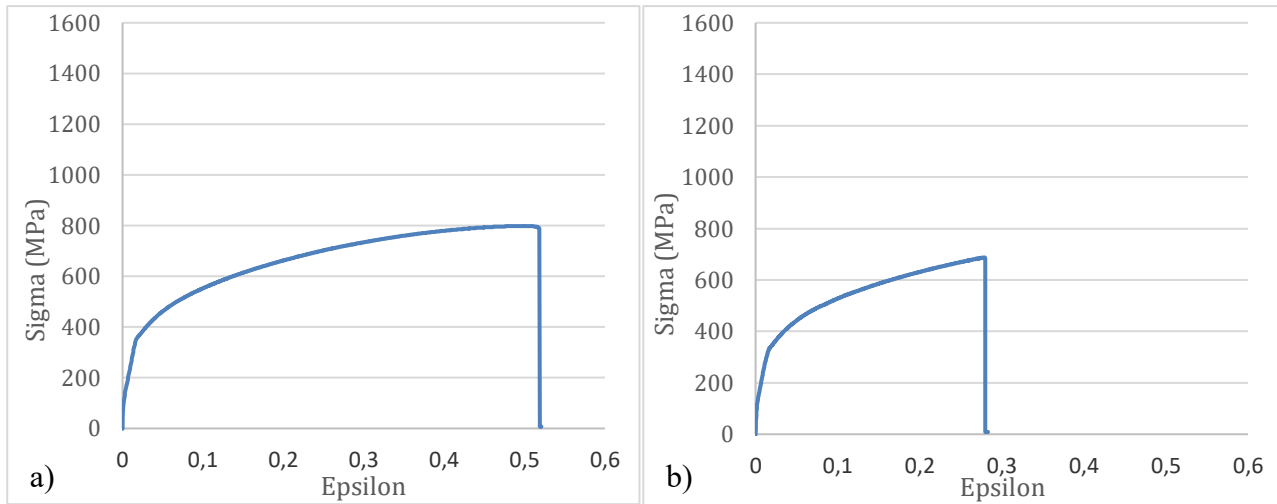


Figura 65.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) INC3 y b) INCC3 [Fuente propia]

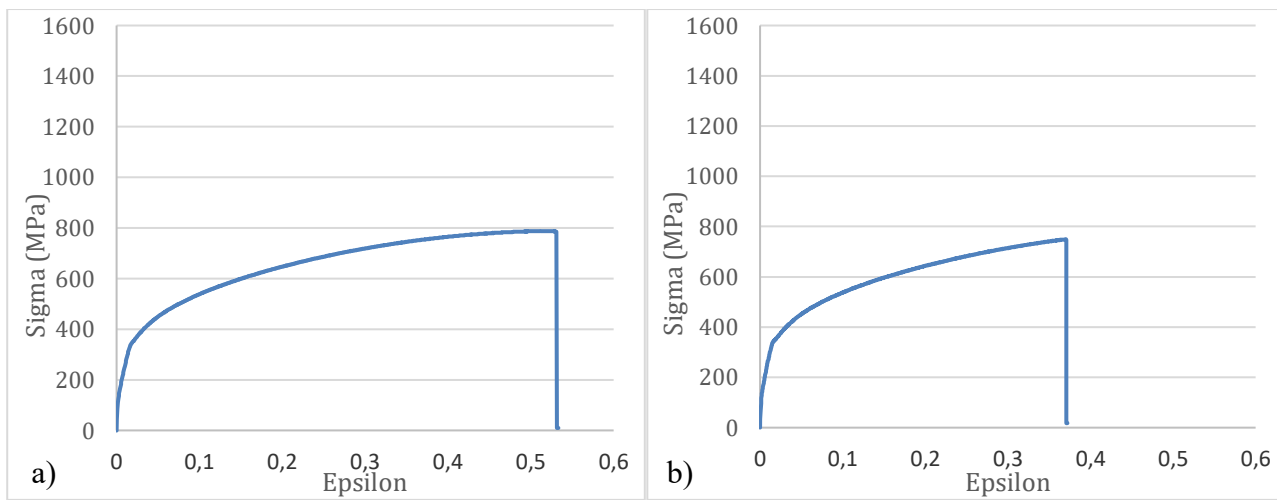


Figura 66.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) INC4 y b) INCC4 [Fuente propia]

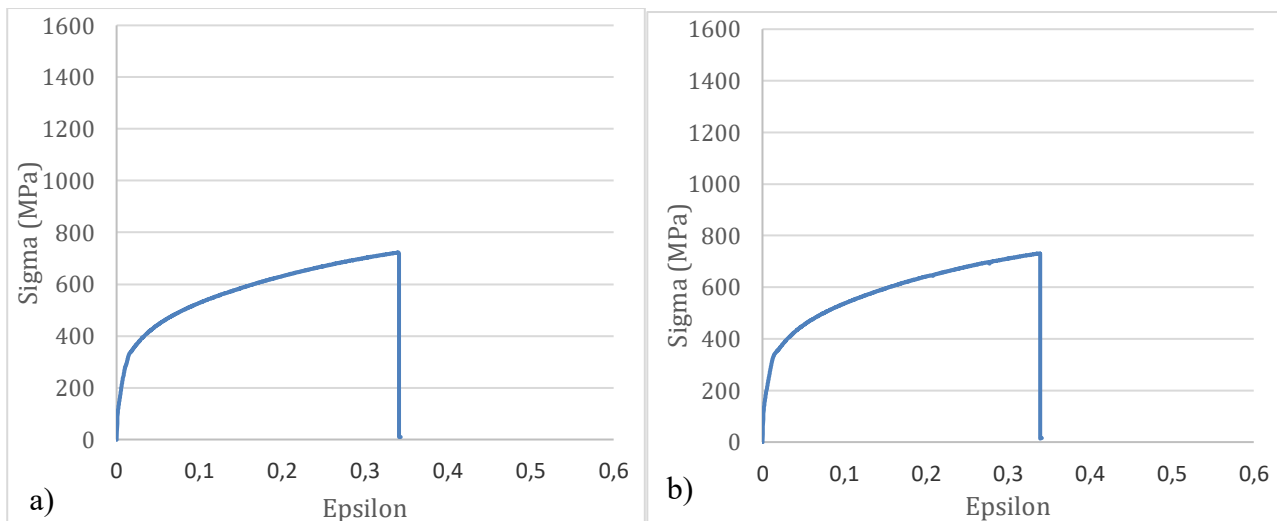


Figura 67.- Curvas tensión-deformación de las probetas: a) INCC5 y b) INCC6 [Fuente propia]

Tabla 39.- Valores característicos calculados para las probetas planas de INC 625

		INC1	INC2	INC3	INC4	Media	SD (\pm)
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	17,726	16,711	166,968	146,812	156.89	10,08
Límite de Fluencia	R _p [MPa]	356,027	334,753	364,009	348,279	350,767	10,790
Resistencia a la Tracción	R _m [MPa]	794,064	764,425	798,729	788,008	786,307	13,193
Límite de Rotura	R _u [MPa]	794,064	747,430	789,300	785,173	778,992	18,492
Longitud final probeta	L _{tf} [mm]	164,180	165,060	164,830	164,750	164,705	0,324
Longitud entre marcas	L _{fmarcas} [mm]	57,660	58,070	58,340	58,840	58,228	0,429
Alargamiento a la rotura	A [%]	40,426	39,849	43,002	44,033	41,828	1,741

Tabla 40.- Valores característicos calculados para las probetas planas de INC 625

		INCC1	INCC2	INCC3	INCC4	INCC5	INCC6	Media	SD (\pm)
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	16,05	16,20	16,52	15,57	192,58	188,76	190.67	1,91
Límite de Fluencia	R _p [MPa]	334,81	343,12	333,78	346,27	339,70	349,13	341,13	5,63
Resistencia a la Tracción	R _m [MPa]	675,92	696,44	687,80	749,23	722,17	731,29	710,48	25,74
Límite de Rotura	R _u [MPa]	669,82	650,21	673,85	748,59	719,10	730,29	698,64	35,83
Longitud final probeta	L _{tf} [mm]	147,29	148,15	148,61	154,94	152,70	152,00	150,61	2,77
Longitud entre marcas	L _{fmarcas} [mm]	48,10	48,52	48,20	51,01	51,47	51,59	49,81	1,55
Alargamiento a la rotura	A [%]	15,50	17,02	16,55	23,49	23,96	25,19	20,24	3,97

Los valores teóricos recogidos en la ficha de Markforged para el presente material y el teórico obtenido para otro proceso de fabricación diferente [37] son los siguientes (Tabla 41):

Tabla 41.- Valores teóricos de los parámetros a tener según Markforged y el teórico según otro fabricante para el mismo material, pero no en AM [37]

		MARKFORGED	INC 625 Fundido (no AM)
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	205	205.80
Límite de Fluencia	R _p [MPa]	334	460
Resistencia a la Tracción	R _m [MPa]	765	880
Límite de Rotura	R _u [MPa]	---	---
Alargamiento a la rotura	A [%]	42	50

Teniendo en cuenta lo anterior, las gráficas quedarían de la siguiente manera:

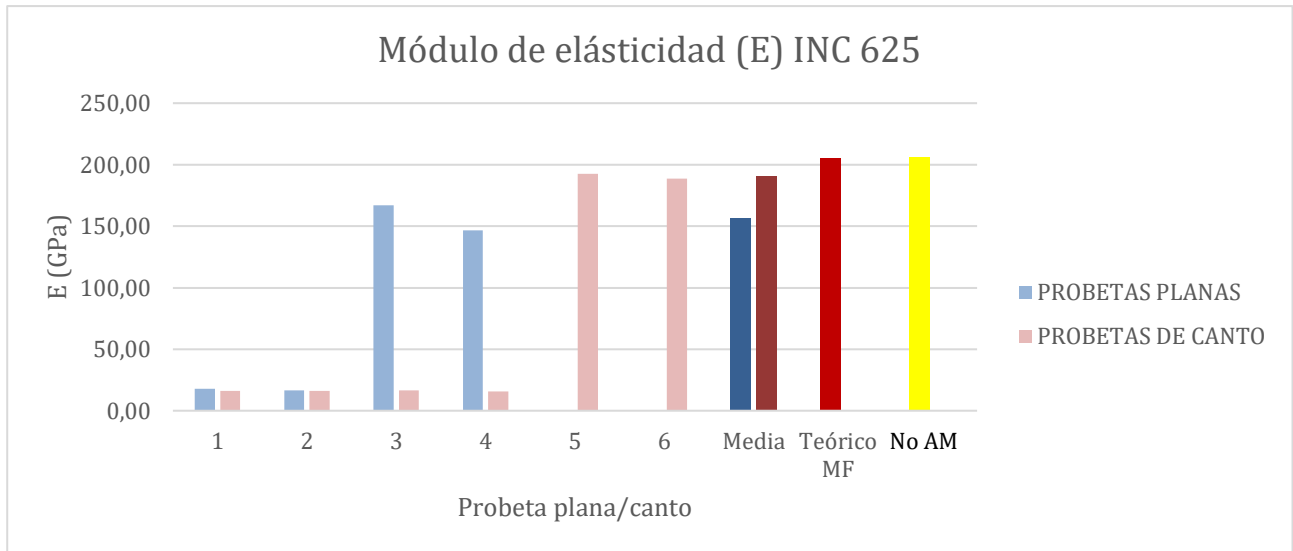


Figura 68.- Módulo de elasticidad medio, teórico y de cada probeta ensayada de INC 625 [Fuente propia]

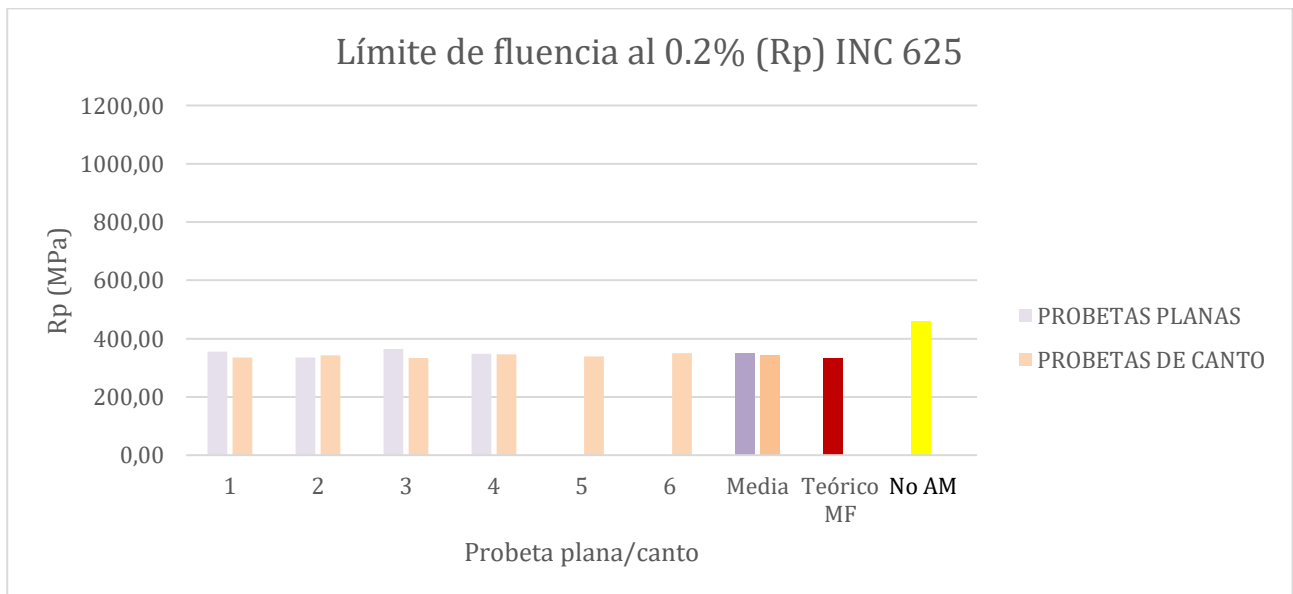


Figura 69.- Límite de fluencia Rp al 0.2% medio, teórico y de cada probeta ensayada de INC 625 [Fuente propia]

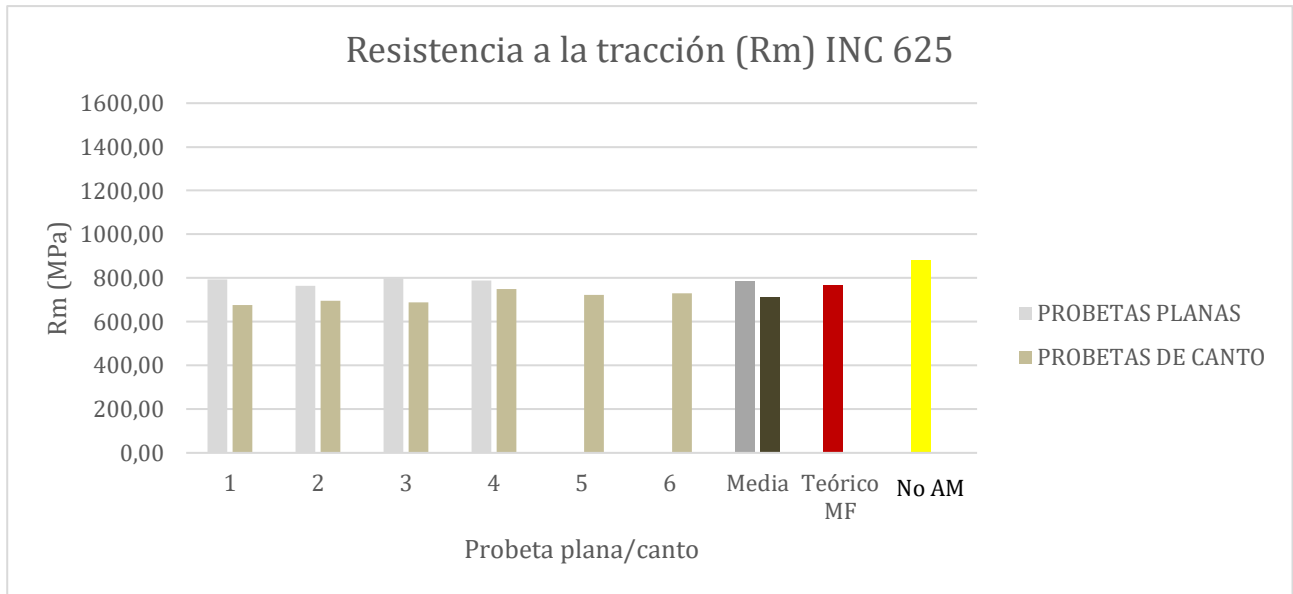


Figura 70.- Resistencia a la tracción Rm media, teórica y de cada probeta ensayada de INC 625 [Fuente propia]

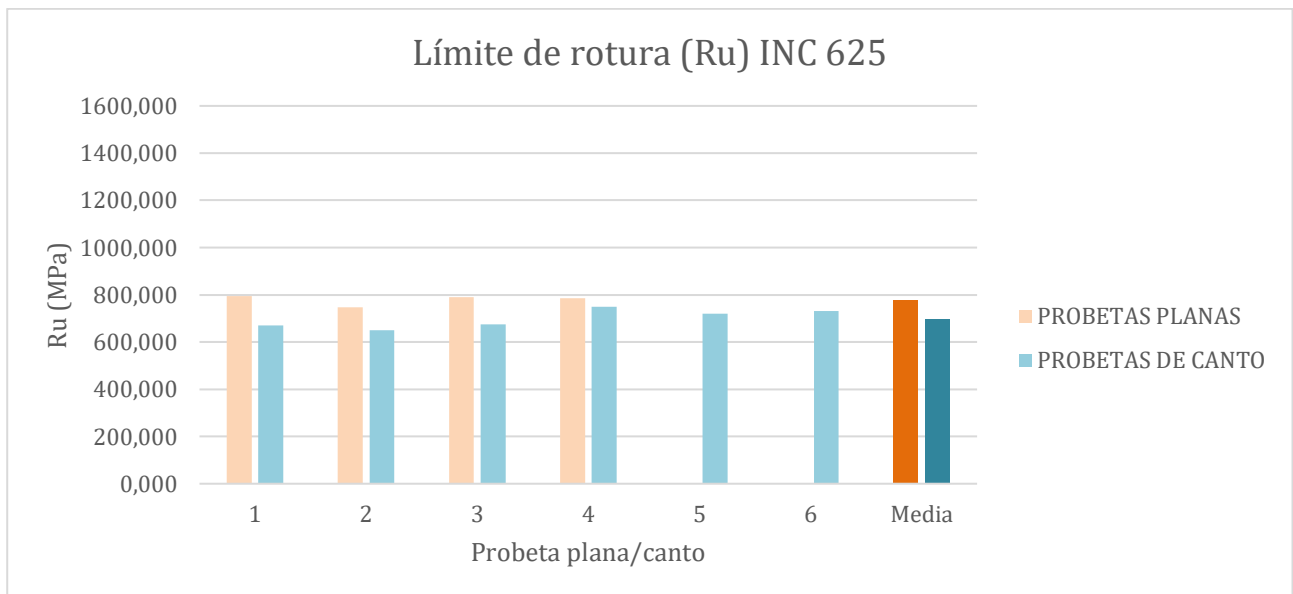


Figura 71.- Límite de rotura Ru medio, teórico y de cada probeta ensayada de INC 625 [Fuente propia]

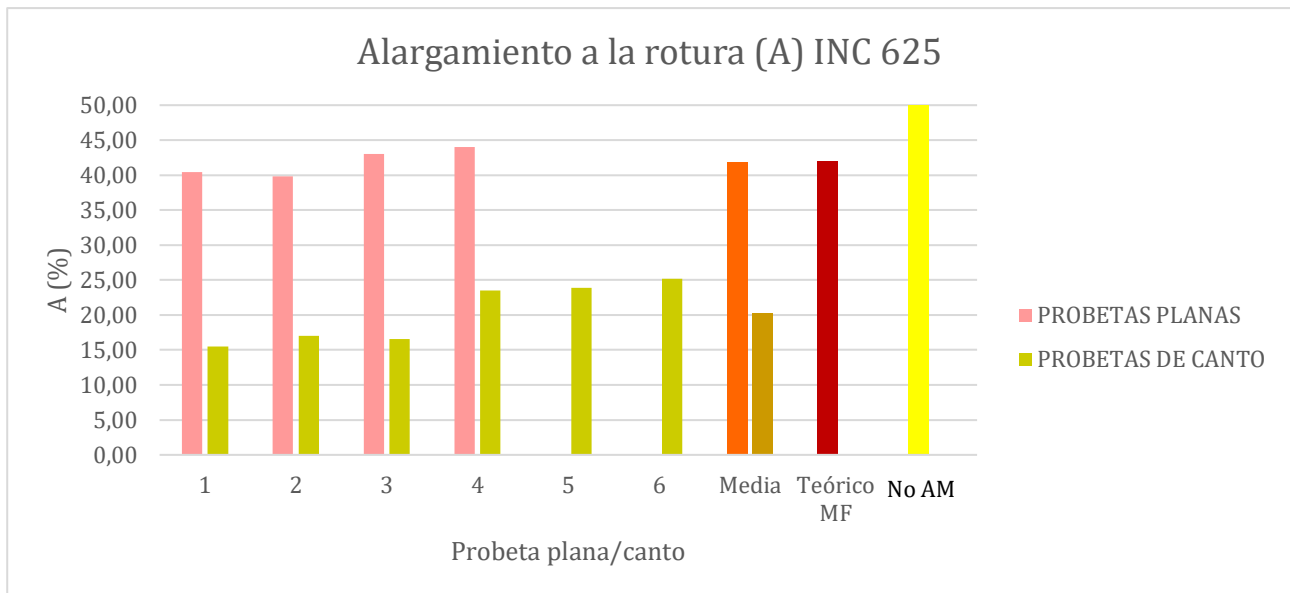


Figura 72.- Alargamiento a la rotura medio, teórico y de cada probeta ensayada de INC 625 [Fuente propia]

De las gráficas anteriores presentadas (Figuras 68-72) se puede deducir lo siguiente:

Módulo de Elasticidad: Al analizar los resultados obtenidos para las probetas seleccionadas, se aprecia que aquellas fabricadas con orientación de canto presentan, en general, valores más elevados del módulo de elasticidad en comparación con las probetas fabricadas con orientación plana. Sin embargo, a pesar de esta diferencia favorable para las probetas de canto, es importante destacar que ninguno de los valores experimentales (Tabla 42) alcanzó el valor teórico de referencia, el cual, según la ficha técnica del fabricante, es de 205 GPa. En este sentido, también se puede observar que el valor teórico proporcionado por Markforged para este material es prácticamente equivalente al valor teórico del proceso de fabricación convencional (205,8 GPa), por lo que las conclusiones obtenidas a partir de la comparación con uno u otro valor teórico resultan prácticamente similares.

Tabla 42.- Variación de los valores experimentales de E obtenidos en relación a los valores teóricos

Módulo de elasticidad (E) Inconel 625		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
INC1	---	---
INC2	---	---
INC3	-18,55	-18,87
INC4	-28,38	-28,66
Media _{PLANAS}	-23,47	-23,77
INCC1	---	---
INCC2	---	---
INCC3	---	---
INCC4	---	---
INCC5	-6,06	-6,42
INCC6	-7,92	-8,28
Media _{CANTO}	-6,99	-7,35

Límite de Fluencia al 0,2%: en relación con el límite de fluencia al 0,2%, los resultados obtenidos muestran una tendencia homogénea entre las probetas de distintas orientaciones (planas y de canto). Tanto los valores individuales como los promedios obtenidos por orientación reflejan una variación mínima entre sí, la cual se sitúa aproximadamente en un 2.88% superior para las planas. Además, se ha observado (Tabla 43) que los valores promedio superan el límite de fluencia teórico de 334 MPa en un 5.02% para las planas y 2.14% para las de canto, establecido como referencia por el fabricante del material. Con respecto al valor teórico convencional (460 MPa) en todos los casos los valores experimentales han sido inferiores.

Tabla 43.- Variación de los valores experimentales de Rp obtenidos en relación a los valores teóricos

Límite de fluencia al 0.2% (Rp) Inconel 625		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
INC1	6,59	-22,60
INC2	0,23	-27,23
INC3	8,98	-20,87
INC4	4,28	-24,29
Media _{PLANAS}	5,02	-23,75
INCC1	0,24	-27,21
INCC2	2,73	-25,41
INCC3	-0,06	-27,44
INCC4	3,67	-24,73
INCC5	1,71	-26,15
INCC6	4,53	-24,10
Media _{CANTO}	2,14	-25,84

Resistencia Máxima a la Tracción: en lo que respecta a la resistencia máxima a la tracción, los resultados revelan una diferencia ligeramente más marcada entre las dos orientaciones de fabricación. Las probetas planas presentan una resistencia superior a las de canto, tal como se aprecia en los valores promedio obtenidos para cada grupo. Aunque esta diferencia no es excesiva en términos absolutos. Cuando se comparan estos valores (Tabla 44) con el dato teórico de 765 MPa proporcionado por el fabricante, se observa una buena correlación. De hecho, en algunas de las probetas planas, la resistencia a la tracción supera incluso dicho valor. Al comparar los resultados obtenidos con el valor teórico correspondiente a un proceso de fabricación convencional (880 MPa), se observa que las probetas fabricadas con orientación plana presentan valores relativamente próximos a dicho valor de referencia, lo que sugiere un comportamiento mecánico aceptable en términos de límite elástico. Sin embargo, en el caso de las probetas fabricadas con orientación de canto, se aprecia una diferencia más significativa respecto al valor teórico.

Tabla 44.- Variación de los valores experimentales de Rm obtenidos en relación a los valores teóricos

Resistencia a la tracción (Rm) Inconel 625		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
INC1	3,80	-9,77
INC2	-0,08	-13,13
INC3	4,41	-9,24
INC4	3,01	-10,45
Media _{PLANAS}	2,79	-10,65
INCC1	-11,64	-23,19
INCC2	-8,96	-20,86
INCC3	-10,09	-21,84
INCC4	-2,06	-14,86
INCC5	-5,60	-17,94
INCC6	-4,41	-16,90
Media _{CANTO}	-7,13	-19,26

Límite de Rotura: los resultados obtenidos para el límite de rotura siguen una tendencia similar a la observada en la resistencia a la tracción máxima (Tabla 45). Nuevamente, las probetas con orientación plana presentan valores superiores en comparación con las de canto. El valor promedio correspondiente a las planas se sitúa aproximadamente 80 MPa por encima del de las probetas de canto, lo cual constituye una diferencia considerable si se tiene en cuenta el rango de esfuerzos involucrados. En la tabla 41 se puede verificar dicha superioridad de las probetas planas respecto a las de canto, las cuales son mínimo un 4.89% superior en el análisis del límite de rotura experimental obtenido.

Tabla 45.- Variación de los valores experimentales de Ru obtenidos entre pares de probetas

Límite de rotura (Ru) Inconel 625	
Probeta	Variación entre par de probetas (%)
INC1/INCC1	18,55
INC1/INCC2	14,95
INC1/INCC3	17,13
INC1/INCC4	4,89
INC1/INCC5	10,42
INC1/INCC6	8,73
Media _{PLANAS} / Media _{CANTO}	11,50

Alargamiento a la Rotura: finalmente, en lo que respecta al alargamiento a la rotura, se observa una diferencia significativa entre ambas orientaciones. Las probetas planas muestran, en todos los casos, valores notablemente superiores al alargamiento registrado en las probetas de canto. Además, al comparar el valor promedio del alargamiento obtenido para las probetas planas (Tabla 46) con el valor teórico de referencia de 42% proporcionado por el fabricante, se constata que los resultados se encuentran muy próximos y el promedio es un 0.41% inferior al teórico. Comparando con el valor

teórico convencional del 50%, aunque los valores obtenidos en todos los casos se acercan a esta referencia, es importante destacar que permanecen consistentemente por debajo de dicho valor esperado.

Tabla 46.- Variación de los valores experimentales de A obtenidos en relación a los valores teóricos

Alargamiento a la rotura (A) Inconel 625		
Probeta ensayada	Variación respecto teórico Markforged (%)	Variación respecto teórico otro proceso (no AM) (%)
INC1	-3,75	-19,15
INC2	-5,12	-20,30
INC3	2,39	-14,00
INC4	4,84	-11,93
Media _{PLANAS}	-0,41	-16,35
INCC1	-63,08	-68,99
INCC2	-59,46	-65,95
INCC3	-60,56	-66,87
INCC4	-44,07	-53,02
INCC5	-43,06	-52,17
INCC6	-40,01	-49,61
Media _{CANTO}	-51,71	-59,43

4.2.2.- Análisis y comparación de resultados entre los diferentes materiales ensayados

Una vez recopilados y organizados todos los valores medios obtenidos para cada uno de los parámetros mecánicos característicos analizados correspondientes a cada uno de los materiales estudiados, se procederá a realizar una comparación directa entre ellos de forma individualizada, es decir, material a material. Esta comparación tiene como objetivo identificar cuál de los materiales evaluados presenta un comportamiento mecánico más favorable en función del parámetro de interés y del tipo de aplicación o requerimiento técnico que se pretenda satisfacer. En otras palabras, se analizará cuál de los materiales presenta un mejor desempeño relativo dependiendo de si se prioriza la rigidez estructural, la resistencia a la deformación plástica, la tenacidad, la capacidad de carga antes de la fractura o la ductilidad.

A través de este análisis comparativo detallado, será posible establecer criterios de selección más precisos y fundamentados, lo que permitirá determinar qué material resulta más adecuado según el contexto funcional específico para el que se destine el componente fabricado.

Para facilitar la comprensión de las gráficas se van a recopilar en unas tablas (Tabla 47) las medias obtenidas para cada material y parámetro relevante.

Tabla 47.- Valores medios obtenidos para cada material y orientación

		SS	SSC	A2	A2C	H13	H13C	INC	INCC
Módulo de Elasticidad	E [GPa]	147,84	163,24	145,26	167,05	172,40	166,89	156,89	190,67
Límite de Fluencia	R _p [MPa]	750,66	715,75	313,81	359,49	828,23	735,36	350,77	341,14
Resistencia a la Tracción	R _m [MPa]	1124,81	1043,39	559,72	597,34	1526,82	1160,51	786,31	710,48
Límite de Rotura	R _u [MPa]	1084,76	1043,23	550,46	595,50	1526,78	1160,51	778,99	698,65
Alargamiento a la rotura	A [%]	4,50	2,37	0,70	0,84	3,16	0,84	41,83	20,28

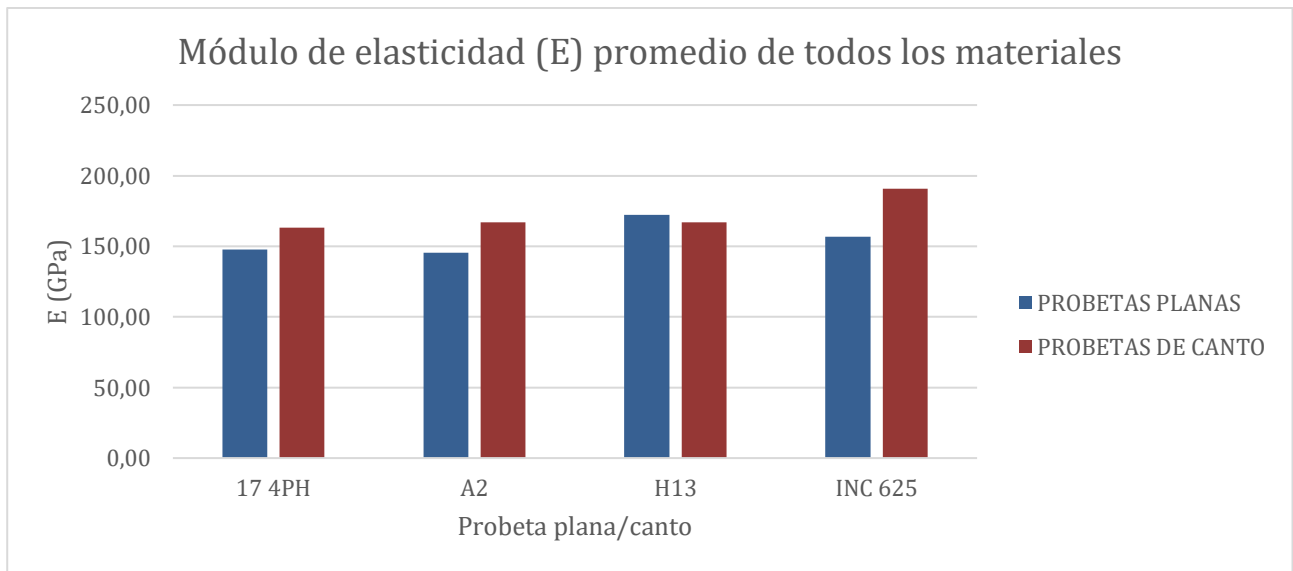


Figura 73.- Módulo de elasticidad promedio obtenido para cada material ensayado [Fuente propia]

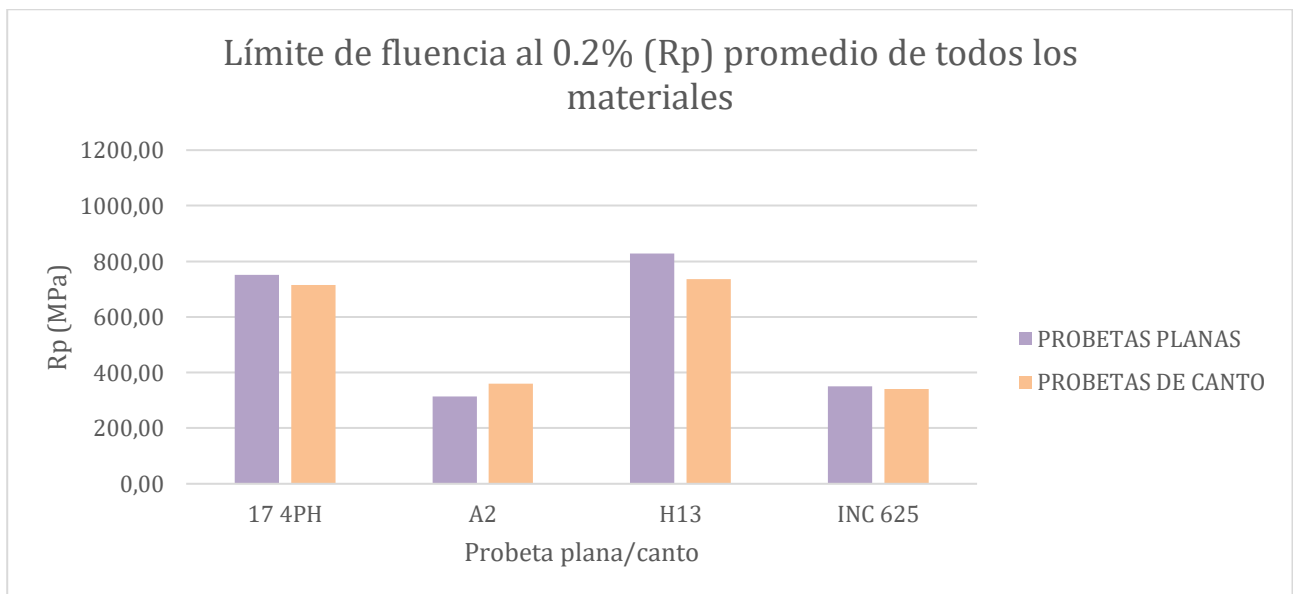


Figura 74.- Límite de fluencia al 0.2% promedio obtenido para cada material ensayado [Fuente propia]

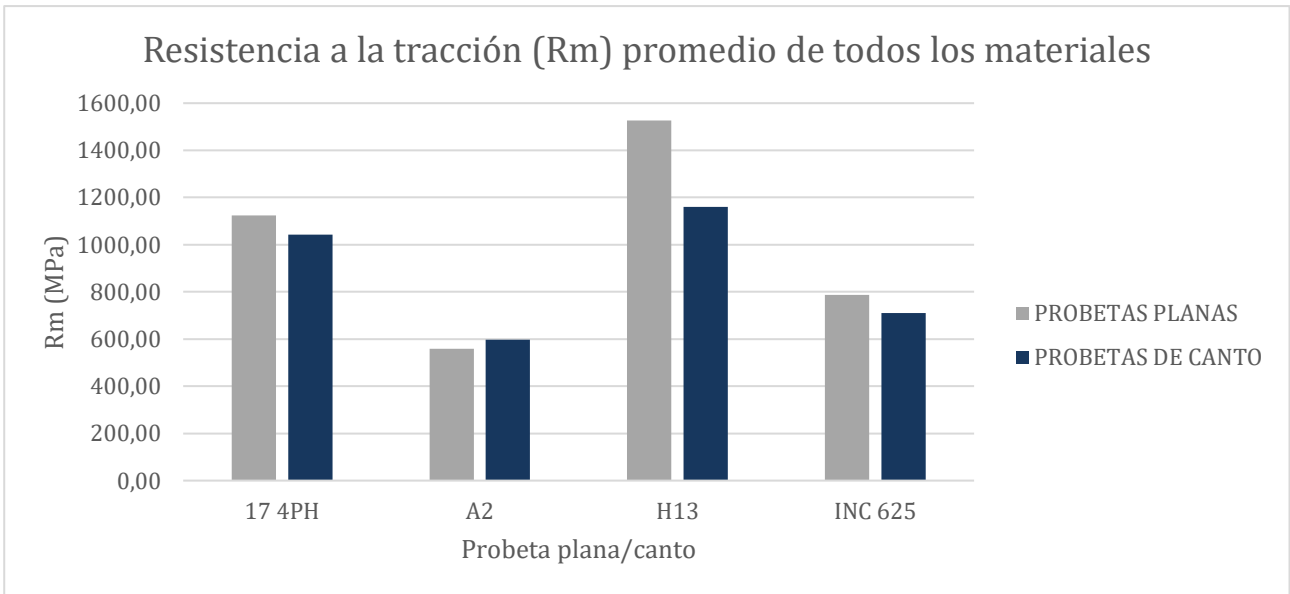


Figura 75.- Resistencia a la tracción máxima promedio obtenido para cada material ensayado [Fuente propia]

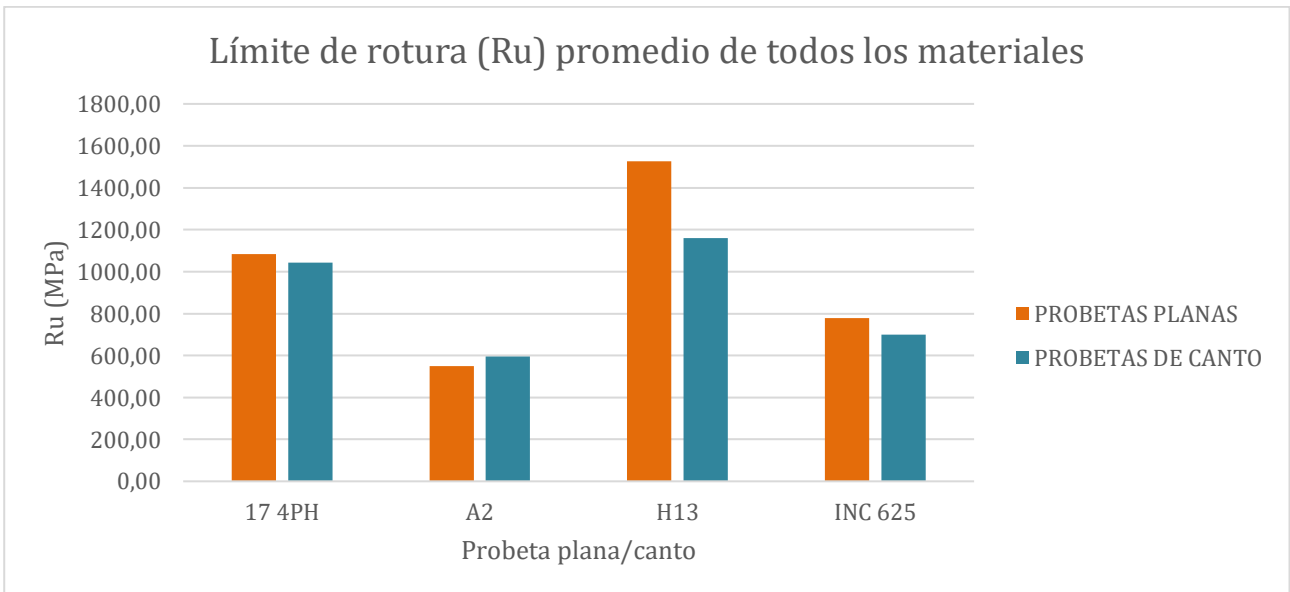


Figura 76.- Límite de rotura promedio obtenido para cada material ensayado [Fuente propia]

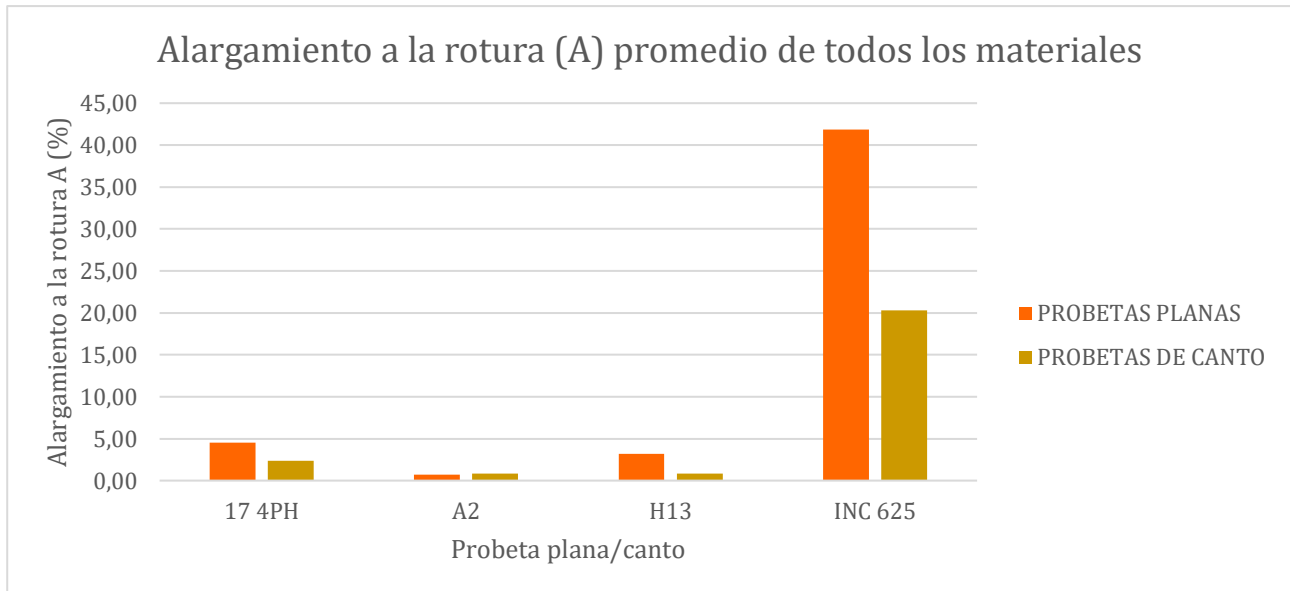


Figura 77.- Alargamiento a la rotura promedio obtenido para cada material ensayado [Fuente propia]

Hay que indicar previamente que, de igual manera que en el apartado anterior, los valores se van a indicar en las siguientes tablas se van a mostrar **en verde** si el valor analizado (material en columna 1) es superior con el que se compara (material en fila 2) y **en rojo** si ocurre lo contrario. Por tanto, de las gráficas anteriores presentadas (Figuras 73-77) se puede deducir lo siguiente:

Módulo de elasticidad: observando las gráficas anteriores y lo recogido en la siguiente Tabla 48, se puede observar que el valor de E promedio obtenido para las probetas de canto de INC 625 es el mayor obtenido de todas las orientaciones y materiales utilizados en el presente trabajo. Dicho valor es un 16.81%, 14.14% y 14.25% mayor que los obtenidos para la orientación 2 en 17-4PH, A2 y H13 respectivamente. Con respecto al caso de las probetas planas, el mayor valor se ha obtenido para las planas de H13, el cual es un 16.61%, 18.68% y 8.99% mayor que las obtenidas para la orientación 1 en 17-4PH, A2 y H13 respectivamente.

Tabla 48.- Variación del promedio obtenido de las probetas ensayadas por orientación entre los diferentes materiales empleados para E

Variación del módulo de elasticidad promedio (E) de todos los materiales ensayados				
Materiales (Orientación 1 / Orientación 2)	SS / SSC	A2 / A2C	H13 / H13C	INC / INCC
SS / SSC	---	+1,74 / -2,33	-16,61 / -2,24	-6,12 / -16,81
A2 / A2C	-1,77 / +2,28	---	-18,68 / +0,09	-8,00 / -14,14
H13 / H13C	+14,24 / +2,19	+15,74 / -0,09	---	8,99 / -14,25
INC / INCC	+5,77 / +14,39	+7,41 / +12,39	-9,88 / +12,47	---

Límite de fluencia al 0,2%: para este caso, observando las gráficas anteriores y la siguiente Tabla 49, se puede comprobar que los valores obtenidos de Rp para las probetas de 17-4PH y H13 son los más cercanos. No obstante, los valores de H13 son, en ambas orientaciones, superiores en un 10.33% y un 2.74% a la orientación 1 y la 2 del acero inoxidable 17-4PH respectivamente. Con respecto a los

resultados obtenidos para el acero A2 y el INC 625 se puede comprobar que los resultados obtenidos se encuentran muy por debajo de estos dos primeros materiales analizados.

Tabla 49.- Variación del promedio obtenido de las probetas ensayadas por orientación entre los diferentes materiales empleados para Rp

Comparación del Límite de fluencia al 0.2% promedio (Rp) de todos los materiales ensayados				
Materiales (Orientación 1 / Orientación 2)	SS / SSC	A2 / A2C	H13 / H13C	INC / INCC
SS / SSC	---	+58,20 / +49,77	-10,33 / -2,74	+53,27 / +52,34
A2 / A2C	-139,21 / -99,10	---	-163,92 / -104,56	-11,78 / +5,10
H13 / H13C	+9,37 / +2,67	+62,11 / +51,11	---	+57,65 / +53,61
INC / INCC	-114,01 / -109,81	+10,54 / -5,38	-136,12 / -115,56	---

Resistencia máxima a la tracción: Para este caso, observando las gráficas anteriores y la Tabla 50, los valores de H13 para ambas orientaciones son superiores al resto de materiales con una clara diferencia sobre el segundo, el 17-4PH, de un 35.74% y 11.23% respectivamente. Por otro lado, se puede ver que el acero para herramienta A2 se encuentra muy por debajo con el resto de materiales utilizados.

Tabla 50.- Variación del promedio obtenido de las probetas ensayadas por orientación entre los diferentes materiales empleados para Rm

Comparación de la resistencia a la tracción promedio (Rm) de todos los materiales ensayados				
Materiales (Orientación 1 / Orientación 2)	SS / SSC	A2 / A2C	H13 / H13C	INC / INCC
SS / SSC	---	+50,24 / +42,75	-35,74 / -11,23	+30,09 / +31,91
A2 / A2C	-100,96 / -74,67	---	-172,78 / -94,28	-40,48 / -18,94
H13 / H13C	+9,37 / +2,67	+63,84 / +48,53	---	+48,50 / +38,78
INC / INCC	-114,01 / -109,81	+28,82 / +15,92	-94,18 / -63,34	---

Límite de rotura: viendo las gráficas y la Tabla 51 siguiente, la tendencia observada en la resistencia máxima a la tracción se mantiene también en el caso del límite de rotura. El acero H13 en probetas planas vuelve a destacar como el material con mayor resistencia a la rotura, siendo un 40.75% y 11.25% superior al segundo que sería el 17-4PH. En este caso el A2 vuelve a ser el que está en último lugar.

Tabla 51.- Variación del promedio obtenido de las probetas ensayadas por orientación entre los diferentes materiales empleados para Ru

Comparación del Límite de rotura promedio (Ru) de todos los materiales ensayados				
Materiales (Orientación 1 / Orientación 2)	SS / SSC	A2 / A2C	H13 / H13C	INC / INCC
SS / SSC	---	+49,25 / +42,92	-40,75 / -11,24	+28,19 / +33,03
A2 / A2C	-97,06 / -75,18	---	-177,36 / -94,88	-41,52 / -17,32
H13 / H13C	+28,95 / +10,11	+63,95 / +48,69	---	+48,98 / +39,80
INC / INCC	-39,25 / -49,32	+29,34 / +14,76	-95,99 / -66,11	---

Alargamiento a la rotura: para este último parámetro analizado, volviendo a analizar las gráficas y la Tabla 52 siguiente, se puede comprobar una destacable superioridad del Inconel 625 en este parámetro analizado respecto al resto de materiales ensayados. Comparando los tres restantes, se puede ver que el A2 es prácticamente inferior con el resto menos para el caso del acero H13 para la orientación de canto, donde su valor un 0.43% superior de media que el obtenido para el H13.

Tabla 52.- Variación del promedio obtenido de las probetas ensayadas por orientación entre los diferentes materiales empleados para A

Comparación del alargamiento a la rotura promedio (A) de todos los materiales ensayados				
Materiales (Orientación 1 / Orientación 2)	SS / SSC	A2 / A2C	H13 / H13C	INC / INCC
SS / SSC	---	+84,38 / +64,61	+29,75 / +64,76	-830,48 / -754,67
A2 / A2C	-540,35 / -182,53	---	-349,86 / +0,43	-5858,33 / -2314,70
H13 / H13C	-42,34 / -183,75	+77,77 / -0,43	---	-1224,49 / -2325,10
INC / INCC	+89,25 / +88,30	+98,32 / +95,86	+92,32 / +95,88	---

5.- ENSAYO DE DUREZA

5.1.- Recopilación de los resultados obtenidos

Inicialmente, se tenía previsto realizar los ensayos de dureza en tres puntos diferentes de cada una de las probetas, sin importar si estos puntos correspondían a la zona de las mordazas o a la zona situada entre las marcas de la pieza. Sin embargo, tras llevar a cabo los ensayos de tracción en varias probetas, se observó que las pequeñas entallas generadas por el ensayo previo de dureza podrían alterar significativamente los resultados obtenidos en los ensayos de tracción. Estas alteraciones se deben a las deformaciones locales en la superficie de las probetas, las cuales podrían influir negativamente en la medición de la tracción y no reflejar con precisión las propiedades reales del material.

Como resultado de esta observación, se decidió modificar el enfoque y concentrar la medición de dureza únicamente en las zonas de las mordazas (en la zona central se colocará una X en las tablas de resultados), tanto en la cara superior como en la cara inferior de las probetas. Esta decisión se fundamentó en el hecho de que las mordazas son las áreas que permanecen sin alteraciones significativas tras el ensayo de dureza, lo que garantiza que los resultados obtenidos en estas zonas sean más representativos de las propiedades del material sin interferencias de las deformaciones provocadas por el ensayo de dureza. En consecuencia, se ajustó el procedimiento de medición para asegurar que los valores de dureza medidos fueran los más precisos y consistentes posibles, minimizando cualquier efecto que pudiera distorsionar los datos del ensayo de tracción.

Para entender las tablas que se mostrarán, el significado de las siglas que aparecen son las siguientes:

- CS - Cara superior. Se entiende como la cara superior de la probeta tras la impresión. Es la cara donde siempre va a estar escrito el código de la probeta.
- CI - Cara inferior. Se entiende como la cara inferior de la probeta tras la impresión. Es la cara que quedaba siempre pegada a la cama de la impresora.

Con respecto a la orientación de las mordazas, las cuales siempre toman como referencia la cara superior CS y el marcado de referencia (Figura 78), utilizado para el ensayo de tracción, que indicará siempre cual es la mordaza izquierda y la derecha, se explica mejor viendo una imagen de ejemplo:

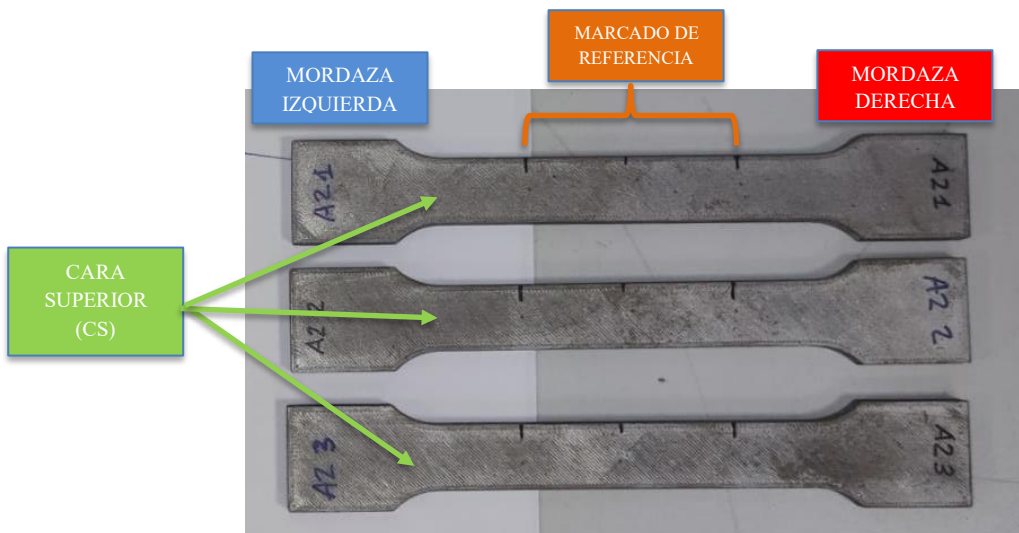


Figura 78.- Dibujo para entender la nomenclatura utilizada en la toma de resultados de los ensayos de dureza realizados [Fuente propia]

Por otro lado, a su vez se procederá a graficar los resultados obtenidos en los ensayos de dureza realizados sobre las diferentes probetas. El objetivo principal de estas gráficas es analizar si la dureza varía de manera significativa entre los distintos materiales ensayados, o si, por el contrario, los valores de dureza son similares en todos los casos.

Además, se analizará específicamente la comparación de la dureza medida en las dos caras de cada probeta, es decir, la cara superior (CS) y la cara inferior (CI). En este sentido, se podrá observar si existe una diferencia apreciable entre la dureza de la cara superior y la cara inferior, determinando si la dureza de la cara superior es superior o inferior a la de la cara inferior, o si, por el contrario, los valores de dureza en ambas caras son similares. Además, el valor medido en la zona central no se va a tener en cuenta ya que falta información al respecto para analizar mejor.

Para una visualización más clara de los resultados, en todas las gráficas se representará el número de cada probeta analizada en el eje X, el cual indica la orientación de la probeta en el ensayo. En el eje Y, se situará el valor de la dureza medida en la escala Rockwell C (HRC), que ha sido calculado para cada probeta.

Una vez representados los resultados, se procederá a analizar los datos obtenidos, destacando aquellos valores que presenten particular relevancia o que se desvíen de lo esperado. De esta manera, se podrán identificar patrones o comportamientos notables en los resultados de dureza y facilitar su interpretación en el contexto de los materiales ensayados.

Por último, para poder analizar los resultados hay que conocer los valores reales de dureza HRC de cada material utilizado para el método de fabricación utilizado y el tratamiento de sinterizado aplicado. Observando las fichas de materiales adjuntas en el anexo del presente documento, se puede determinar que el valor de dureza HRC esperado para cada uno de los materiales es el siguiente (Tabla 53):

Tabla 53. - Valores teóricos de dureza estimados según el fabricante para las probetas ensayadas [6]

Material	Valor teórico HRC
Acero inoxidable 17-4PH (SS)	36
Acero para herramienta A2 (A2)	50
Acero para herramienta H13 (H13)	40
Inconel 625 (INC)	7

Por tanto, conocido lo anterior y una vez realizado el ensayo de las 39 probetas fabricadas, los resultados obtenidos para cada uno de los materiales empleados, según su orientación de fabricación, son los siguientes.

5.2.- Análisis de resultados

5.2.1.- Acero inoxidable 17-4PH

Tabla 54.- Valores obtenidos del ensayo de dureza de las probetas de acero inoxidable 17-4PH

PROBETA	MORDAZA IZQ.	CENTRO	MORDAZA DCHA.	CARA
SS1	---	---	---	CS
	---	---	---	CI
SS2	37	37	32	CS
	33	34	31	CI
SS3	33	---	38.5	CS
	35	---	36.5	CI
SS4	30	---	34	CS
	19	---	24	CI
SS5	33.5	---	39	CS
	34.5	---	31.5	CI
PROBETA	MORDAZA IZQ.	CENTRO	MORDAZA DCHA.	CARA
SSC1	---	---	---	CS
	---	---	---	CI
SSC2	34	29	34	CS
	31.5	26	29	CI
SSC3	24,5	32	27,5	CS
	22	30	24.5	CI
SSC4	29	---	21,5	CS
	27,5	---	24	CI
SSC5	25	---	26,5	CS
	28	---	27	CI

Teniendo en cuenta la Tabla 54, los resultados obtenidos para cada orientación son los siguientes:

A.- Probetas con orientación 1 o planas

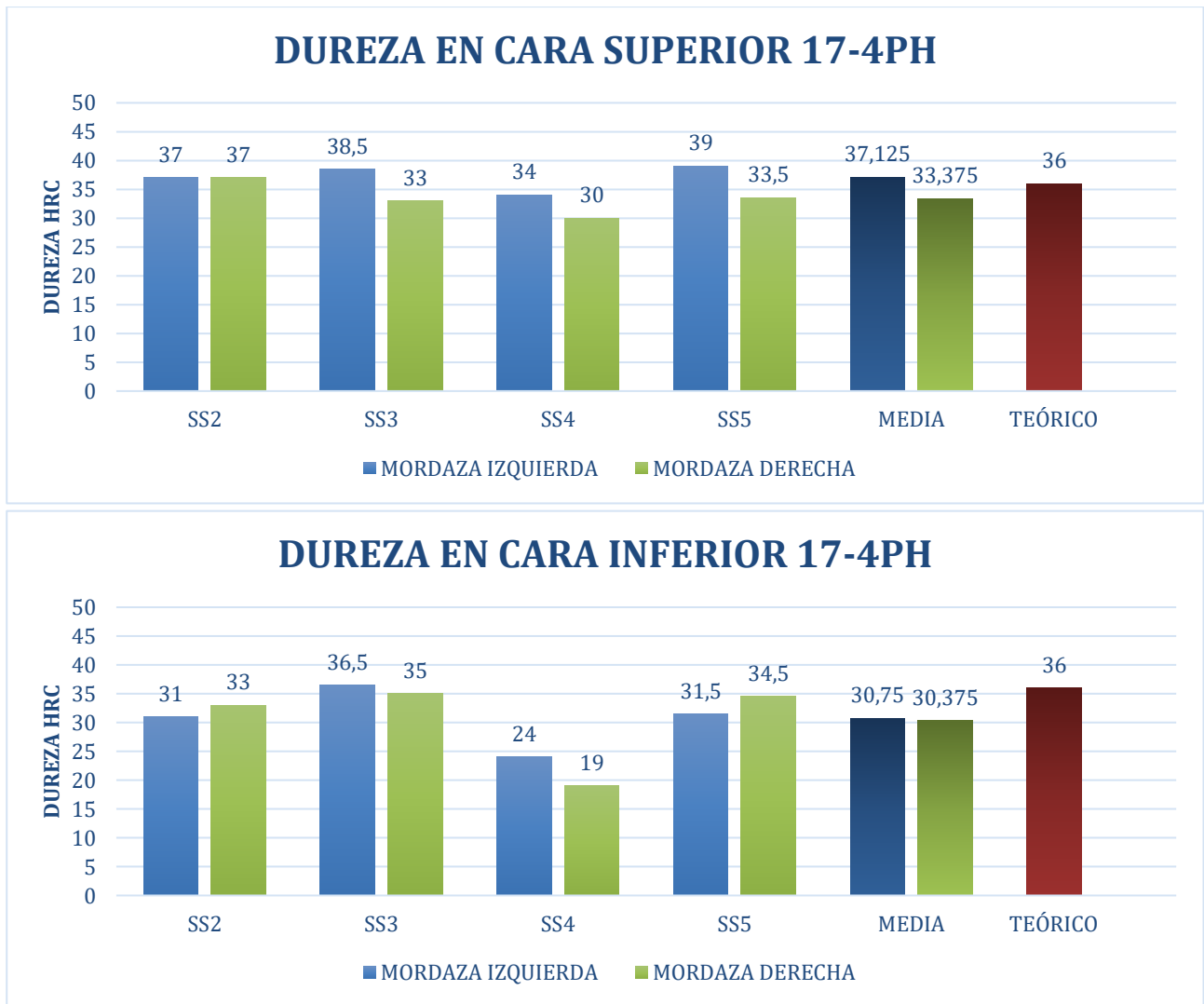


Figura 79.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]

B.- Probetas con orientación 2 o de canto

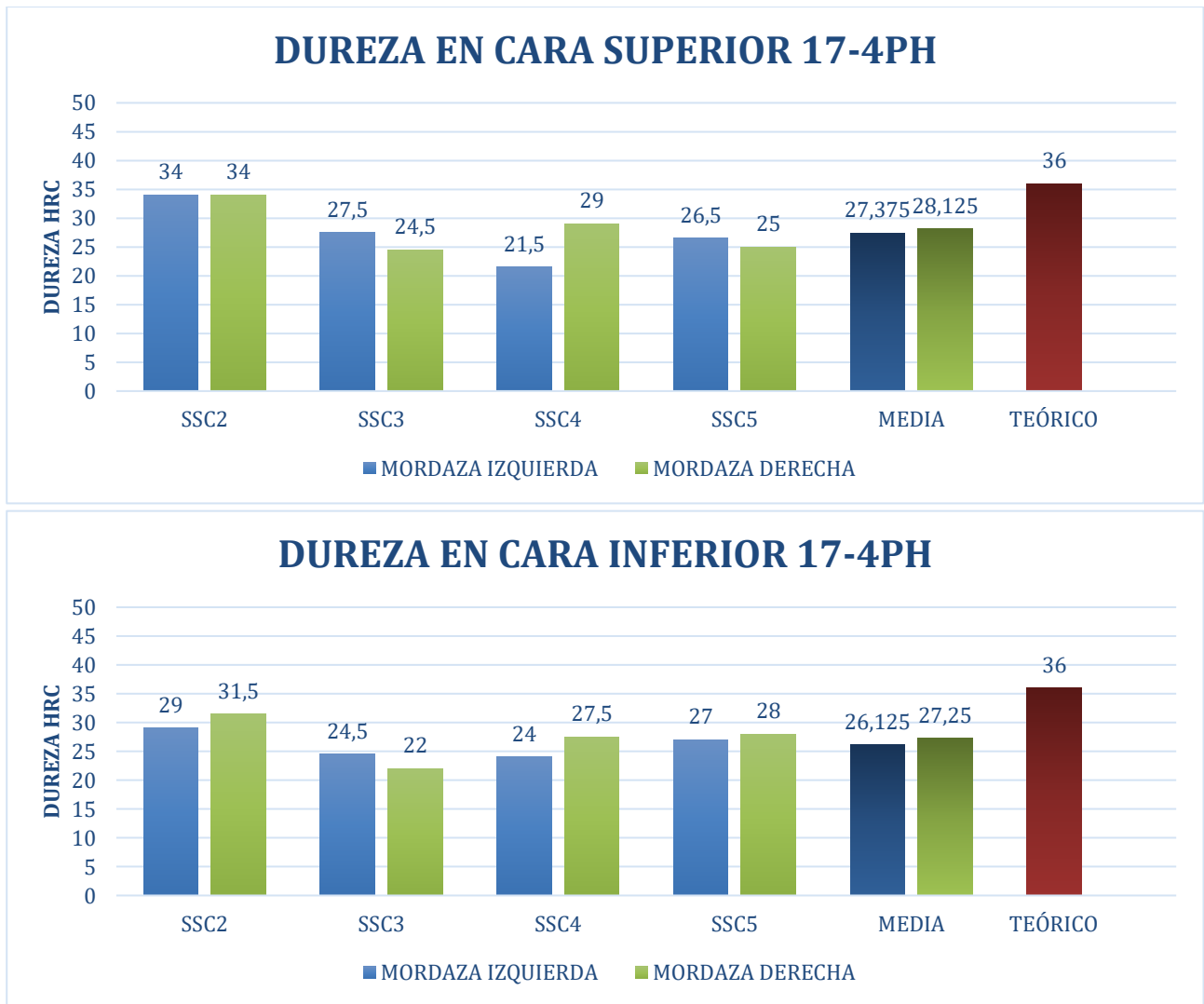


Figura 80.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]

5.2.2.- Acero para herramientas A2

Tabla 55.- Valores obtenidos del ensayo de dureza de las probetas de acero de herramientas A2

PROBETA	MORDAZA IZQ.	CENTRO	MORDAZA DCHA.	CARA
A21	32,5	28	34	CS
	30,5	25	30	CI
A22	34,5	35	30,5	CS
	24	32	25	CI
A23	31,5	29,5	35	CS
	27,5	22	30	CI
A24	33	---	29,5	CS
	34,5	---	32	CI
A25	22	---	29,5	CS
	28,5	---	33,5	CI
PROBETA	MORDAZA IZQ.	CENTRO	MORDAZA DCHA.	CARA
A2C1	30	31	23	CS
	32,5	31,5	34,5	CI
A2C2	32	34,5	32	CS
	33,5	30	32	CI
A2C3	28,5	---	38,5	CS
	41,5	---	41	CI
A2C4	41,5	---	40	CS
	41	---	41,5	CI
A2C5	28,5	---	26	CS
	31	---	26,50	CI

Teniendo en cuenta la Tabla 55, los resultados obtenidos para cada orientación son los siguientes:

A.- Probetas con orientación 1 o planas

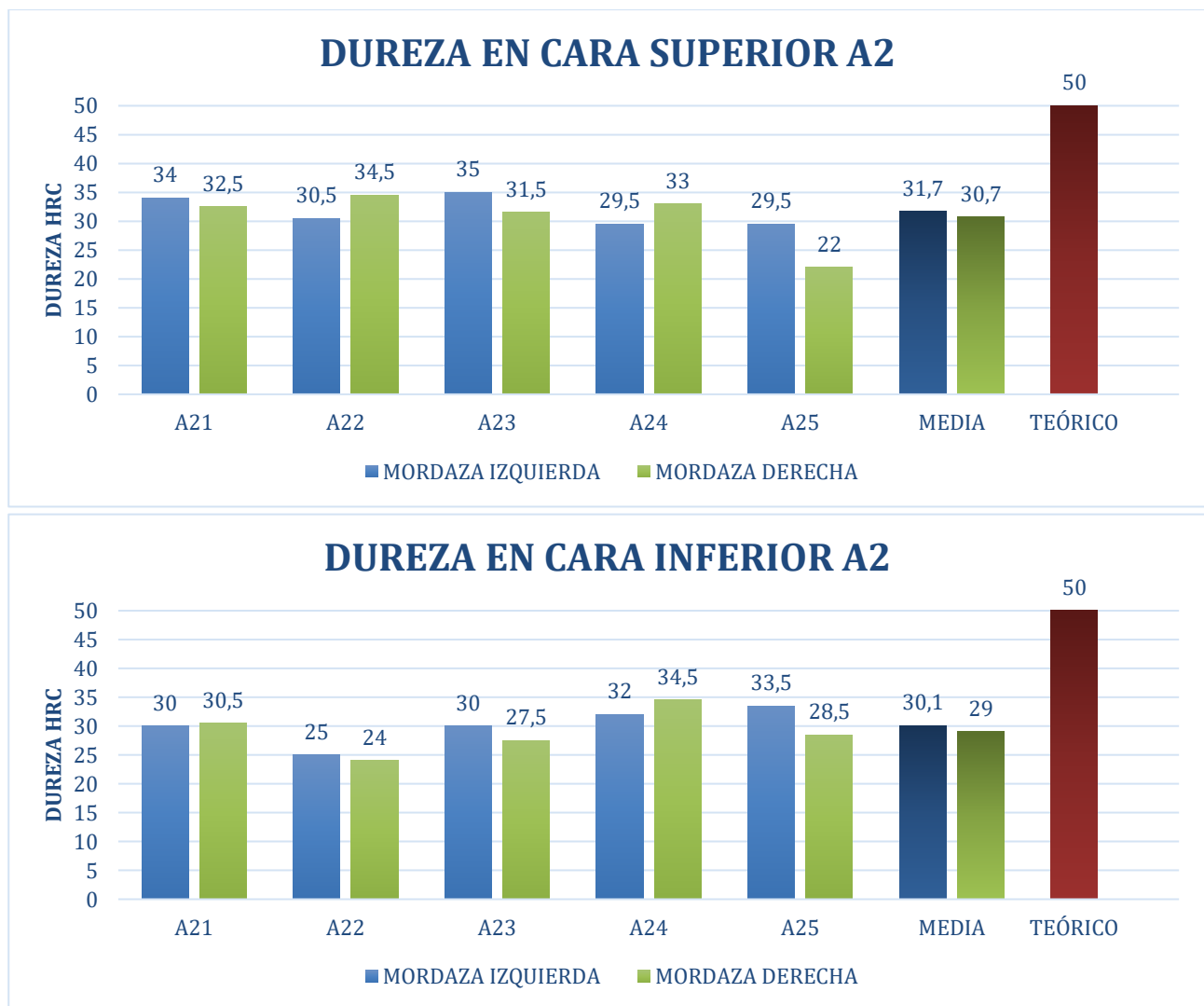


Figura 81.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]

B.- Probetas con orientación 2 o de canto

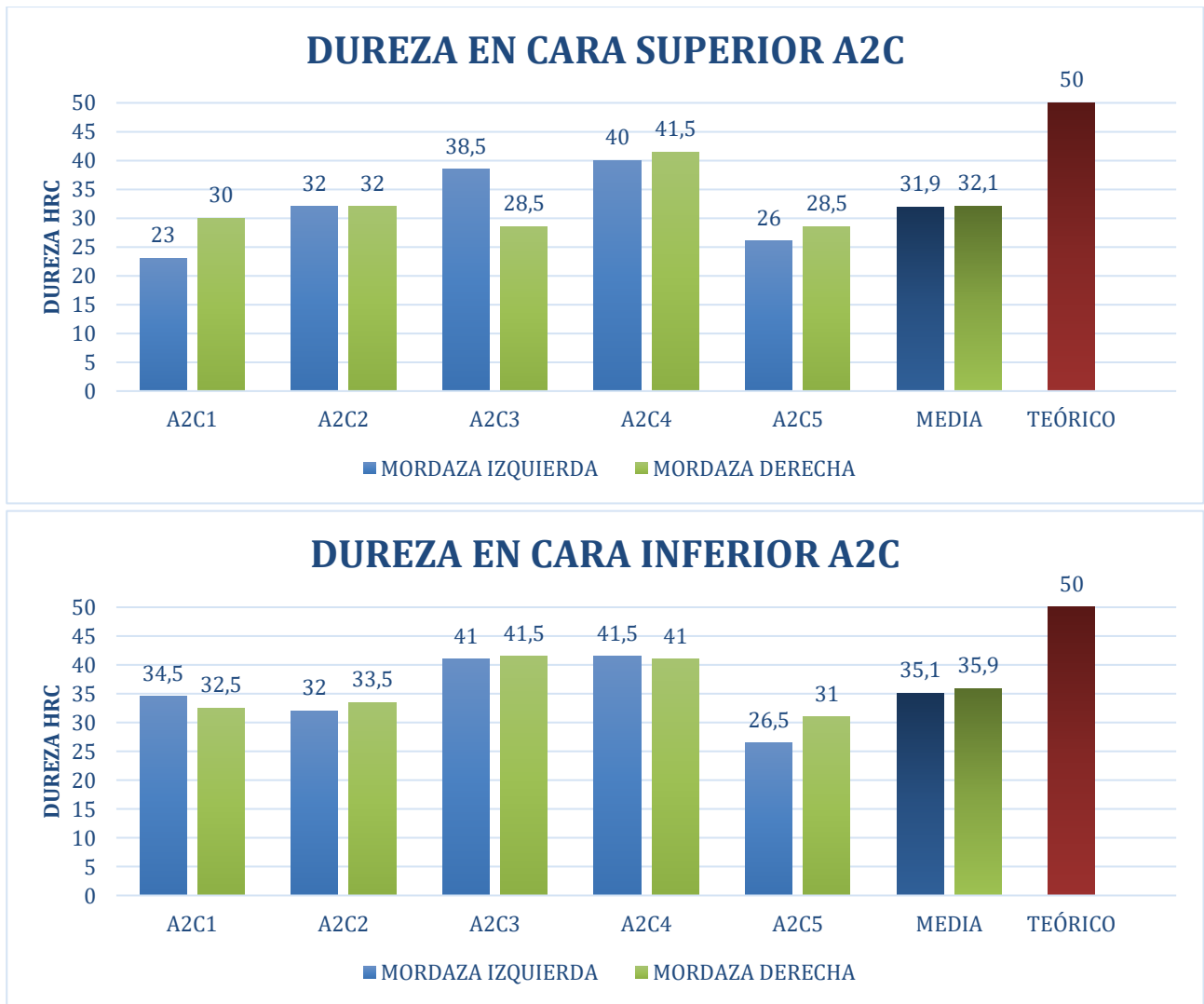


Figura 82.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]

5.2.3.- Acero para herramientas H13

Tabla 56.- Valores obtenidos del ensayo de dureza de las probetas de acero de herramientas H13

PROBETA	MORDAZA IZQ.	CENTRO	MORDAZA DCHA.	CARA
H131	37	---	39,5	CS
	36	---	40	CI
H132	37	---	39,5	CS
	37,5	---	38	CI
H133	37,5	---	40	CS
	29	---	41	CI
H134	37,5	---	42	CS
	44,5	---	43	CI
H135	41,5	---	43,5	CS
	42,5	---	45,5	CI
H136	40	---	41	CS
	42	---	40,5	CI
PROBETA	MORDAZA IZQ.	CENTRO	MORDAZA DCHA.	CARA
H13C1	30	---	39	CS
	36	---	37	CI
H13C2	36	---	31	CS
	34	---	28,5	CI
H13C3	31	---	32,5	CS
	28	---	26	CI
H13C4	29	---	26,5	CS
	38,5	---	36,5	CI
H13C5	29,5	---	33,5	CS
	33	---	32	CI

Teniendo en cuenta la Tabla 56, los resultados obtenidos para cada orientación son los siguientes:

A.- Probetas con orientación 1 o planas

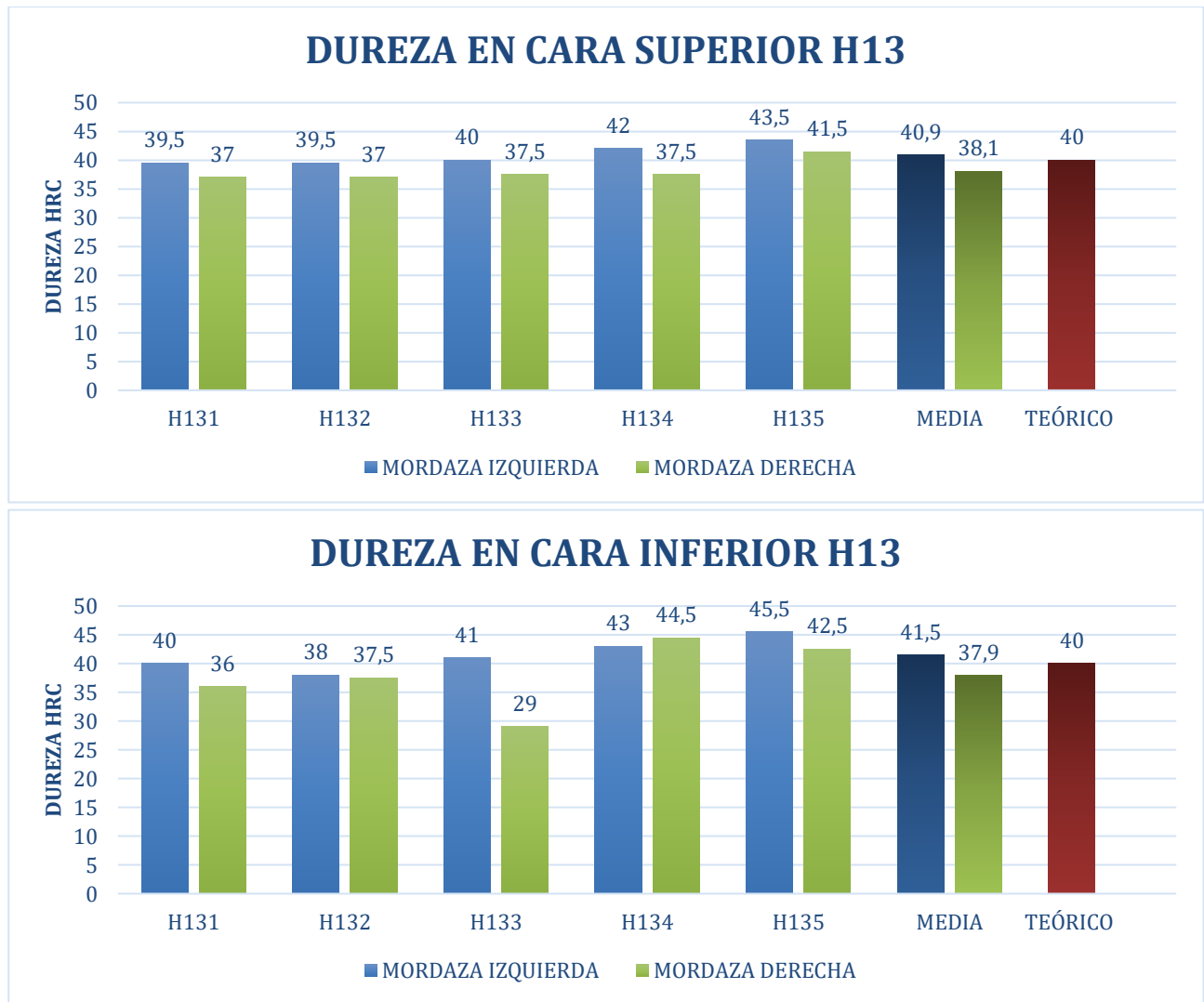


Figura 83.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]

B.- Probetas con orientación 2 o de canto

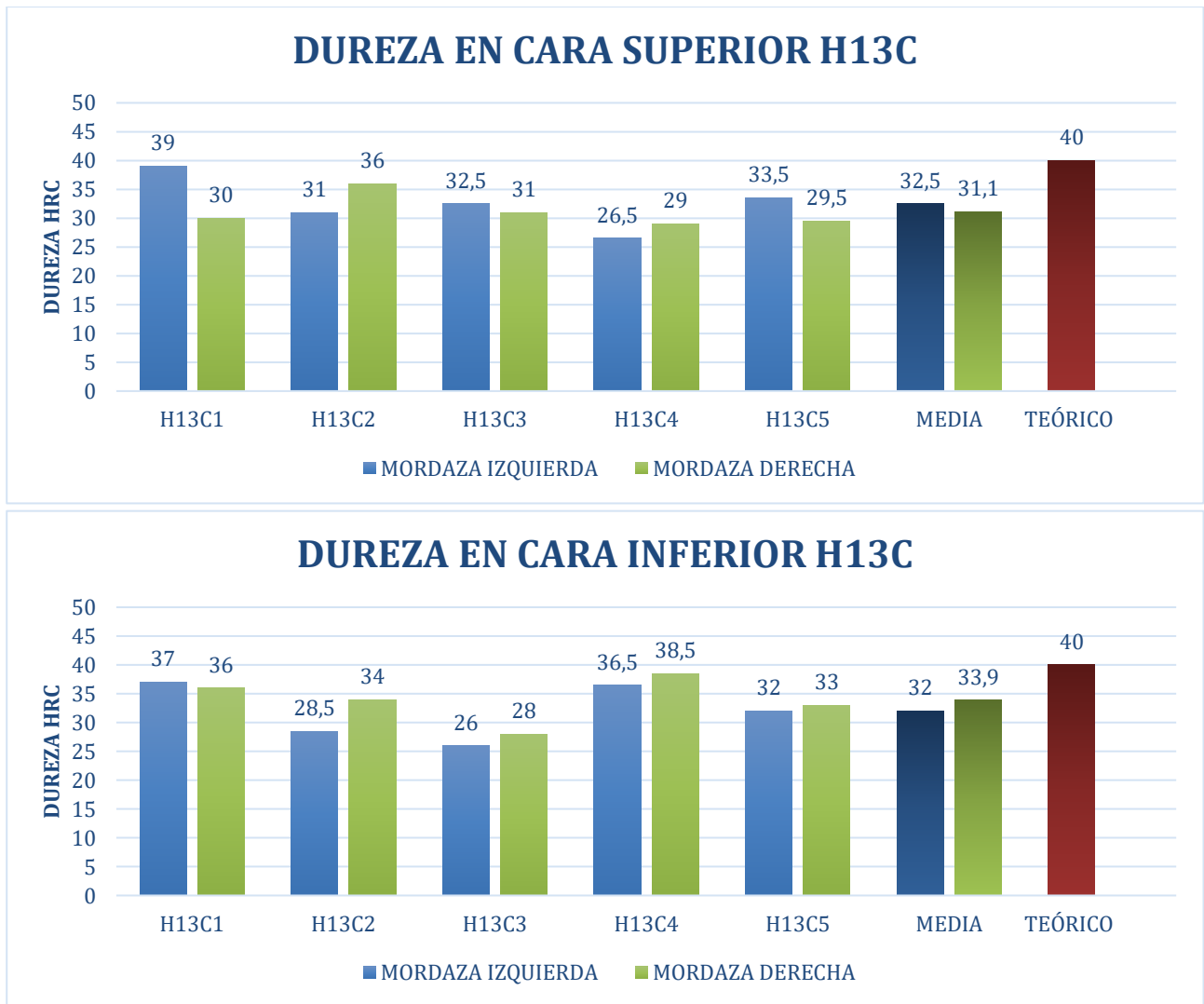


Figura 84.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]

5.2.4.- Inconel 625

Los valores de dureza HRC obtenidos en los ensayos se han recopilado en la siguiente Tabla 57:

Tabla 57.- Valores obtenidos del ensayo de dureza de las probetas de Inconel 625

PROBETA	MORDAZA IZQ.	CENTRO	MORDAZA DCHA.	CARA
INC1	8	---	8,5	CS
	7	---	10,5	CI
INC2	8	---	6	CS
	10	---	5	CI
INC3	4	---	10	CS
	9	---	4	CI
INC4	7	---	4	CS
	9	---	3	CI
PROBETA	MORDAZA IZQ.	CENTRO	MORDAZA DCHA.	CARA
INCC1	4,5	---	3,5	CS
	6	---	4,5	CI
INCC2	6	---	4,5	CS
	6,5	---	4,5	CI
INCC3	4,5	---	5,5	CS
	4	---	4,5	CI
INCC4	7,5	---	9,5	CS
	3	---	7	CI
INCC5	2,5	---	2	CS
	5	---	4	CI
INCC6	4,5	---	6,5	CS
	2,5	---	4,5	CI

Teniendo en cuenta la tabla anterior, los resultados obtenidos para cada orientación son los siguientes:

A.- Probetas con orientación 1 o planas

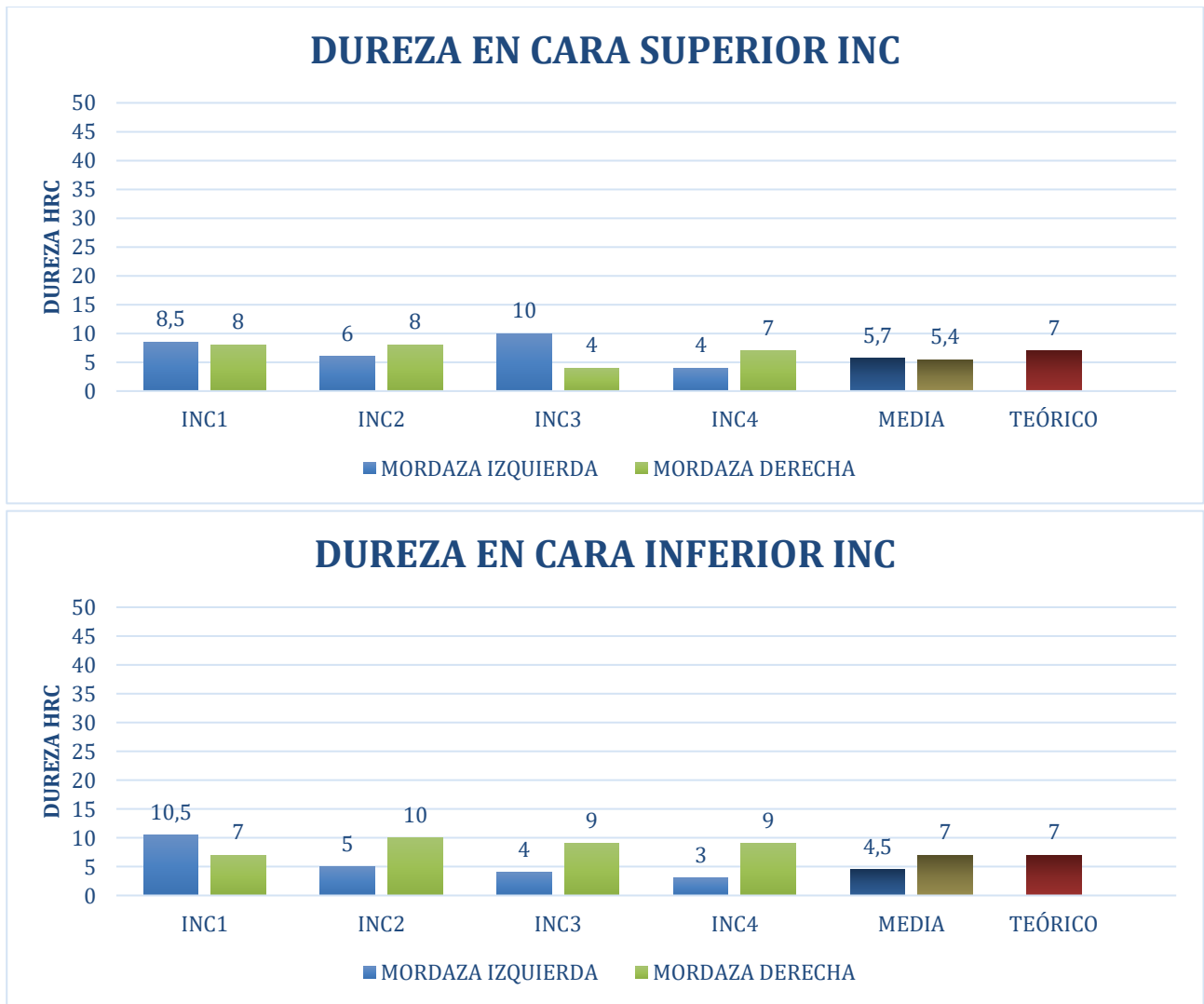


Figura 85.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]

B.- Probetas con orientación 2 o de canto

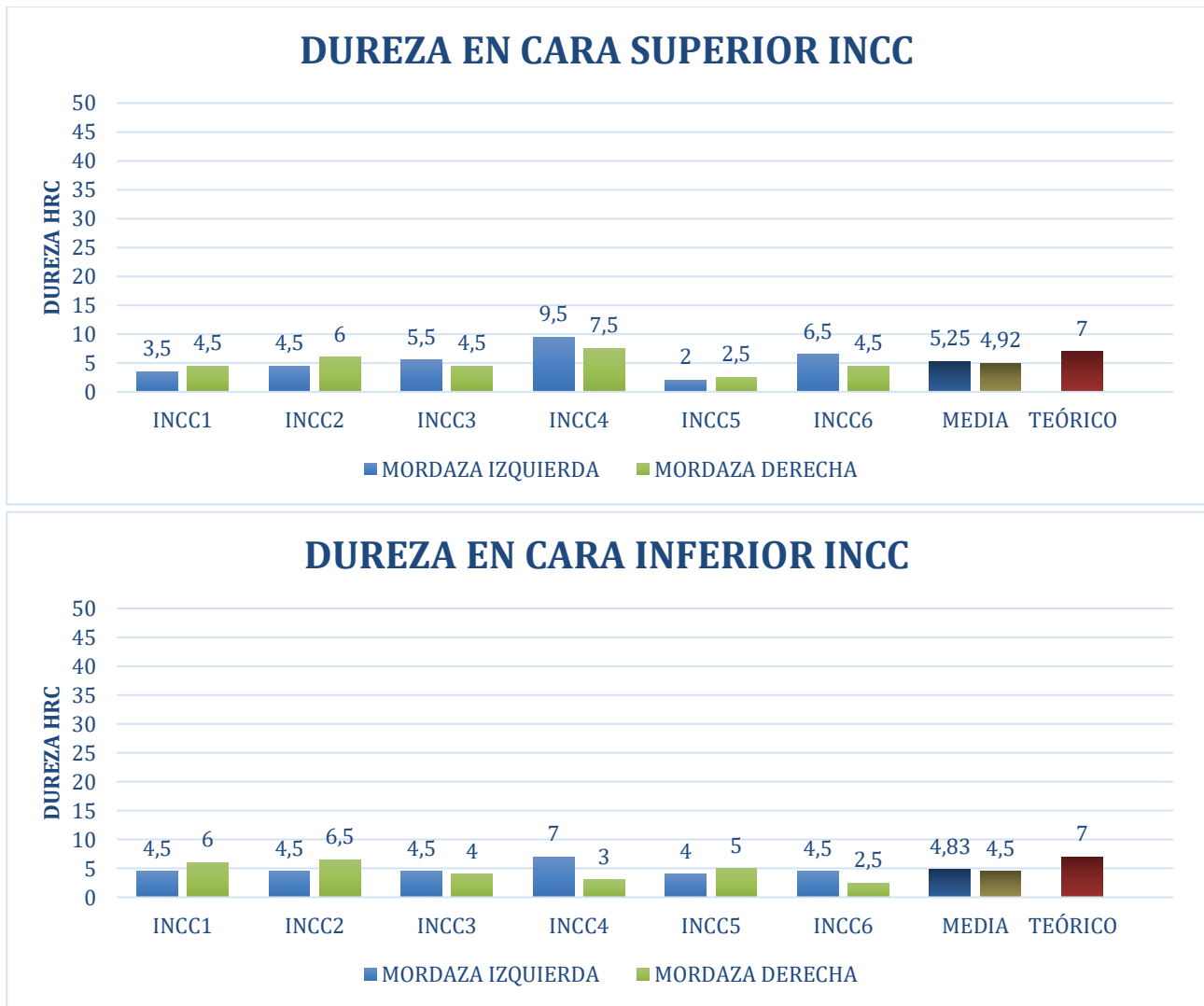


Figura 86.- Medidas de dureza HRC obtenidas por probeta en ambas caras [Fuente propia]

5.3.- Correlación resultados de dureza-tracción

Teniendo en cuenta los análisis resultados en los apartados anteriores se puede realizar las siguientes observaciones relacionando los análisis de dureza y tracción:

1.- **Acero inoxidable 17-4PH.** En el caso del 17-4PH, los valores de dureza Rockwell C obtenidos se sitúan por debajo de los valores teóricos esperados para este tipo de acero, aunque permanecen dentro de un intervalo razonable teniendo en cuenta las particularidades del proceso FFF. En cuanto al módulo de elasticidad, los valores experimentales resultaron bastante consistentes entre ambas orientaciones (plana y canto), y cercanos al valor de referencia proporcionado por el fabricante Markforged [6], lo que indica una adecuada rigidez en el material fabricado. Respecto al límite de fluencia, también se observaron resultados similares entre orientaciones, lo que sugiere que la resistencia al inicio de la deformación plástica no se ve fuertemente afectada por la dirección de impresión. Sin embargo, el alargamiento a la rotura sí mostró una clara disminución respecto a los valores obtenidos mediante procesos convencionales: mientras que los valores para fabricación

tradicional pueden alcanzar entre un 16 % y 18 %, los obtenidos por FFF apenas se acercan al 7 %, según datos del fabricante, lo que evidencia una pérdida significativa de ductilidad. Este fenómeno implica que, aunque el material mantiene cierta resistencia, presenta una tendencia a fracturarse sin grandes deformaciones previas, con un comportamiento transicional hacia la fragilidad.

2.- Acero para herramientas A2. Para el acero A2, se ha detectado una correlación positiva entre los valores de dureza Rockwell C y los parámetros mecánicos en función de la orientación. Las probetas de canto presentan mayor dureza, lo que se refleja en un módulo de elasticidad y un límite de fluencia también más elevados respecto a las probetas planas. No obstante, ambos parámetros siguen siendo inferiores a los esperados para piezas fabricadas por técnicas convencionales, lo que pone de manifiesto la limitación del proceso FFF en la consolidación del material. En cuanto al alargamiento a la rotura, los resultados son muy bajos en todas las probetas, claramente por debajo del 4–5 % típico del acero A2, lo que indica un comportamiento eminentemente frágil. La combinación de baja dureza y escasa deformación plástica sugiere que el material no es capaz de absorber energía antes de fracturarse, presentando fallos sin apenas advertencia previa.

3.- Acero para herramientas H13. Los valores de dureza HRC del acero H13 están en línea con los valores de referencia, lo que sugiere una adecuada resistencia superficial del material sinterizado. Sin embargo, el análisis de tracción pone en evidencia una anisotropía mecánica significativa. Las probetas planas presentan límites de fluencia y alargamientos a la rotura próximos a los valores teóricos esperados (3–4 %), lo que las clasifica como mínimamente dúctiles. Por el contrario, las probetas de canto exhiben un alargamiento inferior al 1 %, revelando un comportamiento frágil con una tendencia clara a la rotura temprana. Esta diferencia responde a la debilidad de las uniones intercapas cuando se imprimen en orientación vertical, lo cual limita drásticamente la capacidad del material para deformarse antes de romperse. Desde el punto de vista técnico, esto implica que las piezas impresas en orientación plana ofrecen una mayor fiabilidad estructural frente a cargas dinámicas o impactos.

4.- Inconel 625. En el caso del Inconel 625, la dureza Rockwell C obtenida es baja pero coherente con los valores esperados para este material. Los valores del módulo de elasticidad y del límite de fluencia se aproximan notablemente a los proporcionados por el fabricante, lo que indica un correcto comportamiento elástico y una adecuada resistencia inicial a la deformación plástica. En cuanto al alargamiento a la rotura, se observa un patrón similar al del H13: las probetas planas muestran una elongación considerable, cercana al 40 % teórico, evidenciando una buena ductilidad y capacidad de deformación antes del fallo. En cambio, las probetas de canto presentan alargamientos mucho menores, lo cual confirma una vez más la influencia determinante de la orientación de impresión en el comportamiento final del material. Esta anisotropía estructural, asociada a la calidad de la sinterización entre capas, repercute directamente en la fiabilidad del componente ante sollicitaciones mecánicas exigentes.

La correlación entre los valores de dureza HRC y los resultados del ensayo de tracción permite identificar la naturaleza de la fractura de cada material:

- Una dureza alta con bajo alargamiento indica un material frágil.
- Una dureza moderada con un alargamiento aceptable indica un material funcional y tenaz.
- La orientación de impresión influye de forma decisiva, especialmente en materiales anisotrópicos como los obtenidos por FFF.

En conjunto, estos resultados reflejan cómo el proceso de fabricación FFF afecta de forma diferenciada a las propiedades mecánicas de los materiales metálicos, dependiendo tanto del tipo de aleación como de la orientación de impresión. La comparación entre dureza, módulo de elasticidad, límite de fluencia y alargamiento a la rotura permite establecer relaciones clave que enriquecen la comprensión del comportamiento de estos materiales en condiciones reales de servicio, especialmente en aplicaciones donde la tenacidad y la resistencia al impacto son factores críticos. Por tanto, este análisis permite anticipar el comportamiento en servicio de piezas impresas: materiales como el 17-4PH e Inconel 625 presentan propiedades adecuadas para aplicaciones funcionales, mientras que el A2 y el H13 deben evaluarse con más precaución, especialmente en orientaciones desfavorables.

6.- METALOGRAFÍA

6.1.- Probetas analizadas

Las probetas elegidas para este análisis fueron, en concreto, las identificadas como **SS1** (acero inoxidable 17-4PH), **A22** (acero A2), **H135** (acero H13) e **INC2** (Inconel 625). La elección de estas probetas se realizó atendiendo a criterios de representatividad dentro del conjunto de muestras ensayadas, buscando obtener imágenes microestructurales que pudieran reflejar de forma fiel el estado interno del material fabricado mediante AM.

Cabe destacar que, una vez realizada la preparación de muestras y los estudios correspondientes, los fragmentos enviados al SCAI no han podido ser recuperados, dado que, como es habitual en este tipo de análisis, las piezas son cortadas, embebidas, pulidas y atacadas químicamente para su posterior observación al microscopio. Este proceso implica la destrucción irreversible del material original, por lo que se asume que dichos fragmentos no estarán disponibles para futuras evaluaciones.

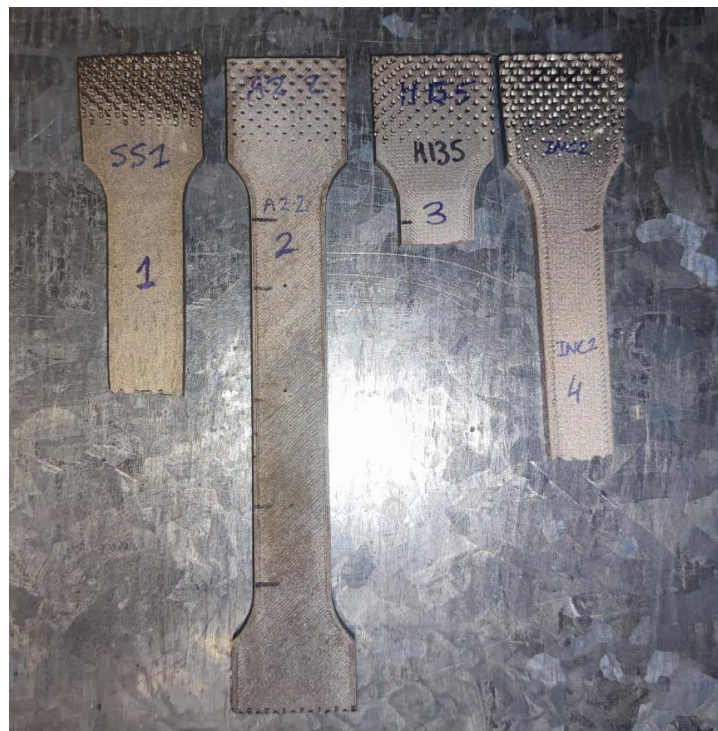


Figura 87.- Probetas enviadas al laboratorio del SCAI para el ensayo metalográfico [Fuente propia]

Una vez finalizados los distintos ensayos experimentales realizados sobre las probetas seleccionadas, y tras un periodo de espera de varias semanas debido a la planificación y carga de trabajo del laboratorio, el equipo técnico responsable logró completar el análisis metalográfico previsto. Como resultado de dicho trabajo, se obtuvieron una serie de imágenes microscópicas de las secciones seleccionadas, las cuales fueron cedidas posteriormente para su inclusión en esta memoria. Dichas imágenes, que se detallarán y analizarán en el apartado siguiente, constituyen una herramienta fundamental para complementar los resultados obtenidos en los ensayos de tracción y dureza, aportando una visión más completa sobre la estructura interna de las piezas fabricadas mediante AM.

6.2.- Micrografías

6.2.1.- Acero inoxidable 17-4PH – SS1

De la probeta SS1 se ha obtenido las siguientes imágenes:

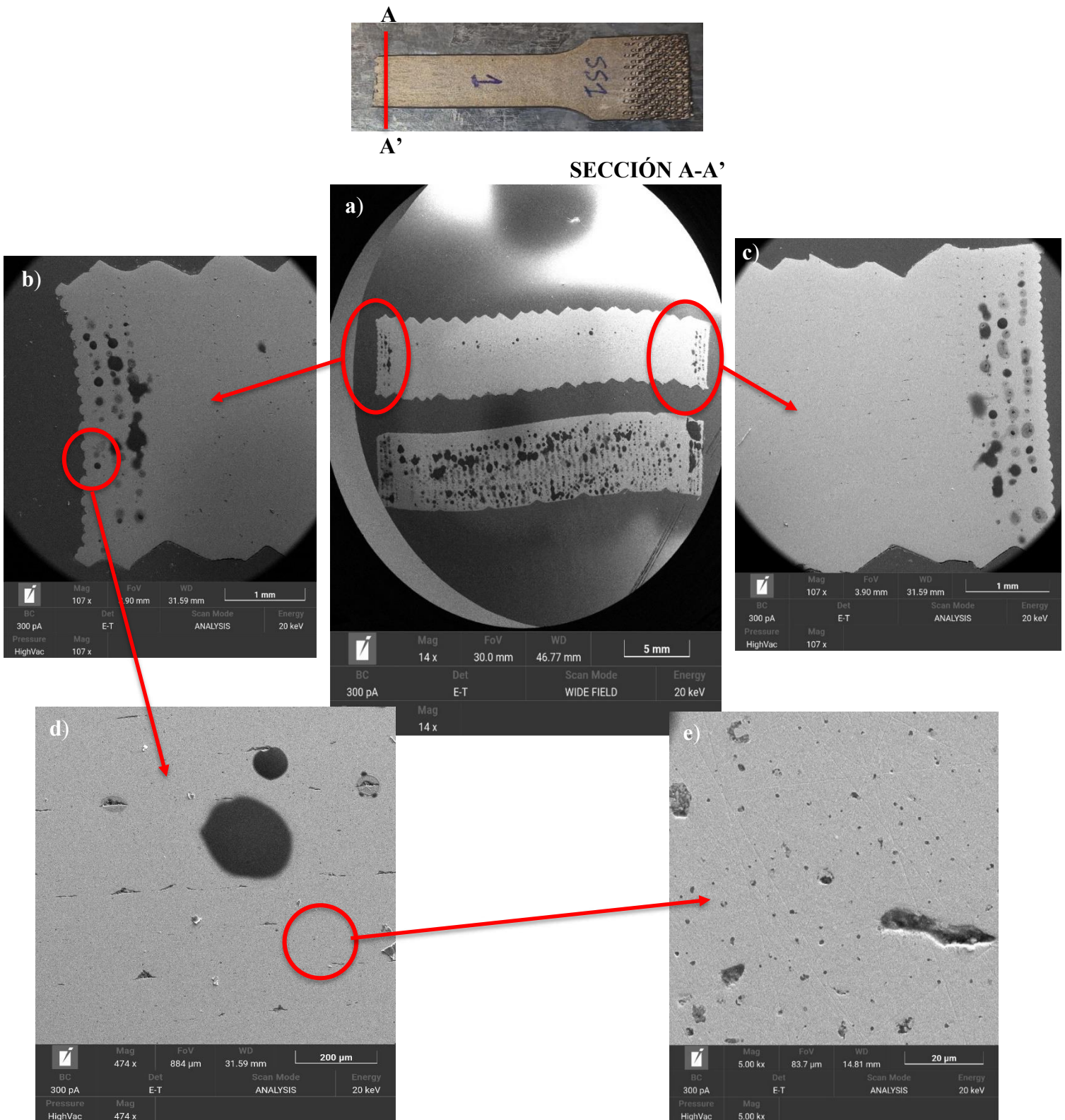


Figura 88.- Imágenes microscópicas de la estructura interna de la probeta SS1 [38].
a) x14 aumentos, b) x107 aumentos, c) x107 aumentos, d) x474 aumentos y e) x5000 aumentos.

Análisis de las imágenes mostradas:

1. Porosidad y cavidades

Las micrografías a) y b) (aproximadamente x14 y x107) revelan una porosidad heterogénea, con una distribución desigual de cavidades en la matriz metálica. En las regiones laterales de la probeta (imagen d) se identifican poros de gran tamaño, algunos de ellos con forma irregular. En estas zonas, la falta de cohesión entre partículas o capas genera cavidades que permanecen como defectos internos y reducen significativamente la densidad efectiva del material. Por otro lado, en la imagen inferior derecha (imagen e), se observan poros elongados acompañados de microgrietas radiales o perimetrales. El conjunto poro-grieta puede actuar como sitio de iniciación de fisuras bajo carga cíclica, afectando severamente la resistencia a la fatiga y la tenacidad a la fractura del componente.

2. Inclusiones y segregaciones

Se aprecian múltiples zonas oscuras (alta absorción de electrones), compatibles con inclusiones no metálicas o carburos precipitados. Estas fases secundarias pueden haberse originado por segregación de elementos como Nb, Cr, o Mo durante el tratamiento térmico. La distribución de estas partículas no parece uniforme, lo que podría derivar en zonas débiles estructuralmente, actuando como puntos de iniciación de grietas bajo carga.

3. Defectos críticos localizados: grietas internas

La imagen con mayor aumento (parte inferior derecha) muestra con claridad un defecto crítico: una grieta interna o microfisura que atraviesa parcialmente la matriz. Esta grieta está asociada a un poro preexistente de tamaño considerable y forma irregular, que probablemente funcionó como concentrador de tensiones internas. La formación de esta grieta puede estar relacionada con:

- Enfriamiento rápido y tensiones térmicas residuales no aliviadas.
- Interacciones frágiles entre inclusiones y matriz.
- Falta de continuidad entre capas en un proceso aditivo.

Este tipo de defectos puede tener un impacto severo en la vida útil del componente, especialmente en aplicaciones estructurales o bajo cargas alternantes.

6.2.2.- Acero para herramienta A2 - A22

De la probeta A22 se han obtenido las siguientes imágenes:

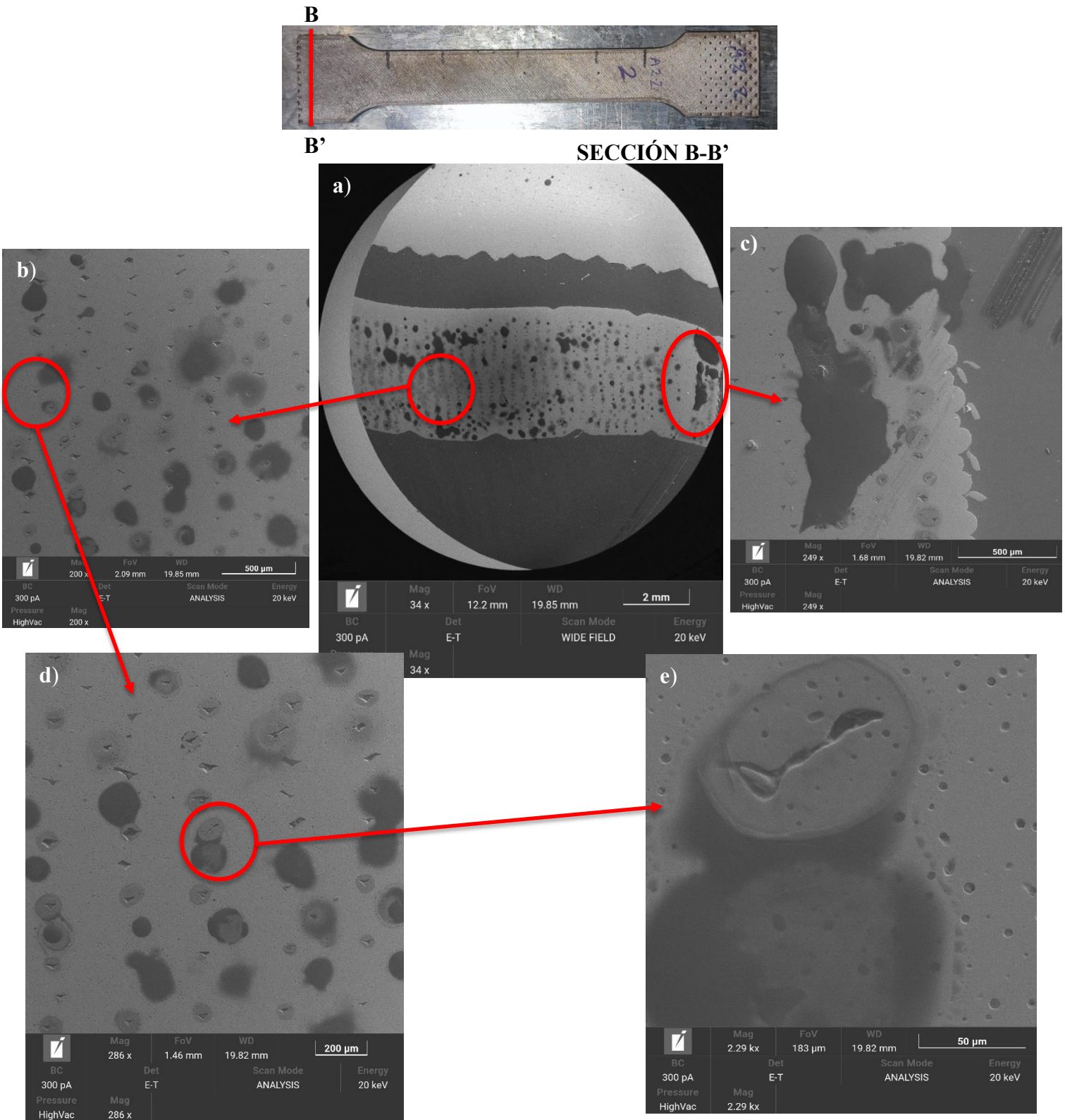


Figura 89.- Imágenes microscópicas de la estructura interna de la probeta A22 [38].
a) x34 aumentos, b) x200 aumentos, c) x249 aumentos, d) x286 aumentos y e) x2290 aumentos.

Análisis de las imágenes mostradas

1. Porosidad general y distribución

En la imagen a) (aumentos x34) se aprecia una sección transversal de la probeta con una distribución heterogénea de poros. Las zonas laterales presentan menor densidad de poros, mientras que la región central muestra una banda de alta porosidad, lo cual podría estar vinculado con una mala consolidación térmica o diferencias en el flujo térmico durante el proceso de fabricación.

2. Poros esféricos

En las imágenes con x200 y x286 aumentos se observan poros de forma predominantemente esférica, de tamaño variado. Este tipo de porosidad suele estar asociada a:

- Gases atrapados durante el procesamiento (este caso).
- Deficiente compactación del polvo en procesos pulvimetalúrgicos.

La forma redondeada sugiere que no hubo fusión o unión completa de las partículas metálicas, o bien que la presión de compactación fue insuficiente.

3. Inclusiones no metálicas o carburos

Algunas zonas muestran partículas oscuras incrustadas, probablemente inclusiones ricas en elementos como Cr, V o Mo, típicas en aceros herramienta como el A2 (alta aleación con carburos duros). Estas partículas pueden actuar como refuerzos de dureza, pero si están mal distribuidas, también pueden ser focos de concentración de tensiones.

4. Defectos críticos: porosidad conectada o con grietas internas

La micrografía inferior derecha (imagen e) destaca un poro de gran tamaño con una grieta interna. Este defecto puede ser extremadamente perjudicial para la resistencia a la fatiga y a la fractura, ya que funciona como iniciador de grietas. Su presencia en zonas sometidas a tensión (como el cuello de la probeta) puede anticipar la ruptura prematura del material.

6.2.3.- Acero para herramienta H13 - H135

De la probeta H135 se han obtenido las siguientes imágenes:

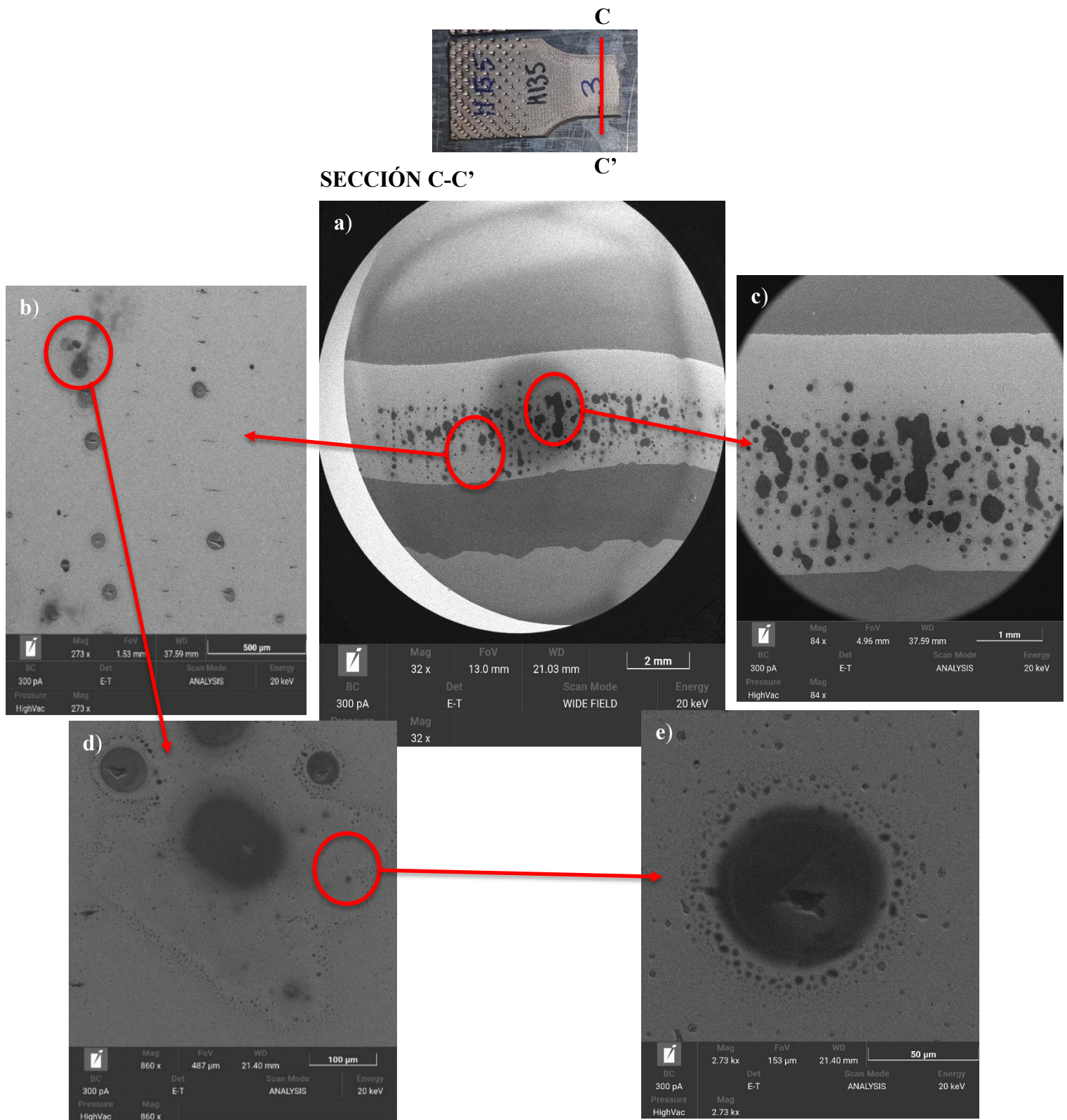


Figura 90.- Imágenes microscópicas de la estructura interna de la probeta H135 [38].
a) x32 aumentos, b) x273 aumentos, c) x84 aumentos, d) x860 aumentos y e) x2730 aumentos.

Análisis de las imágenes mostradas

1. Distribución general de porosidad

La imagen central (imagen a) muestra una zona central claramente afectada por una acumulación significativa de poros, de morfología predominantemente esférica e irregular. Esta distribución no homogénea sugiere un proceso térmico o de sinterizado no completamente optimizado, con posibles diferencias de densidad entre zonas internas y externas del material. En zonas periféricas la porosidad parece más dispersa, lo que indica una mejor consolidación de material en estas regiones.

2. Morfología de los poros

Las ampliaciones laterales revelan poros esféricos y otros con bordes irregulares. La forma esférica sugiere defectos relacionados con atrapamiento de gases durante la sinterización, mientras que los bordes irregulares podrían asociarse a colapsos parciales o falta de cohesión entre partículas metálicas. En algunas imágenes se aprecian microgrietas internas en el interior de los poros (véase imagen d), lo que puede favorecer la iniciación de fisuras bajo carga cíclica o impacto.

3. Tamaño y dispersión

Se observa una gran variabilidad de tamaño en los poros que van desde 1 mm hasta incluso las 100 micras. Esta disparidad puede inducir concentraciones de tensión localizadas, aumentando la probabilidad de fallo por fatiga o fractura frágil. En la imagen e), destaca un poro de gran tamaño con bordes rugosos y presencia de impurezas o partículas internas.

4. Presencia de posibles inclusiones internas

En varias de las micrografías (especialmente en d y e), se aprecian zonas oscuras con núcleos internos más brillantes o con contraste diferente dentro de algunos poros. Esto puede indicar la presencia de inclusiones sólidas no metálicas, atrapadas durante el proceso de fusión o sinterización (como óxidos, sulfuros o carburos). Por otro lado, en relación a la distribución dispersa de partículas finas, en la imagen superior izquierda (imagen b), se observan pequeñas partículas oscuras distribuidas uniformemente en la matriz, fuera de los poros más grandes.

6.2.4.- Inconel 625 - INC2

De la probeta H135 se han obtenido las siguientes imágenes:

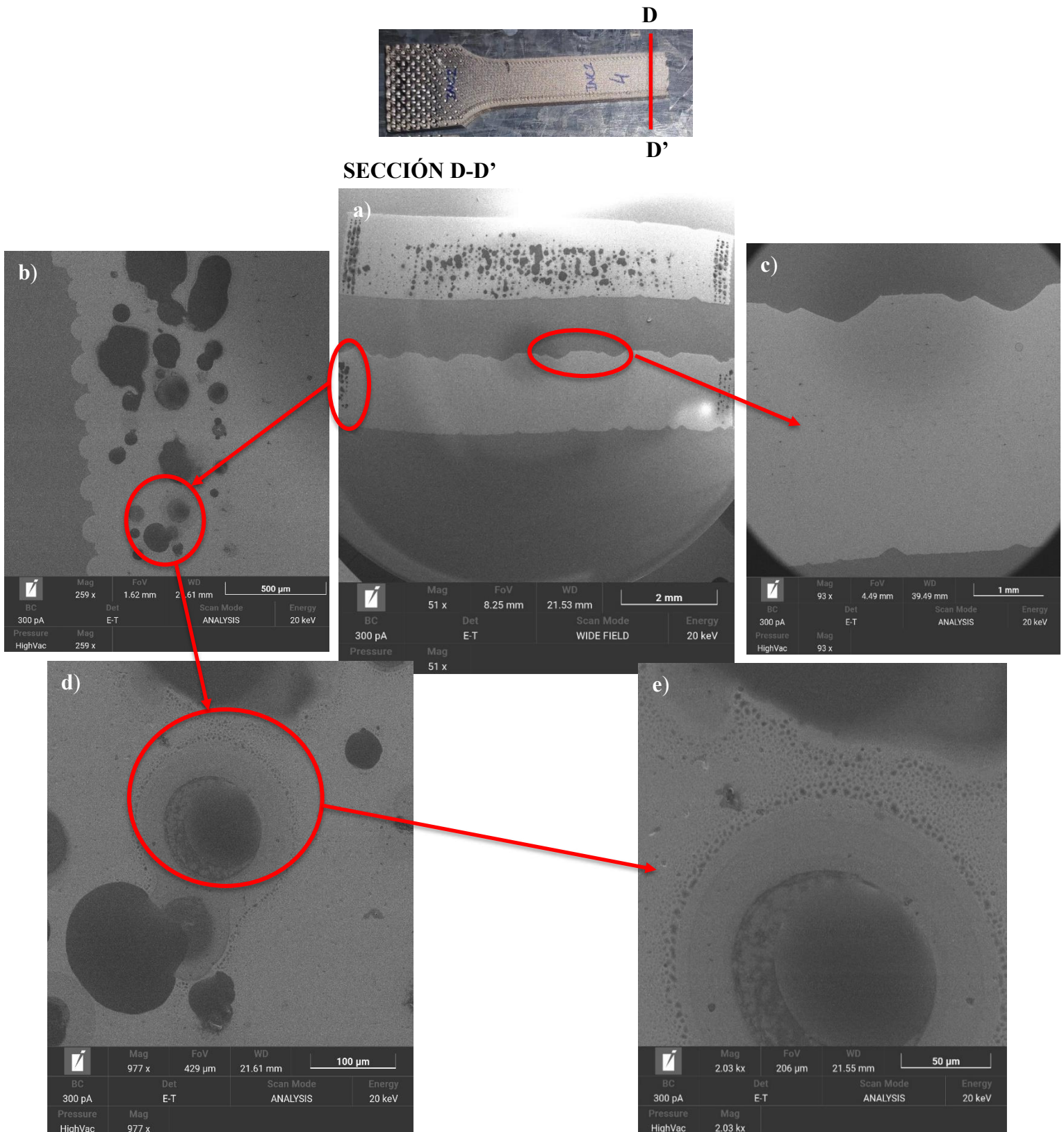


Figura 91.- Imágenes microscópicas de la estructura interna de la probeta INC2 [38].
a) x51 aumentos, b) x259 aumentos, c) x93 aumentos, d) x977 aumentos y e) x2030 aumentos.

Análisis de las imágenes mostradas:

1. Porosidad

En las imágenes observadas se identifican múltiples zonas oscuras de morfología irregular, distribuidas de forma aleatoria a lo largo de toda la microestructura del material. Estas regiones oscuras podrían corresponder a poros residuales generados durante las etapas de compactación y sinterizado. Además, dichas discontinuidades internas pueden actuar como concentradores de tensiones, afectando de forma significativa las propiedades mecánicas del material, tales como la resistencia a la tracción, la fatiga y la dureza. Además, una elevada porosidad puede comprometer la integridad estructural del componente final, especialmente en aplicaciones donde se requiera un comportamiento mecánico exigente. Por tanto, la identificación y caracterización de estos poros resulta fundamental para comprender el rendimiento del material bajo condiciones de servicio reales.

2. Tamaño y forma de grano

Es posible identificar ciertas líneas o contornos irregulares que se extienden a lo largo de la microestructura en algunas de las imágenes mostradas (por ejemplo, imagen b). Estos contornos podrían estar relacionados con los límites de grano del material, que han sido presumiblemente revelados mediante el ataque químico durante el proceso de preparación metalográfica. La observación de los límites de grano puede proporcionar información relevante sobre el historial térmico y mecánico del material, así como sobre la eficacia del proceso de sinterizado.

3. Uniformidad estructural

Las muestras presentan una distribución homogénea de fases, lo cual es positivo para el control de calidad. No se observan zonas de segregación ni estructuras dendríticas, a diferencia de métodos como la fundición. Esto indica un proceso bien controlado, con beneficios en la reducción de riesgos de fractura y en la previsibilidad de propiedades mecánicas. La ausencia de defectos típicos refuerza la eficacia del proceso para aplicaciones que requieren alta fiabilidad estructural.

4. Inclusiones o partículas dispersas

En el análisis metalográfico de ciertas áreas de la muestra, se han identificado pequeñas discontinuidades en forma de puntos oscuros (imágenes d y e), cuya naturaleza requiere una evaluación más detallada. Estas características pueden ser indicativas de inclusiones típicas en aceros, tales como óxidos o sulfuros, que son comunes en la microestructura de estos materiales. Sin embargo, es importante considerar la posibilidad de que estas irregularidades también correspondan a pequeñas cavidades formadas durante el proceso de solidificación o tratamiento térmico.

7.- CONCLUSIONES

7.1.- Conclusiones del ensayo de tracción

7.1.1.- Conclusiones particulares según el material

A.- Acero inoxidable 17-4PH

El conjunto de resultados obtenidos en los ensayos de tracción para el acero inoxidable 17-4PH pone de manifiesto la influencia significativa de la orientación de fabricación en las propiedades mecánicas de las probetas fabricadas mediante tecnología de fabricación aditiva. En líneas generales, y tomando como referencia los valores promedios obtenidos, las probetas planas han demostrado un comportamiento más favorable que las probetas fabricadas de canto en propiedades mecánicas relacionadas con la resistencia, como el límite de fluencia al 0,2 % (+4,88%), la resistencia máxima a la tracción (+7,80%), el límite de rotura (+3.98%) y el alargamiento a la rotura (+89,41%). Por su parte, las probetas de canto tienden a presentar valores más altos del módulo de elasticidad (+9,43%), lo que indica una mayor rigidez inicial frente a pequeñas deformaciones, aunque con un rendimiento algo inferior en los parámetros de resistencia y ductilidad.

Este comportamiento puede explicarse por la orientación de las capas durante la impresión, ya que en la fabricación aditiva las propiedades del material tienden a ser anisotrópicas. En las probetas planas, la dirección de aplicación de la carga en el ensayo coincide en mayor medida con la dirección de las capas depositadas, lo que favorece la cohesión interna del material y, por tanto, un mejor rendimiento frente a cargas mecánicas. En cambio, las probetas de canto están más expuestas a la separación entre capas bajo carga, lo cual podría justificar su menor resistencia a tracción y menor deformación antes de la fractura, pero a su vez una mayor rigidez inicial debido a la orientación más perpendicular de las capas respecto al eje de carga.

Asimismo, al comparar los resultados experimentales con los valores teóricos proporcionados por Markforged y con los valores estándar del acero 17-4PH fabricado por métodos convencionales, se observan diferencias notables. Por un lado, tanto los valores experimentales como los teóricos del fabricante se sitúan en general por debajo del módulo de elasticidad esperado para el mismo material fabricado convencionalmente (200 GPa), lo cual indica que la tecnología de fabricación aditiva aún presenta limitaciones en términos de rigidez del material. Esta diferencia puede deberse a la presencia de microdefectos, porosidad interna o zonas de débil fusión entre capas, características comunes en materiales obtenidos por fabricación aditiva de materiales metálicos.

Por otro lado, en cuanto a la resistencia máxima a tracción, se obtiene un resultado especialmente positivo: todos los valores experimentales superan el valor teórico del proceso convencional (930 MPa) en un +7.26% como mínimo, llegando incluso a superar los 1100 MPa en algunos casos. Este dato es particularmente relevante, ya que demuestra que, aunque se presenten limitaciones en otras propiedades, la resistencia a la tracción puede ser incluso mejorada mediante fabricación aditiva, lo que abre la puerta a aplicaciones estructurales exigentes donde esta propiedad sea prioritaria.

En cuanto a la ductilidad del material, medida a través del alargamiento a la rotura, los valores obtenidos se sitúan claramente por debajo tanto del valor teórico proporcionado por Markforged como del rango esperado en procesos convencionales. Este aspecto evidencia una de las principales debilidades del proceso aditivo: el descenso en la capacidad del material para deformarse plásticamente antes de la fractura, lo que podría afectar negativamente su comportamiento en condiciones de impacto, fatiga o cargas dinámicas.

En resumen, el análisis conjunto revela que el material impreso mediante fabricación aditiva presenta propiedades mecánicas competitivas en cuanto a resistencia, especialmente en resistencia máxima a tracción, y puede superar incluso al mismo acero fabricado convencionalmente en este parámetro. No obstante, presenta limitaciones en cuanto a rigidez y ductilidad, lo que sugiere que su empleo debe evaluarse cuidadosamente según las exigencias del componente o estructura final. Además, se confirma la influencia crítica de la orientación de fabricación, lo que implica que la estrategia de impresión debe considerarse como un parámetro de diseño más en el desarrollo de piezas funcionales mediante tecnologías aditivas.

B.- Acero para herramienta A2

El análisis del módulo de elasticidad revela una tendencia clara a favor de las probetas con orientación de canto, cuyas medias se sitúan por encima de las de orientación plana (+13.04%). Aunque una probeta plana (A23) mostró el valor más alto individual, el promedio de los ensayos confirma una mayor rigidez en las probetas de canto. Este resultado es coherente con lo observado previamente en aceros como el 17-4PH, lo que sugiere un comportamiento estructural reproducible en este tipo de materiales fabricados aditivamente. Además, los valores medios de las probetas de canto obtenidos se aproximan al valor teórico del acero A2 (160 GPa), cuyos valores son un 1.74% inferior al valor teórico esperado, lo cual indica que, en términos de rigidez, la fabricación aditiva es capaz de alcanzar niveles razonablemente cercanos a los esperados en procesos tradicionales.

La propiedad que mostró mayor desviación con respecto a los valores teóricos convencionales fue el límite de fluencia al 0,2 %. Aunque, nuevamente, las probetas de canto registraron mejores resultados que las planas, estos se mantuvieron considerablemente alejados del valor teórico del proceso convencional. Incluso si se toma como referencia el valor publicado por Markforged para fabricación aditiva (450 MPa), las probetas evaluadas muestran una pérdida sustancial de capacidad resistente a la deformación plástica, lo que se traduce en una menor fiabilidad del material para aplicaciones donde se requiera soporte prolongado de cargas elevadas sin deformaciones permanentes. Esta diferencia de mínimo un -61,73 % respecto al valor convencional evidencia una limitación estructural inherente al proceso aditivo, posiblemente relacionada con porosidades internas, falta de cohesión entre capas o microdefectos típicos de la deposición capa a capa.

Los valores máximos de resistencia a tracción, si bien más cercanos a los teóricos que en el caso del límite de fluencia, también se sitúan por debajo de los 700 MPa esperados, con una única excepción: la probeta A2C4, que logró superar mínimamente ese umbral en un +0.37%. Las diferencias entre orientaciones son reducidas, aunque las probetas de canto vuelven a mostrar una ligera superioridad. Este parámetro evidencia que, si bien el material presenta cierta capacidad de resistencia frente a

cargas crecientes, no alcanza el potencial esperado del acero A2 convencional, lo que limita su aplicación en entornos donde la resistencia mecánica extrema es prioritaria.

En cuanto al límite de rotura, los resultados confirman que la orientación de canto proporciona una resistencia ligeramente mayor antes de la fractura, con un incremento medio del 7,56 % respecto a las probetas planas. Este comportamiento destaca aún más si se compara con los resultados obtenidos en aceros como el 17-4PH, donde esta diferencia era menos significativa (+3.98% para las planas). Aunque estas cifras son moderadamente alentadoras, siguen estando lejos de los valores esperados para componentes estructurales críticos, lo cual refuerza la idea de que el acero A2 impreso requiere ajustes y mejoras en el proceso si se desea alcanzar niveles similares a los convencionales.

El parámetro que refleja la mayor debilidad del acero A2 impreso es, sin duda, el alargamiento a la rotura. Todos los valores obtenidos han sido bajos, lo que evidencia una ductilidad muy limitada. Aunque en general las probetas de canto mostraron mejores resultados, no se mantiene una regularidad absoluta, como lo demuestra el par A22/A2C2, donde la probeta plana obtuvo un alargamiento superior en un +22,65 %. Este comportamiento es indicativo de una fragilidad significativa del material en su forma impresa, probablemente originada por la acumulación de microdefectos internos o por la propia naturaleza frágil del acero A2 cuando no se somete a tratamientos térmicos postproceso.

En términos globales, los ensayos permiten concluir que el acero A2 fabricado mediante tecnología aditiva presenta un comportamiento mecánico inferior al del mismo material fabricado mediante procesos tradicionales, especialmente en lo relativo a su límite elástico y capacidad de deformación plástica. Si bien algunos valores, como el módulo de elasticidad y la resistencia máxima a tracción, se acercan a los datos esperados, la presencia de microdefectos, discontinuidades y anisotropías propias de la fabricación capa a capa generan limitaciones evidentes.

Por otro lado, la orientación de fabricación se confirma como un factor determinante en el rendimiento del material, por lo que la elección adecuada del sentido de impresión respecto a las tensiones esperadas en uso real es crucial para mejorar el desempeño mecánico. Las probetas fabricadas en orientación de canto han mostrado, en casi todos los parámetros evaluados para este material, un rendimiento superior, por lo que su uso debería priorizarse en diseños que requieran mayor resistencia estructural.

C.- Acero para herramienta H13

Los resultados experimentales del módulo de elasticidad no presentan diferencias significativas entre las distintas orientaciones de fabricación, lo que sugiere que esta propiedad no se ve especialmente afectada por la dirección en que se ha dispuesto el material. Solo una excepción destaca: la probeta H131 (orientación plana), que alcanza un valor de 203,77 GPa, considerablemente superior al resto y cercana al valor teórico convencional (207 GPa). A pesar de ello, la mayoría de los valores registrados se sitúan por debajo tanto del valor proporcionado por el fabricante (215 GPa) como del convencional, lo que pone de manifiesto una desviación sistemática que podría atribuirse a las características inherentes al proceso aditivo utilizado.

En cuanto al límite de fluencia al 0.2%, los resultados son más dispersos. Si bien la mayoría de las probetas presentan valores similares entre sí, sin apenas diferencias atribuibles a la orientación, destacan las probetas planas H131 y H132 cuyos valores se alejan considerablemente del resto y condicionan el promedio de su grupo. Esto introduce un sesgo que limita la fiabilidad de la comparación entre orientaciones. Por otro lado, al cotejar los valores con las referencias teóricas, se evidencia que solo una probeta (H132) supera el valor teórico convencional de 1000 MPa, mientras que el resto se mantiene por debajo tanto de este como del valor ofrecido por Markforged (800 MPa). Este comportamiento sugiere una notable variabilidad en esta propiedad mecánica dentro del mismo proceso de fabricación aditiva.

Los resultados obtenidos para la resistencia máxima a la tracción muestran una tendencia clara y consistente: las probetas con orientación plana presentan valores significativamente más altos que las orientadas de canto. El promedio de las probetas planas no solo supera al de las de canto, sino que incluso excede el valor teórico proporcionado por el fabricante (1420 MPa) en un 7,52%, lo cual constituye un resultado notable. Además, todas las probetas planas superan el valor teórico correspondiente a la fabricación convencional (1200 MPa), lo que confirma el impacto positivo de la orientación plana sobre esta propiedad. En cambio, las probetas de canto no alcanzan dicho umbral, lo que sugiere que esta orientación es menos favorable en términos de resistencia a la tracción.

El análisis del límite de rotura refuerza las conclusiones anteriores, ya que se observa nuevamente una ventaja significativa en las probetas planas frente a las de canto. La diferencia entre los valores promedio de ambas orientaciones alcanza los 400 MPa, lo que constituye un margen relevante en el contexto de aplicaciones estructurales. Esta diferencia sistemática permite afirmar que la orientación plana favorece claramente una mayor resistencia antes de la rotura final. La exclusión de la probeta H136 no afecta de forma significativa la tendencia general observada.

Por último, respecto al alargamiento a la rotura, se constata que las probetas planas muestran una mayor capacidad de deformación plástica en comparación con las de canto. No obstante, incluso los valores más altos obtenidos (como el de la probeta H132) se sitúan por debajo del valor teórico de referencia (5%), siendo la menor diferencia registrada del -5,26%. Este resultado pone de relieve una limitada ductilidad general del material fabricado mediante el proceso aditivo, posiblemente como consecuencia de su microestructura o de las condiciones de impresión y sinterizado.

En conjunto, los resultados para el H13 ponen, de nuevo, de manifiesto la influencia notable que tiene la orientación de fabricación sobre determinadas propiedades mecánicas, especialmente en la resistencia a la tracción y el límite de rotura. La orientación plana se revela sistemáticamente como más favorable, mientras que otras propiedades, como el módulo de elasticidad y el límite de fluencia, muestran menor sensibilidad a este factor o una mayor variabilidad. Además, en comparación con los valores teóricos tanto de fabricación aditiva como convencional, las probetas fabricadas mediante la tecnología Metal X tienden a presentar resultados inferiores en elasticidad y fluencia, pero logran comportamientos destacables en tracción cuando se emplea una orientación plana. Esto sugiere la necesidad de optimizar el diseño y la orientación de las piezas en función del uso previsto y las exigencias mecánicas específicas.

D.- Inconel 625

Los resultados experimentales indican que las probetas fabricadas en orientación de canto presentan valores ligeramente más elevados del módulo de elasticidad que aquellas fabricadas en orientación plana. No obstante, ninguna de las probetas alcanza el valor teórico de 205 GPa proporcionado por el fabricante, ni el valor teórico convencional (205,8 GPa), lo que sugiere una limitación inherente al proceso aditivo en cuanto a la rigidez del material. Esta diferencia pone de manifiesto la posible influencia de microdefectos o discontinuidades internas generadas durante el proceso de impresión, que podrían estar afectando negativamente la capacidad del material para deformarse elásticamente.

En este parámetro se observa una tendencia bastante homogénea entre las dos orientaciones de fabricación, con una ventaja leve para las probetas planas (aproximadamente un 2,88% superior). Ambos tipos de orientación superan el valor teórico de referencia del fabricante (334 MPa), lo cual indica un buen comportamiento frente a esfuerzos de deformación plástica inicial. Sin embargo, todos los valores se mantienen por debajo del límite de fluencia teórico para el proceso convencional (460 MPa), lo que evidencia una pérdida de capacidad estructural en comparación con métodos tradicionales, posiblemente atribuible a las diferencias en densificación, orientación de capas o falta de homogeneidad en la microestructura del material impreso.

En este caso se evidencia una superioridad clara de las probetas planas respecto a las de canto, aunque la diferencia no es excesiva. Las probetas planas presentan resultados próximos o incluso superiores al valor teórico del fabricante (765 MPa), y algunas de ellas se acercan al valor teórico convencional (880 MPa), lo que evidencia un rendimiento mecánico adecuado en términos de resistencia a tracción. En contraste, las probetas de canto se encuentran notablemente por debajo de ambos valores teóricos, lo que pone de manifiesto la influencia negativa de la orientación de fabricación en la cohesión entre capas y la resistencia global del componente.

De manera similar al comportamiento en tracción, el límite de rotura muestra una clara ventaja de las probetas planas respecto a las de canto. La diferencia promedio entre ambas orientaciones es de 80 MPa, lo cual es significativo, dado el rango de tensiones analizado. Esta disparidad refuerza la conclusión de que la orientación plana proporciona una mayor continuidad del material en la dirección de carga, lo que favorece la resistencia final antes de la fractura. La diferencia del 4.89% o más a favor de las probetas planas confirma su mejor desempeño estructural.

Respecto al alargamiento a la rotura, en el análisis de este parámetro se revela una diferencia especialmente marcada entre ambas orientaciones, siendo las probetas planas las que muestran un comportamiento muy superior en términos de ductilidad. Su valor promedio se sitúa apenas un -0.41% por debajo del valor teórico del fabricante, lo que indica un muy buen comportamiento plástico previo a la rotura. Aunque los valores se mantienen por debajo del alargamiento característico del proceso convencional (50%), el nivel de deformación alcanzado por las probetas planas sigue siendo notablemente elevado para un componente fabricado mediante impresión 3D metálica. En cambio, las probetas de canto muestran una ductilidad limitada, probablemente afectada por la orientación perpendicular de las capas respecto al eje de carga, lo que debilita la continuidad estructural del material durante la deformación.

Los resultados obtenidos permiten afirmar de nuevo que la orientación de fabricación influye de manera significativa en las propiedades mecánicas del Inconel 625 impreso. Si bien algunas propiedades como el módulo de elasticidad y el límite de fluencia muestran diferencias más moderadas, otras como la resistencia a la tracción, el límite de rotura y especialmente el alargamiento a la rotura reflejan una ventaja clara para las probetas fabricadas en orientación plana. Esto sugiere que, para aplicaciones que requieran un buen desempeño mecánico en términos de resistencia y ductilidad, la orientación de las capas durante el proceso de fabricación aditiva debe ser cuidadosamente considerada.

7.2.- Conclusiones del ensayo de dureza

7.2.1.- Probetas de acero inoxidable 17-4PH

Según los resultados visto en el apartado de análisis de resultados se puede obtener la media de la dureza HRC medida en las probetas de acero inoxidable 17-4PH:

Tabla 58.- Medias de la dureza HRC medida en las probetas de 17-4PH

Probetas planas (orientación 1)	CARA SUPERIOR	CARA INFERIOR
Mordaza izquierda	37.13	33.38
Mordaza derecha	30.75	30.38
Probetas de canto (orientación 2)	CARA SUPERIOR	CARA INFERIOR
Mordaza izquierda	27.38	28.13
Mordaza derecha	26.13	27.25

Analizando dicha tabla se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1. En este caso particular, se observa que los valores de dureza Rockwell C (HRC) obtenidos en la cara inferior de la probeta son superiores, de media, a los registrados en la cara superior. Esta diferencia podría atribuirse al hecho de que la cara inferior estuvo en contacto directo con la superficie de la cama de impresión durante todo el proceso de fabricación aditiva, lo que podría haber provocado que en dicha cara la superficie sea más homogénea que en la cara superior. No obstante, no se ha determinado con exactitud la causa de esta variación, por lo que se requiere un análisis más detallado para confirmar dicha hipótesis.
2. Por otro lado, los valores de dureza obtenidos en los ensayos son prácticamente inferiores en todos los casos, menos en los ensayos de dureza para la mordaza izquierda de las probetas planas en su cara superior, al indicado en la ficha técnica del material analizado [A1.1.1.- Acero inoxidable 17-4PH], donde se especifica una dureza nominal de aproximadamente 36 HRC. La desviación respecto a este valor de referencia podría deberse a la posible colocación del penetrador del durómetro sobre una de las micro separaciones entre capas que suelen generarse en los procesos FDM. Estas discontinuidades entre capas no suelen afectar

significativamente el resultado del ensayo cuando se evalúan superficies planas; sin embargo, en el caso de probetas impresas en orientación de canto, dichas separaciones pueden influir negativamente en la precisión de la medida de dureza. A continuación, se presentan imágenes ampliadas que ilustran visualmente estas separaciones entre capas en las probetas evaluadas.

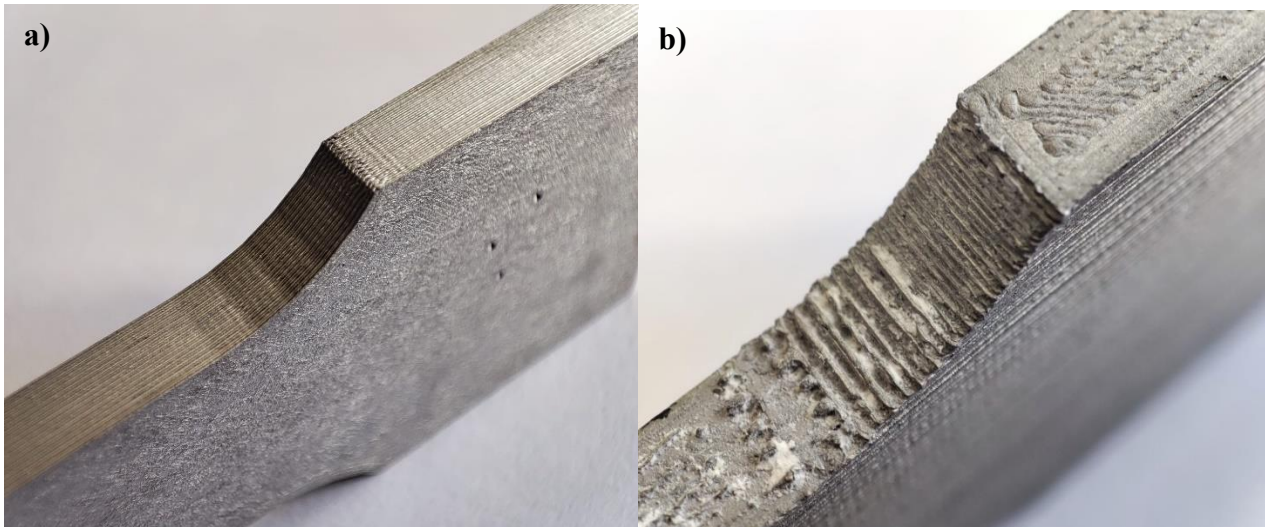


Figura 92.- Detalle de la superficie de impresión de: a) una probeta plana y b) una probeta de canto. [Fuente propia].

3. Tal como se aprecia en la Figura 92, las superficies correspondientes a las caras de impresión de las probetas dispuestas en orientación plana presentan un acabado superficial liso y homogéneo. En contraste, las probetas fabricadas en orientación de canto exhiben pequeñas discontinuidades o separaciones interlaminares propias del proceso de fabricación aditiva por deposición de material fundido (FDM). Estas irregularidades podrían afectar la precisión de las mediciones de dureza Rockwell C (HRC), dado que la penetración del indentador en zonas con menor cohesión entre capas puede generar valores ligeramente inferiores o no representativos de la dureza real del material en condiciones ideales. En el apartado de líneas futuras de este trabajo se hablará en mayor profundidad de este aspecto.

Aun así, considerando los aspectos previamente analizados, se puede concluir que las mediciones de dureza realizadas sobre las probetas fabricadas con acero inoxidable 17-4PH (SS) presentan una notable concordancia con los valores de dureza Rockwell C (HRC) esperados según las especificaciones técnicas del material. Aunque pueden observarse ligeras variaciones entre algunas de las mediciones individuales, especialmente en función de la orientación de impresión o de posibles irregularidades superficiales derivadas del proceso de fabricación aditiva, los valores obtenidos se mantienen dentro de un rango aceptable y cercano al valor de referencia proporcionado en la ficha técnica del fabricante. Esto permite validar que, en términos generales, el comportamiento mecánico del material en cuanto a su resistencia a la penetración es coherente con lo esperado para dicho acero inoxidable 17-4PH.

7.2.2.- Probetas de acero para herramienta A2

Las medias de dureza HRC medidas en las probetas de acero para herramienta A2 son las siguientes:

Tabla 59.- Medias de la dureza HRC medida en las probetas de A2

Probetas planas (orientación 1)	CARA SUPERIOR	CARA INFERIOR
Mordaza izquierda	31.70	30.70
Mordaza derecha	30.10	29.00
Probetas de canto (orientación 2)	CARA SUPERIOR	CARA INFERIOR
Mordaza izquierda	31.90	32.10
Mordaza derecha	35.10	35.90

Analizando dicha tabla se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1. En este caso particular, se observa en la Tabla 59 anterior que la diferencia entre los resultados de dureza obtenidos en la cara superior y la cara inferior de las probetas no es tan significativa. Para las probetas planas, los valores de dureza en ambas caras son prácticamente idénticos, lo que sugiere una distribución uniforme de las propiedades de dureza a lo largo de la pieza. Sin embargo, en las probetas con orientación de canto, se detecta que la dureza medida en la cara inferior es mayor que en la cara superior. Esto indica que, a pesar de la posible influencia de los microespacios entre capas mencionada en el apartado anterior, esta no ha tenido un efecto tan relevante en los resultados obtenidos para este tipo de probetas. Este comportamiento podría estar relacionado con factores específicos de la orientación de las capas en AM y su interacción con el proceso de endurecimiento del material durante la fabricación.
2. Al analizar los valores promedio de dureza obtenidos, se observa que los resultados fluctúan entre 29 HRC y 35.9 HRC. De acuerdo con las especificaciones del material, el acero A2 debería presentar una dureza en torno a los 50 HRC. Por lo tanto, los valores obtenidos en todos los casos se encuentran por debajo de lo esperado, lo que sugiere que la dureza medida es inferior a la especificada para este tipo de acero.

En conclusión, los resultados de dureza HRC obtenidos para las probetas de acero A2 se encuentran por debajo de los valores esperados según la ficha técnica del material. La causa exacta de esta discrepancia no se ha determinado en este estudio, y podría estar relacionada con diversos factores, como las propiedades inherentes del material, el método de fabricación empleado, o posibles variaciones en el proceso AM. Sin embargo, este análisis exhaustivo no forma parte del alcance del presente trabajo, por lo que no se profundiza en su investigación.

7.2.3.- Probetas de acero para herramienta H13

Observando los resultados obtenidos en el análisis de resultados se puede obtener la media de dureza HRC medidas en ambas caras de la probeta para cada orientación:

Tabla 60.- Medias de la dureza HRC medida en las probetas de H13

Probetas planas (orientación 1)	CARA SUPERIOR	CARA INFERIOR
Mordaza izquierda	40.90	38.10
Mordaza derecha	41.50	37.90
Probetas de canto (orientación 2)	CARA SUPERIOR	CARA INFERIOR
Mordaza izquierda	32.50	31.10
Mordaza derecha	32	33.90

Analizando dicha tabla se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1. En este caso, se observa en la Tabla 60 una diferencia considerable en los valores medios de dureza HRC obtenidos entre las probetas planas y las probetas de canto. Para las probetas planas, los valores de dureza son ligeramente más altos en todos los casos, lo que indica que, en este material, la fabricación con la orientación 1 es más adecuada para aplicaciones donde se requiere que el material presente una mayor dureza. Este comportamiento sugiere que la orientación de fabricación tiene un impacto directo en las propiedades mecánicas del material, específicamente en la dureza. Por otro lado, se observa que no hay una diferencia tan clara en la dureza entre las caras superior e inferior de las probetas, lo que indica que, al igual que en el caso del acero A2, la cara del material tiene una influencia mínima en el valor de dureza esperado. Esto refuerza la conclusión de que, en este caso particular, la orientación de la probeta tiene un papel más determinante que la cara específica de la probeta en el resultado final de dureza.
2. Al analizar los valores medios de dureza HRC calculados para cada material y orientación y compararlos con el valor teórico de dureza HRC para el acero H13, que se encuentra en torno a los 40 HRC, se puede observar lo siguiente: para las probetas planas, los valores obtenidos son bastante cercanos al valor teórico de dureza, lo que sugiere que la fabricación con esta orientación es adecuada para alcanzar las propiedades de dureza esperadas. Sin embargo, para las probetas de canto, los valores obtenidos son generalmente más bajos en comparación con los valores teóricos, lo que indica que la orientación de la probeta tiene un impacto significativo en la dureza, especialmente cuando se utiliza una orientación distinta a la óptima.

En resumen, los resultados obtenidos muestran que el material presenta mejores propiedades de dureza HRC en las probetas planas que en las probetas fabricadas con orientación 2 (de canto). Por lo tanto, sería recomendable utilizar la orientación 1 para la fabricación de este material en aplicaciones donde se requiera una dureza específica. Además, aunque los microespacios entre capas derivados del proceso AM podrían tener algún impacto en la dureza, se observa que su influencia no es tan pronunciada. Sin embargo, en las probetas de canto, se nota una ligera disminución de la dureza,

lo que podría estar relacionado con la orientación de las capas. Este fenómeno no se profundizará en este trabajo, pero podría ser un tema relevante para futuros estudios que aborden en detalle el impacto de la orientación de impresión en las propiedades mecánicas de los materiales fabricados mediante AM.

7.2.4.- Probetas de Inconel 625

Observando el análisis resultado en apartados anteriores se puede obtener la media de dureza HRC medidas en ambas caras de la probeta para cada orientación:

Tabla 61.- Medias de la dureza HRC medida en las probetas de Inconel 625

Probetas planas (orientación 1)	CARA SUPERIOR	CARA INFERIOR
Mordaza izquierda	5.70	5.40
Mordaza derecha	4.50	7.00
Probetas de canto (orientación 2)	CARA SUPERIOR	CARA INFERIOR
Mordaza izquierda	5.25	4.92
Mordaza derecha	4.83	4.50

Analizando dicha tabla se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1. En el caso del último material analizado, los resultados obtenidos de dureza HRC para ambos tipos de probetas (planas y de canto) muestran valores bastante similares en todos los casos. Sin embargo, existen algunas variaciones en los resultados de dureza en situaciones específicas, como en los valores de dureza de la cara inferior de las probetas planas, donde se observa una diferencia notable en ambas mordazas, o en la probeta INC3, en la cara superior. A pesar de estas diferencias aisladas, en general, los valores obtenidos para las probetas planas y las probetas de canto son prácticamente idénticos. Además, no se observa una diferencia significativa entre los valores de dureza medidos en la cara superior y en la cara inferior de las probetas, lo que indica que, en términos generales, el proceso de fabricación no influye de manera considerable en la variabilidad de la dureza a lo largo de las distintas caras de las piezas.
2. En cuanto al valor teórico de dureza del material Inconel 625 sinterizado, este se encuentra especificado en aproximadamente 7 HRC. Sin embargo, los resultados obtenidos de los ensayos de dureza muestran valores promedio cercanos a 5 HRC en todos los casos, lo que indica que las probetas fabricadas con este material presentan una dureza ligeramente inferior a la esperada, aunque los valores obtenidos se mantienen relativamente próximos al valor teórico. A pesar de la ligera diferencia con respecto al valor nominal, los resultados de dureza son consistentes dentro de los rangos esperados para este material.

En conclusión, los valores de dureza HRC obtenidos para las probetas fabricadas de Inconel 625 no presentan una desviación considerable respecto a lo esperado, lo que sugiere que el proceso de fabricación empleado es adecuado para aplicaciones que requieran este material específico. No

obstante, aunque los resultados son satisfactorios, la pequeña discrepancia entre los valores teóricos y los experimentales no será profundizada en este estudio, ya que no se considera crucial para los objetivos del presente trabajo. Sin embargo, este aspecto podría ser objeto de análisis más detallados en investigaciones futuras que profundicen en las causas de la diferencia y su impacto en las aplicaciones prácticas del material.

7.3.- Conclusiones Metalografía

7.3.1.- Conclusiones particulares por material

A.- Acero inoxidable 17-4PH – SS1

El estudio metalográfico de la probeta SS1 de acero inoxidable 17-4PH revela una estructura interna heterogénea con la presencia de porosidad distribuida de forma irregular, más concentrada en los extremos de la muestra. Esta porosidad, en su mayoría de tipo esférico, es indicativa de defectos gaseosos o de una sinterización incompleta, lo que sugiere una deficiencia en el control del proceso de fabricación.

Se observan también inclusiones o vacíos alargados que podrían actuar como iniciadores de grietas bajo esfuerzo mecánico, comprometiendo la tenacidad y la resistencia a la fatiga del material. En algunas zonas, la superficie interna de los poros muestra microfisuras o colapsos parciales, aumentando el riesgo de fallo estructural. Además, se identifican características de una microestructura no completamente densificada, posiblemente con zonas de enfriamiento desigual, lo que puede inducir tensiones residuales internas y afectar el rendimiento mecánico general del componente.

En conjunto, la presencia de estos defectos reduce la confiabilidad del acero inoxidable 17-4PH para aplicaciones críticas, especialmente aquellas donde se requieren altas exigencias mecánicas y resistencia a la fractura.

B.- Acero para herramienta A2 – A22

El análisis microestructural de la probeta de acero para herramienta A22 (A2) revela una alta porosidad heterogénea, concentrada especialmente en la zona central, lo que indica un proceso de fabricación deficiente, posiblemente relacionado con una sinterización incompleta o presencia de gases atrapados. Muchos poros presentan forma esférica, característica de defectos gaseosos, y algunos contienen grietas internas, lo que eleva el riesgo de iniciación de fallas bajo carga. También se observan carburos o inclusiones duras dispersas, que, aunque aportan resistencia al desgaste, pueden inducir fragilidad localizada si no están bien distribuidos. Además, la presencia de estructuras dendríticas o con falta de fusión sugiere una solidificación irregular o falta de unión entre partículas, debilitando aún más la integridad del material.

Por tanto, estos defectos reducen notablemente la tenacidad, la resistencia a la fatiga y la fiabilidad del acero, comprometiendo su idoneidad para aplicaciones exigentes si no se corrigen los procesos de fabricación o se aplican tratamientos postprocesado adecuados.

C.- Acero para herramienta H13 – H135

El estudio metalográfico de la probeta H135 de acero H13 evidencia una porosidad significativa y heterogéneamente distribuida, con una alta concentración en la zona central de la muestra. La presencia de microgrietas internas y poros de gran tamaño aumenta el riesgo de nucleación de fisuras, especialmente bajo condiciones de carga cíclica o impacto, comprometiendo así la integridad mecánica del material.

Además, se identifican inclusiones no metálicas y partículas finamente dispersas en la matriz, posiblemente carburos formados por elementos de aleación como Cr o V. Si bien estas fases pueden contribuir al endurecimiento, su localización en zonas porosas o junto a defectos críticos puede favorecer la iniciación de grietas. En conjunto, los resultados sugieren la necesidad de mejorar el control del proceso de sinterización o fusión para reducir la porosidad y lograr una microestructura más homogénea y resistente.

D.- Inconel 625 – INC2

El análisis metalográfico del Inconel 625 revela una estructura interna con porosidad distribuida aleatoriamente, compuesta por cavidades irregulares que son típicas de procesos de sinterizado no completamente optimizados. Esta porosidad, aunque habitual en tecnologías de fabricación aditiva o pulvimetalurgia, puede comprometer las propiedades mecánicas del material, actuando como concentradores de tensiones y reduciendo la resistencia a la fatiga y a la tracción. A pesar de ello, las muestras muestran una buena uniformidad estructural, sin segregaciones visibles ni estructuras dendríticas, lo que indica un control adecuado del proceso y una microestructura favorable para aplicaciones exigentes.

En resumen, el INC 625 analizado presenta una estructura relativamente homogénea y prometedora, aunque la porosidad interna detectada deberá ser minimizada o controlada en futuras fases para garantizar un comportamiento mecánico óptimo en condiciones reales de servicio.

7.4.- Conclusiones generales

A partir del análisis realizado sobre los ensayos de dureza Rockwell C y tracción de las probetas fabricadas mediante AM y el análisis metalográfico realizado, se pueden establecer las siguientes conclusiones técnicas:

Influencia del proceso FFF/FDM en las propiedades mecánicas: El proceso FFF/FDM introduce una anisotropía significativa en los materiales, especialmente evidente en las diferencias entre probetas planas y de canto. La orientación de las capas afecta directamente la cohesión entre ellas, lo cual limita la capacidad de deformación plástica (ductilidad) y favorece el comportamiento frágil en determinadas direcciones. Esto se refleja en los resultados de tracción, donde las probetas de canto de H13 tienden a fracturarse antes que las planas.

Correlación dureza–ductilidad: Se ha podido establecer una correlación clara entre los valores de dureza HRC y los resultados del alargamiento a la rotura:

- Alta dureza y bajo alargamiento: comportamiento frágil (caso de A2 y H13 en orientación de canto).
- Moderada dureza y alargamiento aceptable: comportamiento funcional con cierta tenacidad (caso de 17-4PH y H13, ambas con orientación plana).
- Baja dureza y alto alargamiento: comportamiento dúctil (caso de Inconel 625 con orientación plana).

Este patrón es coherente con los mecanismos típicos de deformación en materiales metálicos: la resistencia superficial (relacionada con la dureza) no siempre implica buena capacidad de absorción de energía antes de la fractura (ductilidad).

Evaluación comparativa de materiales:

1. **Acero inoxidable 17-4PH:** Aunque presenta una dureza inferior a la teórica, su comportamiento mecánico global puede considerarse aceptable para aplicaciones funcionales. La pérdida de ductilidad respecto a métodos convencionales sugiere un comportamiento con tendencia frágil, pero no completamente quebradizo.
2. **Acero para herramientas A2:** Presenta los peores resultados mecánicos globales, con valores de dureza y alargamiento significativamente por debajo de los esperados. El comportamiento observado es claramente frágil, y su uso funcional en estado FFF/FDM debe evaluarse cuidadosamente o descartarse para aplicaciones críticas.
3. **Acero para herramientas H13:** Muestra una dureza cercana a la teórica, pero un comportamiento anisotrópico muy marcado. Las probetas planas presentan cierta ductilidad funcional, mientras que las de canto son muy frágiles. Esto indica que el diseño de piezas debe tener en cuenta la orientación para garantizar rendimiento mecánico adecuado.
4. **Inconel 625:** Aunque su dureza es baja (como se espera en este material), destaca por una ductilidad superior, especialmente en probetas planas. Esto sugiere que su comportamiento mecánico es más estable y confiable en situaciones donde se requiera resistencia al impacto o tenacidad, siempre que la orientación de fabricación sea favorable.

Implicaciones para el diseño y la fabricación: Los resultados obtenidos evidencian que:

- La orientación de impresión debe ser un parámetro de diseño fundamental, ya que condiciona de manera crítica las propiedades finales de la pieza.
- En materiales como H13 e Inconel 625, se puede aprovechar su comportamiento dúctil en configuraciones planas, mientras que se deben evitar esfuerzos perpendiculares a las capas.
- El uso de FFF/FDM para aceros herramientas (A2, H13) debe ir acompañado de un estudio detallado de cargas y orientaciones, debido al riesgo de rotura frágil.

El estudio evidencia que la combinación de dureza y ensayo de tracción es esencial para determinar la funcionalidad de piezas impresas por FFF/FDM. Aunque algunos materiales como el 17-4PH y el Inconel 625 muestran propiedades aceptables para ciertos usos funcionales, otros como el A2 presentan limitaciones graves de ductilidad que comprometen su aplicación estructural. La anisotropía inherente al proceso debe ser cuidadosamente gestionada en el diseño y análisis de piezas impresas.

8.- LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

8.1.- Ensayo de tracción

A partir de las conclusiones generales obtenidas tras la evaluación comparativa de los parámetros mecánicos fundamentales (módulo de elasticidad, límite de fluencia, resistencia máxima a tracción, límite de rotura y alargamiento a la rotura) en materiales como el Inconel 625, el acero H13, el acero inoxidable 17-4PH y el acero para herramientas A2, se proponen diversas líneas futuras de trabajo orientadas a profundizar en el estudio del comportamiento estructural y funcional de estos materiales bajo diferentes condiciones de servicio y fabricación.

1. Estudio del comportamiento en condiciones extremas

Una línea de investigación prioritaria es la evaluación del rendimiento mecánico de estos materiales en condiciones extremas, como altas temperaturas, ciclos térmicos intensos, ambientes corrosivos o cargas dinámicas repetitivas. Dado que materiales como el Inconel 625 y el acero H13 se utilizan frecuentemente en sectores exigentes (aeroespacial, moldes, energía), sería de gran interés analizar cómo varían sus propiedades bajo sollicitaciones térmicas prolongadas o en presencia de agentes agresivos (sales, ácidos, gases oxidantes).

2. Relación entre microestructura y propiedades mecánicas

Otra línea relevante consiste en profundizar en la correlación entre la microestructura interna y el comportamiento mecánico observado. A través de técnicas de caracterización avanzada (SEM o Microscopía Electrónica de Barrido, EDS o Espectroscopia de Rayos X con Dispersión de Energía, etc.), se podría estudiar cómo influyen factores como el tamaño de grano, la presencia de precipitados, la orientación de las fases o los defectos internos sobre los resultados mecánicos, particularmente en aquellos casos donde se observan diferencias según la orientación de las probetas.

3. Optimización de los procesos de fabricación

Dado que las propiedades mecánicas están directamente influenciadas por los parámetros de fabricación, se propone investigar cómo ajustes en los procesos de sinterizado o fabricación aditiva afectan a la resistencia, ductilidad y rigidez de las piezas. Se trataría de identificar las condiciones óptimas para maximizar las prestaciones mecánicas de cada material y, en especial, para reducir las diferencias entre las orientaciones de las probetas.

4. Ensayos de fatiga y tenacidad

Si bien este estudio se ha centrado en los parámetros mecánicos estáticos, resulta esencial abordar ensayos dinámicos como la resistencia a la fatiga, la tenacidad a la fractura o el comportamiento bajo impacto, especialmente en materiales como el Inconel 625 y el H13, que podrían estar sometidos a ciclos de carga complejos en su aplicación final. Esto permitiría una evaluación más realista del rendimiento en condiciones de servicio.

5. Simulación numérica y modelado predictivo

Una línea de trabajo transversal a las anteriores es el desarrollo de modelos computacionales (por ejemplo, mediante elementos finitos) que permitan predecir el comportamiento mecánico de los

materiales en función de sus condiciones de fabricación y geometría. Esta simulación, combinada con datos experimentales, facilitaría la validación de hipótesis y la optimización de diseños estructurales.

6.- Influencia de la rugosidad

Como línea futura, se propone analizar en profundidad la influencia de la rugosidad en los radios de acuerdo de las probetas de canto (Figura 92), ya que en este trabajo se ha observado que dichas zonas presentaban una rugosidad elevada que ha favorecido la aparición de fracturas prematuras. Aunque se pulieron algunas muestras (INCC1, INCC2, H13C5), los resultados obtenidos no mostraron diferencias significativas respecto a las no pulidas, posiblemente debido al bajo número de probetas tratadas. Por tanto, se recomienda realizar ensayos sistemáticos con radios de acuerdo pulidos y comparar estadísticamente los resultados para determinar con mayor fiabilidad el impacto real del acabado superficial en el comportamiento mecánico de las probetas impresas por FFF.

8.2.- Ensayo de dureza

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de dureza sobre probetas fabricadas de acero inoxidable 17-4PH, acero para herramienta A2, acero para herramienta H13 e Inconel 625, se identifican diversas líneas futuras de investigación con el objetivo de profundizar en la comprensión del comportamiento mecánico de estos materiales y en cómo los parámetros del proceso de fabricación influyen en sus propiedades finales. Aunque los valores de dureza obtenidos son, en general, coherentes con lo esperado para cada aleación, se han observado ligeras variaciones en zonas concretas, como diferencias entre caras de las probetas o desviaciones respecto a los valores teóricos. Estas pequeñas discrepancias, si bien no son significativas para los fines inmediatos del estudio, pueden tener implicaciones importantes en aplicaciones críticas, por lo que su análisis detallado podría aportar información relevante para la optimización de procesos y la mejora del rendimiento funcional de las piezas. En este sentido, una línea de trabajo futura sería el estudio sistemático del efecto de los parámetros del proceso de sinterizado o fabricación aditiva, tales como la temperatura de tratamiento, la velocidad de enfriamiento, la presión aplicada o la atmósfera utilizada, sobre la microestructura y, por ende, sobre las propiedades mecánicas de las piezas resultantes.

8.3.- Ensayo metalográfico

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos metalográficos realizados, se abren diversas líneas futuras de estudio que podrían contribuir a una mejor comprensión y optimización de los procesos de fabricación y tratamiento térmico de los aceros analizados:

- Caracterización cuantitativa de la porosidad mediante técnicas de análisis de imagen asistido por software, que permita correlacionar el porcentaje de vacíos con propiedades mecánicas específicas como la resistencia a la fatiga o la tenacidad.
- Estudio comparativo de diferentes parámetros de sinterización o fusión (tiempo, temperatura, presión, atmósfera) para reducir la porosidad central y mejorar la homogeneidad del material.
- Evaluación del comportamiento en servicio (fatiga, corrosión, impacto) de las zonas afectadas por defectos críticos, para modelar el efecto de estas discontinuidades sobre la vida útil del componente.

- Simulación numérica del flujo térmico y de la distribución de tensiones residuales durante la fabricación, con el objetivo de predecir y minimizar zonas propensas a defectos estructurales.

Estas líneas permitirían establecer una relación más precisa entre microestructura y propiedades, facilitando así el diseño de tratamientos o mejoras de proceso adaptados a los requisitos funcionales de cada aplicación industrial.

9.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNE-EN ISO 6892-1:2020, "Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente," Asociación Española de Normalización (UNE), 2020.
- [2] UNE-EN ISO 377:2017, "Acero y productos de acero. Localización y preparación de muestras y probetas para ensayos mecánicos," Asociación Española de Normalización (UNE), 2017.
- [3] MINT. "Tipos de fabricación aditiva que debes conocer." [En línea]. Disponible en: https://mintforpeople.com/noticias/tipos-fabricacion-aditiva/#Sinterizado_selectivo_por_laser_SLS. [Accedido: 02-abr-2025].
- [4] CompositesWorld "Las 7 familias de la manufactura aditiva," CompositesWorld, [En línea]. Disponible en: https://www.compositesworld.com/cdc/cmc/las_7_familias_de_la_manufactura_aditiva.pdf. [Accedido: 4-jun-2025].
- [5] Interempresas, "La fabricación aditiva, una tecnología (hoy) exclusiva, pero de potencial infinito," *Interempresas*, [En línea]. Disponible en: [https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/227677-La-fabricacion-aditiva-una-tecnologia-\(hoy\)-exclusiva-pero-de-potencial-infinito.html](https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/227677-La-fabricacion-aditiva-una-tecnologia-(hoy)-exclusiva-pero-de-potencial-infinito.html). [Accedido: 4-jun-2025].
- [6] Markforged. "Metal X - Impresora 3D de metal." [En línea]. Disponible en: <https://markforged.com/es/3d-printers/metal-x>. [Accedido: 02-abr-2025].
- [7] Metalinspec, "¿Qué es el ensayo de tracción?", Blog Metalinspec, 29-abr-2022. [En línea]. Disponible: <https://www.blog.metalinspec.com.mx/post/que-es-el-ensayo-de-traccion>. [Accedido: 01-abr-2025].
- [8] "Ensayo de Tracción - ¿Qué es?, partes y procedimiento," Área Tecnología. [En línea]. Disponible en: <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>. [Accedido: 26-May-2025].
- [9] ZwickRoell, "Ensayo de dureza: Definición y método de ensayo de dureza," [En línea]. Disponible en: <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-dureza/>. [Accedido: 5 de abril de 2025].
- [10] Infinitia Research, "Ensayos de dureza Rockwell: ¿En qué consiste?," [en línea]. Disponible en: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/ensayos-de-dureza-rockwell-en-que-consiste/>. [Accedido: 5 de abril de 2025].
- [11] Metalografia.es, "¿Qué es la Metalografía?," 5 de junio de 2019. [En línea]. Disponible en: <https://metalografia.es/?p=6>. [Accedido: 6 de abril de 2025].
- [12] M. Á. Caminero, A. Romero, J. M. Chacón, P. J. Núñez, E. García-Plaza, y G. P. Rodríguez, "Additive manufacturing of 316L stainless-steel structures using fused filament fabrication technology: mechanical and geometric properties," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 583–591, 2021, doi: 10.1108/RPJ-06-2020-0120.

- [13] S. Kedziora, T. Decker, E. Museyibov, J. Morbach, S. Hohmann, A. Huwer y M. Wahl, "Strength Properties of 316L and 17-4 PH Stainless Steel Produced with Additive Manufacturing," *Materials*, vol. 15, n. ° 18, art. 6278, 2022.
- [14] T. T. Opoz, A. Burgess, J. I. Ahuir-Torres, H. R. Kotadia y S. Tammam-Williams, "The effect of surface finish and post-processing on mechanical properties of 17-4 PH stainless steel produced by the atomic diffusion additive manufacturing process (ADAM)," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 130, n. ° 7–8, pp. 4053–4066, 2024.
- [15] F. Martín-Fernández, M.J. Martín-Sánchez, G. Guerrero-Vacas, O. Rodríguez-Alabanda. Metallic cutting inserts fabrication by means of additive manufacturing with fused filament fabrication technology. *Results in Engineering*. Vol 24 (2024) 103194 doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103194
- [16] O. Rodríguez-Alabanda, G. Guerrero-Vacas, M.J. Martín-Sánchez, F. Martín-Fernández. Fabrication of cutting inserts with chromium-molybdenum Steel for turning operations using material extrusion technology. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol 30 (2024) 6404-6417 doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.065
- [17] G. Guerrero, O. Rodríguez, F. Martín, M. J. Martín. Performance and Durability of Non-Stick Coatings Applied to Stainless Steel: Subtractive vs. Additive Manufacturing. *Materials*, Vol. 16 (2023) 5851. doi.org/10.3390/ma16175851
- [18] F. Martín, M.J. Martín, Analysis of the Effect of the Surface Inclination Angle on the Roughness of Polymeric Parts Obtained with Fused Filament Fabrication Technology, *Polymers*, Vol 15 (3) 585 (2023) doi.org/10.3390/polym15030585
- [19] M.J. Martín, J.A. Auñón and F. Martín, Influence of infill pattern on mechanical behavior of polymeric and composites specimens manufactured using fused filament fabrication technology, *Polymers*, Vol 13 (2021) 2934 doi:10.3390/polym13172934
- [20] M. Mahmoudi, A. Elwany, A. Yadollahi, S. M. Thompson, L. Bian y N. Shamsaei, "Mechanical properties and microstructural characterization of selective laser melted 17-4 PH stainless steel," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 23, n. ° 2, pp. 280–294, 2017, doi: 10.1108/RPJ-12-2015-0192.
- [21] ASM International. (1992). *Metals Handbook: Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special-purpose Metals* (Vol. 3). ASM International.
- [22] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology* (7th ed.). Pearson Education.
- [23] ASM International. (2011). *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*. ASM International.
- [24] ASM International. (1999). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (Vol. 2). ASM International.

- [25] Kruth, J. P., et al. (Eds.). (2015). *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Springer.
- [26] DIN 50125:2022-08, "Ensayo de materiales metálicos. Probetas de tracción," Deutsches Institut für Normung (DIN), agosto 2022.
- [27] UNE-EN ISO/ASTM 52900:2022, "Fabricación aditiva. Principios generales. Fundamentos y vocabulario," Asociación Española de Normalización (UNE), 2022.
- [28] UNE-EN ISO 17296-2:2017, "Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 2: Visión general de categorías de procesos y de materias primas," Asociación Española de Normalización (UNE), 2017.
- [29] UNE-EN ISO 527-1:2019, "Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales," Asociación Española de Normalización (UNE), 2019.
- [30] UNE 116005:2012, "Fabricación por adición de capas en materiales plásticos. Fabricación aditiva. Preparación de probetas," Asociación Española de Normalización (UNE), 2012.
- [31] Servosis. "MUE-403 – Máquina universal de ensayos." [En línea]. Disponible en: <https://www.servosis.com/producto/mue-403/>. [Accedido: 02-abr-2025].
- [32] Epsilon Technology. "Axial Extensometer – Model 3542." [En línea]. Disponible en: <https://www.epsilontech.com/products/axial-extensometer-model-3542/>. [Accedido: 02-abr-2025].
- [33] Servosis. "El software PCD2K de Servosis." [En línea]. Disponible en: <https://www.servosis.com/el-software-pcd2k-de-servosis/>. [Accedido: 02-abr-2025].
- [34] "Acero inoxidable grado 630 (17-4PH)," SteelPro Group. [Online]. Available: <https://steelprogroup.com/es/stainless-steel/grades/grade-630/>. [Accesado: 26-May-2025].
- [35] "Acero para herramientas grado A2," SteelPro Group. [En línea]. Disponible en: <https://steelprogroup.com/es/tool-steel/grades/a2/>. [Accedido: 26-may-2025].
- [36] "Propiedades técnicas del acero H13," SteelPro Group. [En línea]. Disponible en: <https://steelprogroup.com/es/tool-steel/grades/h13/properties/technical-data/>. [Accedido: 26-may-2025].
- [37] "Inconel 625," Alloys International, Inc., *Alloys International*, 2025. [En línea]. Disponible en: https://alloysintl.com/es/inventory/nickel-and-cobalt-alloys/inconel_625/ [Accedido: 26-may-2025].
- [38] Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación (SCAI). Universidad de Málaga.
- [39] Protolabs, "Pruebas de tracción de materiales para impresión 3D," 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.protolabs.com/es-es/recursos/blog/pruebas-de-traccion-de-materiales-para-impresion-3d/>. [Accedido: 01-abr-2025].

- [40] T. Solanet Mayou, "Diseño de un modelo tridimensional para la verificación de máquinas y procesos de fabricación aditiva," Trabajo de Fin de Máster, Dir. M. Jiménez Calzado, Co-dir. D. Fraiz Cosano, Universidad [Nombre de la Universidad si aplica], Madrid, España, jul. 2022.
- [41] G. Salvador Moraga Torres, *Mejora del comportamiento mecánico mediante recocido de piezas poliméricas obtenidas por fabricación aditiva*, Trabajo Fin de Grado, Grado en Ingeniería Mecánica, Universidad de Málaga (UMA), 2021
- [42] Formlabs, "Materiales de impresión 3D," [en línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/materiales-impresion-3d/>. [Accedido: 01-abr-2025].
- [43] ZwickRoell. "Ensayo de tracción de materiales: Aplicación." [En línea]. Disponible en: <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-traccion/>. [Accedido: 02-abr-2025].
- [44] "FDM-FFF o modelado por deposición fundida," Todo-3d.com, 25-ene-2017. [En línea]. Disponible en: <https://todo-3d.com/fdm-fff-modelado-deposicion-fundida/>. [Accedido: 01-abr-2025].
- [45] ZwickRoell. "Ensayo de tracción." [En línea]. Disponible en: <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-traccion/>. [Accedido: 02-abr-2025].
- [46] Área Tecnología. "Ensayo de tracción." [En línea]. Disponible en: <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>. [Accedido: 02-abr-2025].
- [47] ZwickRoell, "Límite de fluencia en ensayos de tracción," [En línea]. Disponible en: <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-traccion/limite-de-fluencia/>. [Accedido: 02-abr-2025].

ESTA PÁGINA HA SIDO DEJADA EN
BLANCO DE FORMA INTENCIONADA

Trabajo de fin de Máster

Anexos

Realizado por:

David Martín Gómez

Titulación: Máster en Ingeniería Mecánica Avanzada.

Tutorizado por:

M^a Jesús Martín Sánchez

Francisco de Sales Martín Fernández



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ANEXO 1.- Fichas técnicas

A1.1.- Materiales

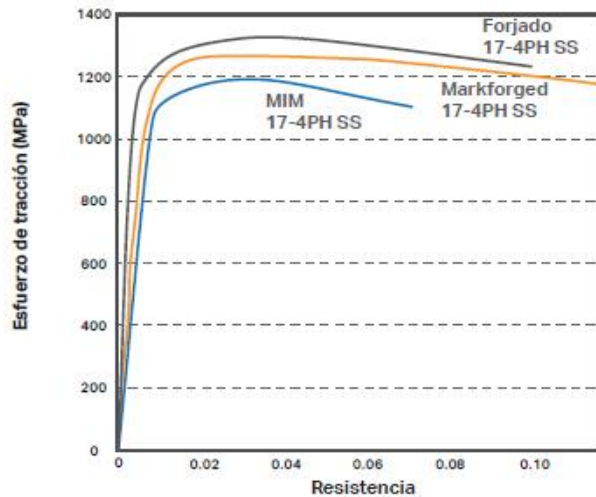
A1.1.1.- Acero inoxidable 17-4PH

HOJA INFORMATIVA DE MATERIAL



Acero inoxidable 17-4PH v2

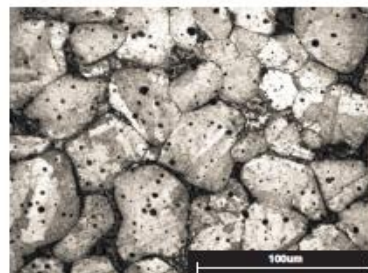
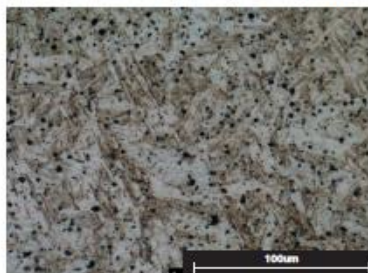
Composición	Porcentaje
Cromo	15-17,5 %
Níquel	3-5 %
Cobre	3-5 %
Silicio	Máx. 1 %
Manganeso	Máx. 1 %
Niobio	0,15-0,45 %
Carbono	Máx. 0,07 %
Fósforo	Máx. 0,04 %
Azufre	Máx. 0,03 %
Hierro	bal



● Markforged tratado térmicamente según H900
 Acero Inoxidable 17-4PH v2 Impreso con el sistema Metal X tratado térmicamente según la especificación H900.

● MIM tratado térmicamente según H900
 Acero Inoxidable 17-4PH estándar MIM tratado térmicamente según la especificación H900.

● ASTM A564 tratado térmicamente según H900
 Acero Inoxidable 17-4PH ASTM A564 tratado térmicamente según la especificación H900.



Propiedades mecánicas típicas

	Estándar	H900 de Markfor- ged	MIM H900	ASTM A564 H900
Resistencia a la tracción óptima	ASTM E8	1230 MPa	1190 MPa	1310 MPa
Límite de fluencia de 0,2 %	ASTM E8	1050 MPa	1090 MPa	1170 MPa
Alargamiento de rotura	ASTM E8	13 %	6 %	10 %
Módulo de elasticidad a la tracción	ASTM E8	170 GPa	190 GPa	190 GPa
Dureza	ASTM E18	38 HRC	33 HRC	40 HRC
Corrosión	ASTM F1089	Aprobado	Aprobado	Aprobado
Densidad relativa	ASTM B923	96,4 %	95,5 %	100 %

La composición y las prestaciones del material se ven afectadas por diferentes factores, como puede ser la geometría de la pieza. Todos los datos y gráficos del anverso se corresponden con los valores del acero inoxidable 17-4 PH tratado térmicamente según H900. Markforged representa los valores típicos probados de piezas con relleno sólido, mientras que MIM H900 y Forjado H900 representan los valores de referencia típicos del estándar 35 de MPiF. Las pruebas de densidad y dureza se han realizado en Markforged. El resto de las pruebas se han llevado a cabo en un laboratorio externo. Todas las imágenes de microestructuras se han grabado y fotografiado en Markforged.

DATOS ADICIONALES



Acero inoxidable 17-4PH v2

En los valores siguientes se comparan las muestras de Markforged procesadas de tres formas distintas: sinterizadas, tratadas térmicamente según el estándar H900 y tratadas térmicamente según el estándar H1150.

Propiedades mecánicas

típicas	Estándar	Sinterizado	H900	H1150
Resistencia a la tracción óptima	ASTM E8	1180 MPa	1230 MPa	950 MPa
Límite de fluencia de 0,2 %	ASTM E8	710 MPa	1050 MPa	880 MPa
Alargamiento de rotura	ASTM E8	7 %	13 %	15 %
Módulo de elasticidad a la tracción	ASTM E8	152 GPa	170 GPa	160 GPa
Dureza	ASTM E18	36 HRC	38 HRC	31 HRC
Corrosión	ASTM F1089	Aprobado	Aprobado	Aprobado
Densidad relativa	ASTM B923	96,4 %	96,4 %	96,4 %

Estos datos representativos se han probado, medido o calculado utilizando métodos estándar y pueden cambiar sin previo aviso. Markforged no ofrece garantías de ningún tipo, ni expresas ni implícitas, como por ejemplo las garantías de comerciabilidad, idoneidad para un uso particular o garantía contra la violación de patentes. Tampoco asume ninguna responsabilidad en relación con el uso de esta información. Los datos aquí indicados no deben utilizarse para establecer límites de diseño, control de calidad o especificaciones, y no pretenden sustituir las pruebas que realice para determinar la idoneidad en aplicaciones específicas. El contenido de esta hoja informativa no debe interpretarse como una licencia de uso ni una recomendación para infringir derechos de propiedad intelectual.

Figura 93.- Ficha técnica del acero inoxidable 17-4PH empleado para la fabricación de las probetas [6]

A1.1.2.- Acero para herramienta A2

HOJA INFORMATIVA DE MATERIAL

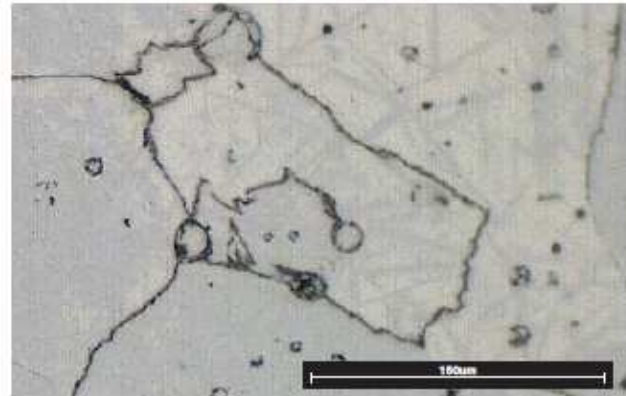


Acero para herramientas A2

Otras denominaciones: UNS T30102, DIN 1.2363, X100CrMoV5, SKD12, BA2

El acero para herramientas A2 es un acero de temple al aire muy versátil que con frecuencia se considera un acero de trabajo en frío «universal». Combina una buena resistencia al desgaste (entre O1 y D2) con una alta dureza. Se considera relativamente fácil de mecanizar en estado recocido, tiene una alta resistencia a la compresión y una buena estabilidad dimensional durante el endurecimiento y el templado. Se utiliza para una amplia variedad de herramientas de trabajo en frío, desde herramientas de corte y conformado hasta piezas sujetas a un desgaste elevado.

Composición	Porcentaje
Cromo	4,75-5,5 %
Molibdeno	0,9-1,4 %
Carbono	0,95-1,05 %
Manganeso	0,4-1 %
Fósforo	Máx. 0,3 %
Vanadio	0,15-0,5 %
Silicio	0,1-0,5 %
Hierro	bal



Propiedades mecánicas típicas	Estándar	Markforged tratado térmicamente ¹	Forjado tratado térmicamente
Límite de resistencia a la compresión de 0,2 %	ASTM E9	1170 MPa	—
Módulo elástico	ASTM E9	160 GPa	190 GPa
Dureza	ASTM E18	50 HRC	63 HRC
Densidad relativa ⁴	ASTM B923	94,5 %	100 %

Tratamiento térmico

El acero para herramientas A2 se puede tratar térmicamente para aumentar la dureza y la durabilidad. Markforged recomienda tratar térmicamente el acero para herramientas A2 a fin de optimizar las propiedades del material, aunque también se puede utilizar solo sinterizado.

1. Calentar la pieza de acero para herramientas A2 en un horno estándar (no al vacío) a 970 °C (1780 °F). Mantener la pieza a esa temperatura durante 30-45 minutos.
2. Templar al aire a menos de 65 °C (150 °F).
3. Realizar un temple doble de la pieza de acero para herramientas A2 en un horno estándar. Para cada temple, calentar la pieza a 150-550 °C² (302-1022 °F) y templarla durante 2 horas, o 1 hora por cada pulgada de espesor. Si se realiza un temple doble, dejar enfriar la pieza a temperatura ambiente antes de volver a templarla.

1. El aluminio para herramientas A2 tratado térmicamente de Markforged se calentó a 970 °C (1780 °F) y se templó una vez a 200 °C (392°F) durante 30 minutos.
 2. La temperatura de templado tiene un efecto importante sobre las propiedades del material final. Para obtener una mayor dureza, templar a temperaturas bajas. Para obtener una mayor tenacidad, templar a temperaturas altas.
 3. La dureza del material sinterizado puede variar significativamente en función de la carga del horno y el entorno ambiental. Markforged recomienda un tratamiento térmico posterior a la sinterización para lograr la máxima dureza y resistencia a la compresión.
 4. La densidad relativa del acero para herramientas A2 se basa en un valor de 7,86 g/cm³.

Estos datos representan los valores típicos del acero para herramientas A2 de Markforged sinterizado. Las muestras de Markforged se han impreso con un relleno sólido. La densidad relativa y la dureza del material sinterizado se han medido en pruebas internas. El resto de los datos se han probado y confirmado en laboratorios externos. Estos datos representativos se han probado, medido o calculado utilizando métodos estándar y pueden cambiar sin previo aviso. Markforged no ofrece garantías de ningún tipo, ni expresas ni implícitas.

Figura 94.- Ficha técnica del acero A2 empleado para la fabricación de las probetas [6]

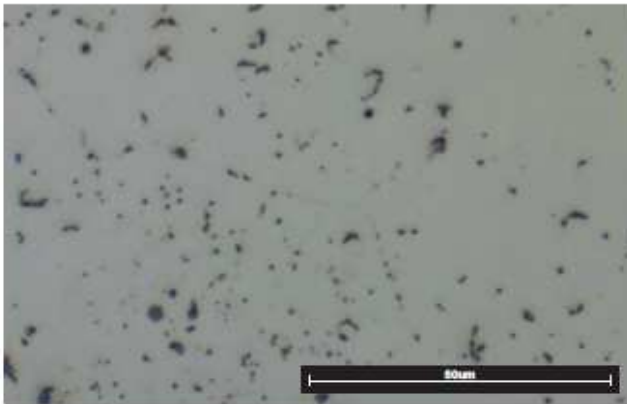
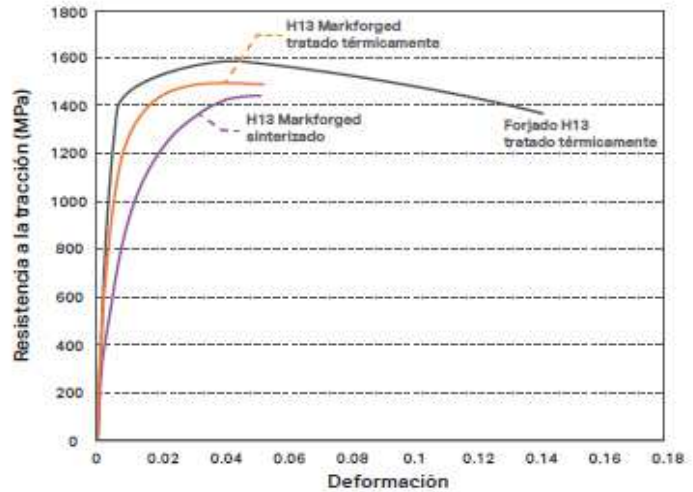
A1.1.3.- Acero para herramienta H13

HOJA INFORMATIVA DE MATERIAL



Acero para herramientas H13

Composición	Porcentaje
Cromo	4,7-5,5%
Molibdeno	1,3-1,7%
Silicio	0,8-1,2%
Vanadio	0,8-1,2%
Carbono	0,3-0,45%
Manganeso	0,2-0,5%
Fósforo	Máx. 0,03%
Azufre	Máx. 0,03%
Hierro	bal



- **H13 de Markforged sinterizado**
 Acero para herramientas H13 Impreso en la Impresora Metal X, lavado en el sistema Wash-1 y sinterizado en el horno Sinter-1. A la izquierda se muestra la imagen de una microestructura sinterizada.
- **H13 de Markforged tratado térmicamente**
 Acero para herramientas H13 Impreso con el sistema Metal X, templado al aire a 1010°C, y con temple doble a 600°C.
- **Forjado H13 tratado térmicamente**
 Estándar de acero forjado para herramientas H13 del manual ASM *Specialty Handbook* - templado al aire a 1010°C y con temple doble a 600°C.

Propiedades mecánicas típicas	Estándar	Markforged sinterizado	Markforged tratado térmicamente	Forjado tratado térmicamente*
Resistencia a la tracción óptima	ASTM E8	1420 MPa	1500 MPa	1580 MPa
Límite de fluencia de 0,2 %	ASTM E8	800 MPa	1250 MPa	1360 MPa
Alargamiento de rotura	ASTM E8	5 %	5 %	14 %
Dureza	ASTM E18	40 HRC	45 HRC	46 HRC
Densidad relativa	ASTM B923	94,5 %	94,5 %	100 %

Estos datos representan los valores típicos del acero para herramientas H13 de Markforged sinterizado y después del tratamiento térmico. Los valores se han probado internamente, y tanto la composición del material como los datos de sinterización se han verificado en un laboratorio independiente. Estos datos representativos se han probado, medido o calculado utilizando métodos estándar y pueden cambiar sin previo aviso. Markforged no ofrece garantías de ningún tipo, ni expresas ni implícitas.

* Datos de forjado tratado térmicamente solo incluidos en la tabla. Datos del manual ASM *Specialty Handbook: Tool Materials*, página 140.

Figura 95.- Ficha técnica del acero H13 empleado para la fabricación de las probetas [6]

A1.1.4.- Inconel 625

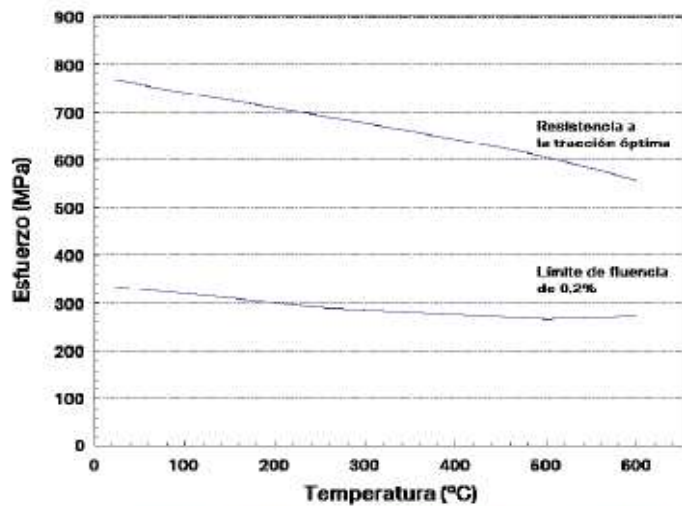
HOJA INFORMATIVA DE MATERIAL
Inconel 625



Otras denominaciones: UNS N06625, ISO NW6625, DIN 17744

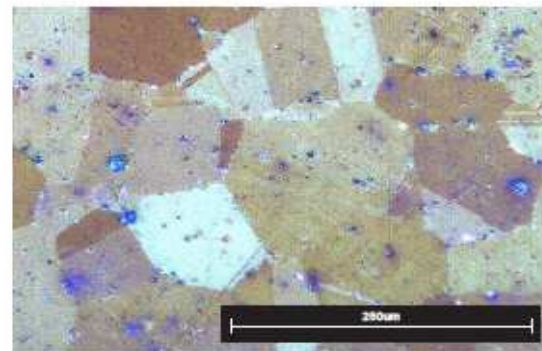
El Inconel 625 es una superaleación a base de níquel-cromo altamente resistente a la corrosión y a temperaturas elevadas. Es fácil de imprimir, lo que permite fabricar prototipos funcionales y piezas de uso final diseñadas para entornos hostiles. El Inconel 625 de Markforged cumple con los requisitos químicos de la norma ASTM B443.

Composición	Porcentaje
Cromo	20-23 %
Molibdeno	8-10 %
Hierro	Máx. 5%
Niobio	3,15-4,15 %
Cobalto	Máx. 1 %
Manganeso	Máx. 0,5 %
Silicio	Máx. 0,5 %
Aluminio	Máx. 0,4 %
Titanio	Máx. 0,4 %
Carbono	Máx. 0,1 %
Fósforo	Máx. 0,015 %
Azufre	Máx. 0,015 %
Níquel	bal



Inconel 625 de Markforged sinterizado

Inconel 625 Impreso en la Impresora Metal X, lavado en el sistema Wash-1 y sinterizado en el horno Sinter-1. A la derecha se muestra una imagen ampliada (100x) de una microestructura sinterizada.



Propiedades mecánicas típicas	Estándar	Markforged sinterizado	AMS 5599 forjado ¹
Resistencia a la tracción óptima	ASTM E8	765 MPa	827 MPa
Límite de fluencia de 0,2 %	ASTM E8	334 MPa	414 MPa
Alargamiento de rotura	ASTM E8	42 %	30 %
Dureza	ASTM E18	7 HRC	0-19 HRC
Densidad relativa ²	ASTM B923	96,5 %	100 %

1. Los datos de AMS 5599 forjado representan los valores mínimos, salvo en el caso de la dureza.
 2. La densidad relativa del Inconel 625 se basa en un valor de referencia de 8,44 g/cm³.
 3. La prueba de temperatura elevada de la norma ASTM E21 se ha realizado en un laboratorio NADCAP externo. Las muestras se han Impreso en XY y la distancia entre señales se ha mecanizado a medida.

Estos datos representan los valores típicos del Inconel 625 de Markforged sinterizado. Las muestras de Markforged se han Impreso como piezas totalmente densas con un relleno del 100 %. Los datos de dureza y densidad se han probado internamente, mientras que el resto de los datos se han probado y confirmado en laboratorios externos. Estos datos representativos se han probado, medido o calculado utilizando métodos estándar y pueden cambiar sin previo aviso. Markforged no ofrece garantías de ningún tipo, ni expresas ni implícitas.

Figura 96.- Ficha técnica del Inconel 625 empleado para la fabricación de las probetas [6]

A1.2.- Especificaciones del equipo para impresión 3D utilizado

Las propiedades de todo el equipo se han obtenido de la hoja de características de la propia impresora que se puede encontrar en el manual de usuario de Metal X de Markforged [6].

A1.2.1.- Impresora Metal X



ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO

Metal X (2.^a generación)

La Metal X es una impresora 3D revolucionaria que imprime polvo de metal aglomerado dentro de una matriz de plástico, lo que elimina los riesgos de seguridad que presentan los métodos tradicionales de impresión 3D de metal y proporciona nuevas características, como el relleno de celdas cerradas para reducir el peso y el coste de la pieza. Este sistema cuesta diez veces menos que otras tecnologías de fabricación aditiva de metal, y hasta 100 veces menos que las tecnologías de fabricación tradicionales como el mecanizado o la fundición. El sistema de impresión Metal X es económico, fiable y fácil de usar, y permite fabricar piezas de metal totalmente funcionales con una rapidez nunca vista.

Propiedades de la impresora	Proceso	Fabricación con filamento fundido de metal
	Volumen de construcción	300 x 220 x 180 mm
	Tamaño de la máquina	575 x 467 x 1120 mm, 75 kg Pantalla táctil: Extensión horizontal de 12 cm
	Cámara de impresión	Calentada
	Lecho de impresión	Calentado, hoja de impresión cerrada al vacío, nivelación automática del lecho
	Sistema de impresión	Dos boquillas: material metálico y material desprendible
	Alimentación	100-120 / 200-240 V CA (12 A / 6 A), IEC 60320 tipo C20
	Módulo de RF	Banda de frecuencias 2,4 GHz, estándar Wi-Fi 802.11 b/g/n
Materiales	Material metálico	Acero inoxidable (17-4 PH), acero para herramientas (H13, A2, D2), Inconel 625, cobre
	Material desprendible	Cerámico (de promedio se necesita una bobina de material cerámico por cada diez bobinas de material metálico)
	Material (bobinas)	Filamento de polvo aglomerado
Propiedades de las piezas	Tamaño máx. de la pieza	250 x 183 x 150 mm, 10 kg
	Soportes	Material metálico con una capa cerámica desprendible
	Altura de capa	50 µm y 125 µm (postsinterización)
Software	Software incluido	Eiger Cloud (más opciones disponibles a un coste adicional)
	Seguridad	Autenticación de dos factores, acceso del administrador de la organización, inicio de sesión único



Nota: Todas las especificaciones son aproximadas y pueden cambiar sin previo aviso.

Figura 97.- Ficha técnica de la impresora Metal X [6]

A1.2.2.- Estación de lavado Wash-1

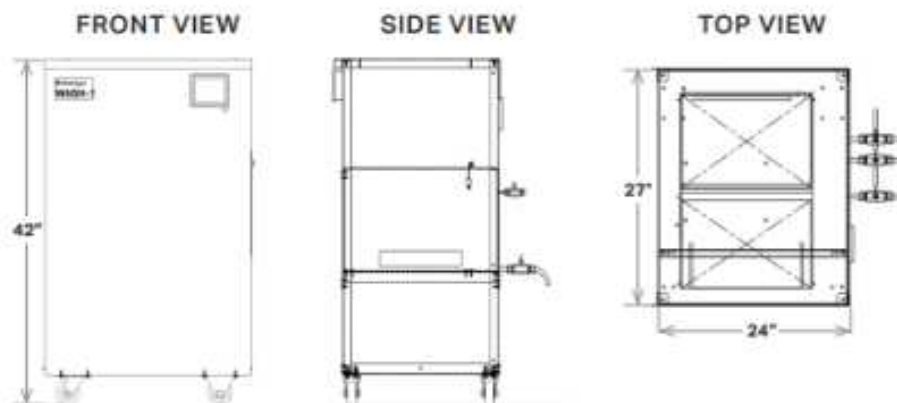


PRODUCT SPECIFICATIONS

Wash-1

The first step in transforming a printed "green" part into fully dense metal is debinding. The Wash-1 immerses the green part in a specialized fluid which dissolves the primary binding material, leaving the part semi-porous so the remaining binder can easily burn off during sintering. This debinding step purifies the final metal part and helps keep your sintering furnace clean.

Debinder Properties	Materials Supported	All metals
	Fluid (Solvent)	Opteon SF79, Opteon SF80, or Tergo Metal Cleaning Fluid
	Controller	Integrated control system
	Workholding	Stainless steel basket
	Washing Size	356 x 254 x 203 mm (14 x 10 x 8 in)
	Washing Volume	18,356 cm ³ (1,120 in ³)
Safety & Installation	Environmental Req.	External exhaust
	Safety Control	Low fluid shutoff control High vapor pressure shutoff control
	Regulatory	Refer to MSDS
	Emissions	Low emission design to conserve solvent
	Power	110-120 VAC single phase, 11A / 1,320W peak draw
	Physical Dimensions	External Dimensions
Weight		136 kg (300 lbs)



Note: All specifications are approximate and subject to change without notice.

Figura 98.- Ficha técnica de la estación de lavado Wash-1 [6]

A1.2.3.- Horno de sinterizado Sinter-1



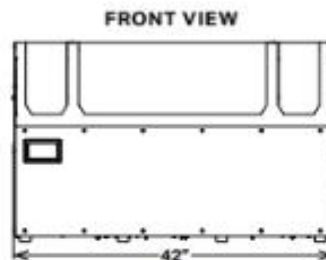
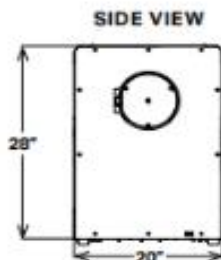
F-SR-0001

FURNACE SPECIFICATIONS

Sinter-1

The Markforged Sinter-1 is a high performing, high value furnace - it's affordable, sizable, and reliable. Featuring 4760 cubic cm of working volume, The Sinter-1 effortlessly converts washed parts into their dense final metallic form. Built on 30 years of Metal Injection Molding (MIM) technology, it is ideal for sintering medium sized parts and small batch production.

Furnace Properties	Materials Supported	All Commercial Grade Metals including: Stainless Steel, Tool Steel, Inconel, Aluminum, & Titanium
	Heating Element	Kanthal
	Controller	Pre-Programmed Automatic Cycling
	Peak Temperature	1300° C
	Sintering Capacity	Cylindrical - 141 mm ID x 305 mm L (5.55" ID x 12" L)
	Sintering Volume	4760 cubic cm (290 cubic in)
	Gas Types	Nitrogen, Argon, and Forming Gases
	Retort	High Purity Refractory Retort (Carbon Free)
	Sintering Surface	Ceramic
Safety & Installation	Environmental Req.	External Exhaust (100 CFM)
	Power	208-250 V Single Phase 36A, Recommend Wiring 50A
	Over Temperature	Protection System Included
Physical Dimensions	External Dimensions	1067 x 505 x 720 mm (42 x 20 x 28 in)
	Weight	136 kg (300 lbs)



All specifications approximate and subject to change without notice.

markforged.com

85 School St, Watertown, MA 02472

Figura 99.- Ficha técnica del horno de sinterizado Sinter-1 [6]

A1.3.- Fichas técnicas del equipo de ensayo

A1.3.1.- Servosis MUE 403



MUE 403 descripción

Las máquinas de ensayo MUE-403 permiten realizar ensayos estáticos y dinámicos con distintas capacidades, de 5 a 150 Tm, hasta 10 Hz.

Diseñada principalmente para ensayos aceros y materiales rígidos, tanto en barras redondas como planas y corrugados, permite también realizar ensayos de cualquier otro tipo de material.

Alta rigidez, escaso mantenimiento, fácil instalación, gran variedad de ensayos, rapidez en la colocación de diferentes muestras son algunas de sus características.

Todo el sistema es servocontrolado hidráulicamente, incluidos los accionamientos de las mordazas, movimientos y bloqueo del puente superior.

Incorpora un grupo hidráulico diseñado específicamente para su accionamiento.



MUE 403/120



MUE 403/60

MUE-403

Sus componentes básicos son:

- Cabezal superior móvil con sistema de bloqueo hidráulico de accionamiento automático.
 - Cilindro hidráulico incorporado en la bancada:
 - Serie CH4: Cilindro bajo rozamiento. Frecuencia de trabajo hasta 10 Hz
 - Todos los cilindros incorporan servoválvula e control y captador de desplazamiento incorporado en el propio vástago del cilindro.
 - El control se realiza a través de ordenador, con software para la realización de ensayos PCD2K, que se incorpora en el mismo rack que el grupo hidráulico o en mesa de control aparte.
 - Cuadro con pulsadores para accionamientos hidráulicos de mordazas y desplazamiento del puente superior.
- En función del tipo de muestra a ensayar se pueden instalar distintos tipos de mordazas y multitud de accesorios, así como elementos de extensometría para la medida de las deformaciones.



Figura 100.- Descripción máquina de ensayos Servosis MUE 403 [31].



MUE-403 Especificaciones

	MUE 403/5t	MUE 403/40t	MUE 403/60t	MUE 403/100t
Columnas	2	2	2	2
Capacidad de carga en estático/dinámico (kN)	50/40	400/300	600/500	1000/750
Resolución	FUERZA: $\pm 1\%$ entre 1 y 100% Nominal. (opcional $\pm 0,5\%$) DESPLAZAMIENTO: $\pm 1\%$ entre 1 y 100% Nominal (opcional $\pm 0,5\%$)			
Recorrido del actuador(mm)	± 50 ; ± 75 ; ± 100 ; ± 125 ; ± 150			
Frecuencia de trabajo(Hz)	Actuador modelo CH4, entre 0,01 y 5 Hz			
* Desplazamiento de travesaño superior	Automático con sistema de bloqueo hidráulico			
Señal analógica de medida(V)	± 10 VDC para fuerza, desplazamiento y canales de medida auxiliares			
Comunicación con PC	Interface AD/DA 16 bits			
Máx. velocidad de desplazamiento (mm/sec)	200 mm/min típico. Configurable para mayor velocidad bajo pedido...			
Diámetro de columnas (mm)	60	90	110	120
* Máx. luz vertical libre sin mordazas(mm)	Entre 1500 y 2500. Otros valores pueden ser ofertados bajo pedido.			
* Luz libre lateral entre columnas (mm)	2 versiones: A= 600mm; B= 800mm			
Dimensiones aprox(mm)	Ancho: Versión A=1200; Versión B= 1400 Profundidad: 800mm Altura: entre 2700 y 3700 (dependiendo de la distancia axial)			
Peso aproximado del marco de ensayo (Kg)	650	1900	2350	2900
Energía eléctrica (kW)	Dependiendo del grupo de potencia hidráulica seleccionado.			
Requisitos eléctricos	220/380 VAC / 50/60Hz $\pm 10\%$			

MUE 403

* Opciones a definir en el pedido.



Figura 101.- Ficha técnica de la máquina Servosis modelo 403 con diferentes configuraciones [31]

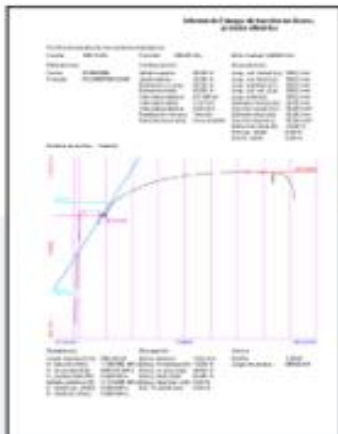
A1.3.2.- Software de control PCD 2K Servosis MUE 403



MUE 403 software de control



Pantalla de ensayos



Informe de resultados.
Personalizable con su logotipo



La máquina es controlada a través del software PCD2K, en el que el usuario dispone de distintas posibilidades para su utilización:

Las opciones de **utilización general**, con las cuales se dispone de las máximas posibilidades de actuación en la realización de ensayos. El cliente puede configurar su ensayo de manera personalizada y realizar el tratamiento de los datos posteriormente.

Las ventanas de **ensayos bajo Norma personalizados**, con las cuales se dispone de la máxima simplificación en la realización de un ensayo específico, al aglutinar en una sola ventana solo los elementos necesarios para la realización de ese ensayo concreto, y obtener directamente los resultados de todos los cálculos que indique la norma. Estas ventanas son siempre diseñadas a medida de las necesidades del ensayo y del cliente bajo pedido del mismo.

En la misma máquina pueden cargarse tantas Normas de ensayo como se desee sin mas limitación que la capacidad máxima de carga que imponga la máquina y la velocidad máxima, determinada por el grupo hidráulico.

En el informe del ensayo aparecerá la Norma bajo la cual se ha realizado el ensayo, la parametrización del mismo, los datos de la máquina y los resultados del ensayo, además de la curva gráfica Fuerza/Deformación.




www.servosis.com

MUE 403

Figura 102.- Información relacionada con el software empleado PCD 2K de Servosis [33]

A1.3.3.- Extensómetro Axial modelo 3452-050M-050-ST



Features

- **May be left on through specimen failure.**
- Full bridge, 350 ohm strain gaged design for compatibility with nearly any test system.
- Applicable for testing to:
 - ISO 6892-1, 527-2, 527-4, 527-5, 10113
 - ASTM E8, E9, D3039, D638, A370, D3552, E517, E646
- All models can measure in both tension and compression and can be used for cyclic testing.
- Standard quick attach kit allows one hand mounting to specimens.
- Rugged, dual flexure design for strength and improved performance. Much stronger than single flexure designs, this also allows cyclic testing at higher frequencies.
- All models have mechanical overtravel stops in both directions. Cable stops are used for overtravel protection where required. Epsilon's cable stops are fully contained between the arms of the extensometer and do not hang below where they can interfere with fixturing – especially during compression testing.
- Hardened tool steel knife edges are easily replaced. A spare set of standard knife edges and a set of 3-point knife edges come with every model 3542.
- Gauge length adapter kits enable configuration of multiple gauge lengths with one extensometer.
- Replaceable arms and spacers for ease of repair.
- High and low temperature options extend operation from as low as -270 °C to +200 °C (-454 °F to +400 °F).
- Includes the Epsilon Shunt Calibration System for on-site electrical calibration.
- Includes high quality foam lined case.

SPECIFICATIONS

Excitation: 5 to 10 VDC recommended, 12 VDC or VAC max.
Output: 2 to 4 mV/V, nominal, depending on model
Accuracy: Standard configurations meet ASTM E83 class B-1 accuracy requirements for gauge lengths >20 mm and class B-2 for <20 mm. All standard configurations meet ISO 9513 class 0.5. A test certificate is included.
Linearity: ±0.15% of full scale measuring range
Temperature Range: Standard (-ST) is -40 °C to +100 °C (-40 °F to 210 °F)
 Optional (-LHT) is -270 °C to +200 °C (-454 °F to 400 °F)
Cable: Integral, ultra-flexible cable, 2.5 m (8 ft) standard
Standard Quick Attach Kit: Wireforms are included for round samples 2-25 mm (0.06-1.0 inch) diameter and flats up to 12 mm thick by 31 mm wide (0.5 inch by 1.25 inch); wireforms are available for many other specimen sizes - contact Epsilon
 Rubber bands and springs for attachment are also included
 Model 3442 is recommended for specimen diameters <2 mm
Operating Force: Depends on model configuration; 10 to 100 g typical

OPTIONS

Quick attach kit wire forms or cable attachment for large specimens
 Adapter kits to change gauge lengths
 Connectors to interface to nearly any brand of test equipment
 Special coatings and stainless steel knife edges available for biomedical tests
 Specialty knife edges (see page 104)

ORDERING INFORMATION

Model 3542 Available Versions: ANY combination of gauge length, measuring range and temperature range listed below is available, except as noted. Other configurations may be available with special order; please contact Epsilon to discuss your requirements.

Gauge Length	
METRIC	
-010M ¹	10.0 mm
-012M ¹	12.0 mm
-0125M ¹	12.5 mm
-020M	20.0 mm
-025M	25.0 mm
-030M	30.0 mm
-035M	35.0 mm
-040M	40.0 mm
-045M	45.0 mm
-050M	50.0 mm
-075M ²	75.0 mm
-080M ²	80.0 mm
U.S.A.	
-0050 ³	0.500"
-0064 ³	0.640"
-0100	1.000"
-0140	1.400"
-0200	2.000"

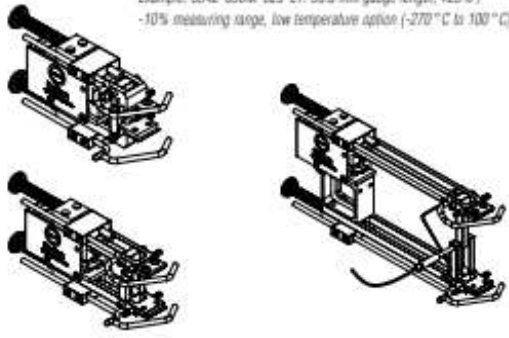
Measuring Range	
DESIGNATION	% STRAIN
-005 ³	±5%
-010	±10%
-020	+20%/-10%
-025	+25%/-10%
-050	+50%/-10%
-100	+100%/-10%

Model Number 3542- _____ - _____ - _____


Temperature Range	
-LT	-270 °C to 100 °C (-454 °F to 210 °F)
-ST	-40 °C to 100 °C (-40 °F to 210 °F)
-HT1	-40 °C to 150 °C (-40 °F to 300 °F)
-HT2	-40 °C to 200 °C (-40 °F to 400 °F)
-LHT	-270 °C to 200 °C (-454 °F to 400 °F)


1. Epsilon recommends model 3442 for applications with gauge lengths <20 mm (0.8 inches).
 2. Compression range is -8 mm.
 3. Not available in 10 mm, 12.5 mm, or 0.50 inch gauge lengths.
 * Compression ranges can be adjusted to higher values if required. Please contact Epsilon for your specific testing requirements.

Example: 3542-050M-025-LT: 50.0 mm gauge length, +25% / -10% measuring range, low temperature option (-270 °C to 100 °C)



MODEL 3542 EXAMPLES

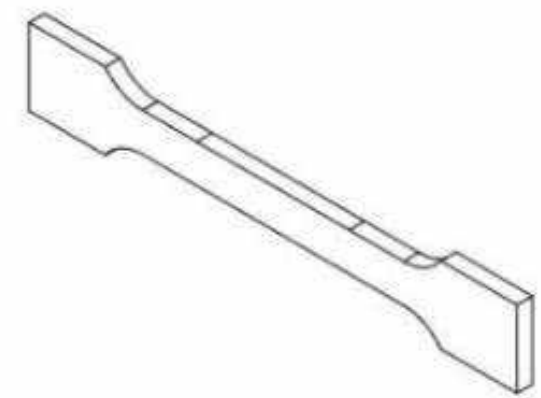




EPSILON TECH-Innovative designs and factory direct sales.

Figura 103.- Ficha técnica del extensómetro Epsilon 3542 [32]

ANEXO 2.- Planos



AUTOR : DAVID MARTÍN GÓMEZ

TFM: ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO
A TRACCIÓN DE PIEZAS METÁLICAS
OBTENIDAS MEDIANTE FABRICACIÓN
ADITIVA

04/04/2025

PROBETA ENSAYOS - MODELO 3

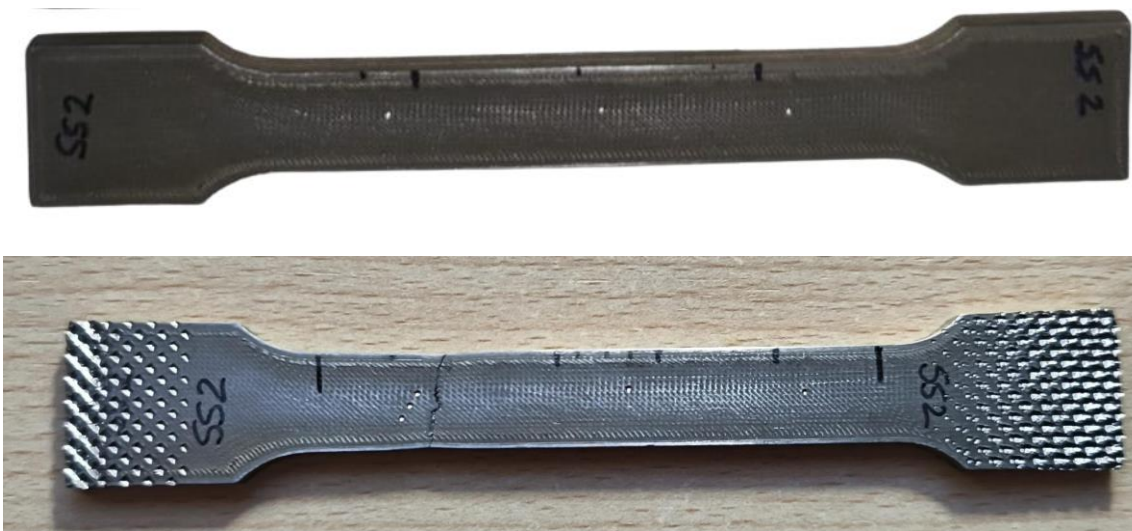
A3

ANEXO 3.- Ficha resumen probetas ensayadas

A continuación, se van a adjuntar una serie de fichas resumen con todos los resultados más importantes recopilados de los ensayos. A partir de ellas, se va a realizar el análisis de resultados y la comparación de las propiedades mecánicas obtenidas por este proceso de fabricación con diferentes procesos.

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO INOXIDABLE 17 – 4PH
Codificación	SS2

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.83
Espesor probeta	e [mm]	4.17
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.35



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	138.08
Límite de fluencia	R_p [MPa]	822.90
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1117.20
Límite de rotura	R_u [MPa]	1062.39
Longitud final probeta	L_{if} [mm]	134.96
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	43.12
Alargamiento a la rotura	A [%]	4.28

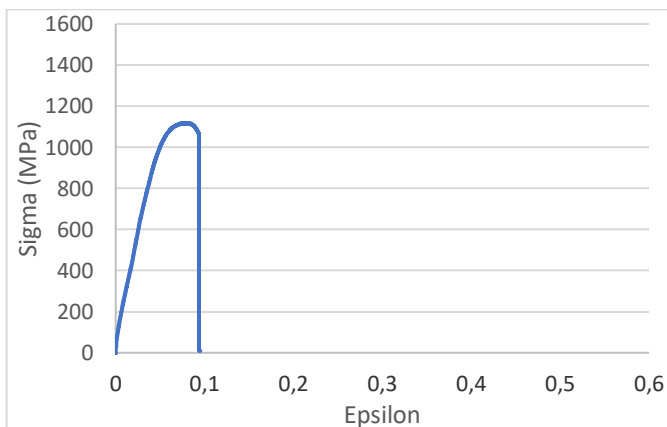


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

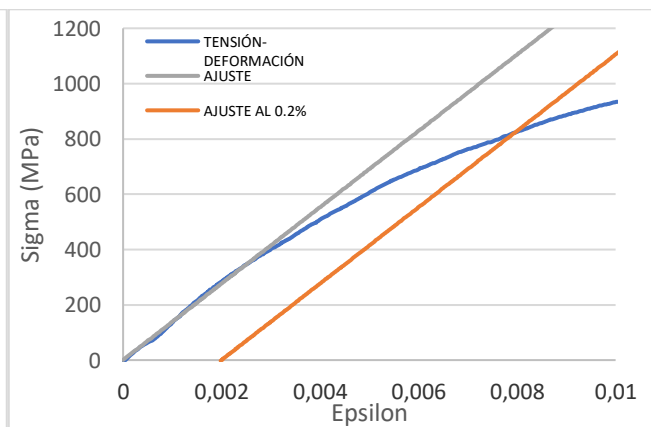


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO INOXIDABLE 17 – 4PH
Codificación	SS3

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{t0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.74
Espesor probeta	e [mm]	4.14
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.03



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	152.27
Límite de fluencia	R_p [MPa]	742.70
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1144.46
Límite de rotura	R_u [MPa]	1086.77
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	133.53
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	42.68
Alargamiento a la rotura	A [%]	4.01

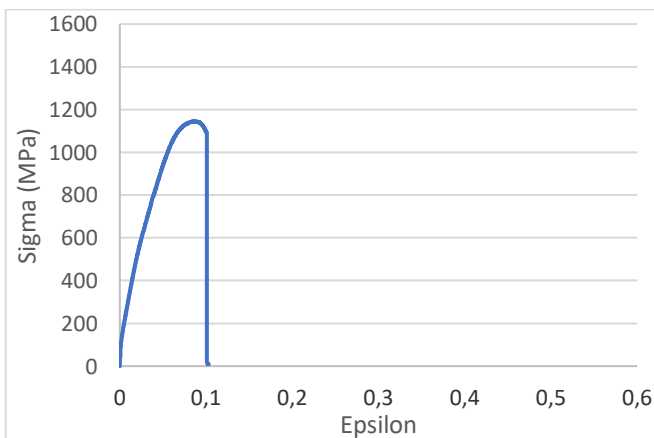


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE LAS MORDAZAS)

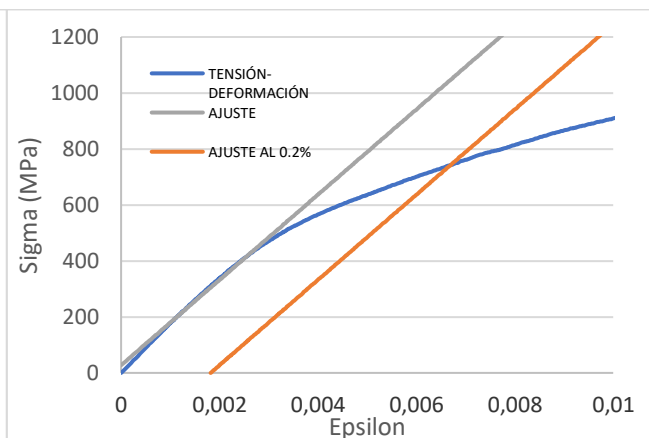


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (EXTENSOMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO INOXIDABLE 17 – 4PH
Codificación	SS4

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.81
Espesor probeta	e [mm]	4.14
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.14



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	151.78
Límite de fluencia	R_p [MPa]	706.13
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1132.14
Límite de rotura	R_u [MPa]	1131.18
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	132.56
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	43.08
Alargamiento a la rotura	A [%]	4.71

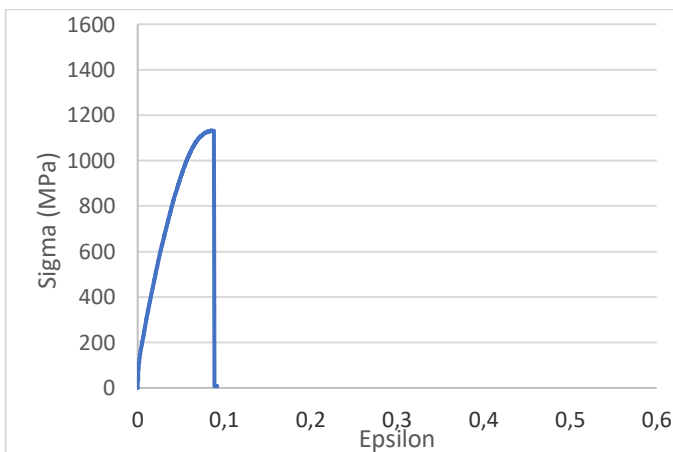


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

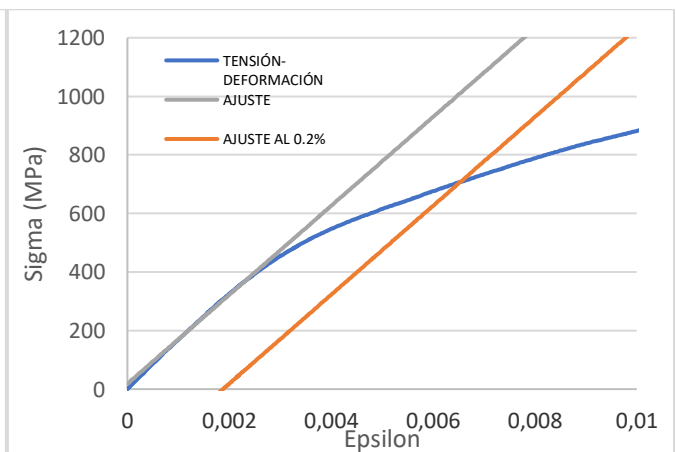


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO INOXIDABLE 17 – 4PH
Codificación	SS5

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.76
Espesor probeta	e [mm]	4.18
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.24



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	146.21
Límite de fluencia	R_p [MPa]	730.90
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1105.40
Límite de rotura	R_u [MPa]	1058.67
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	133.02
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	43.29
Alargamiento a la rotura	A [%]	4.97

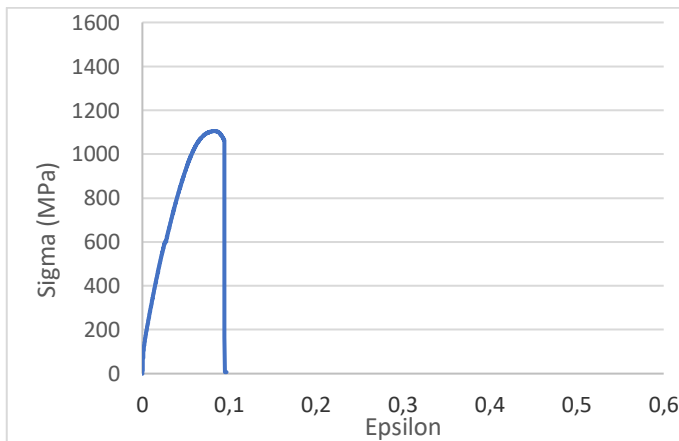


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

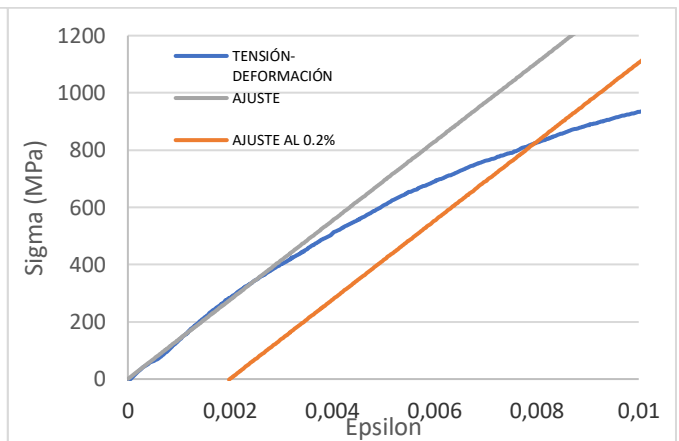


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO INOXIDABLE 17 – 4PH
Codificación	SSC2

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.73
Espesor probeta	e [mm]	4.25
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.58



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	158.25
Límite de fluencia	R_p [MPa]	750.36
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1053.73
Límite de rotura	R_u [MPa]	1053.42
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	130.46
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	42.51
Alargamiento a la rotura	A [%]	2.28

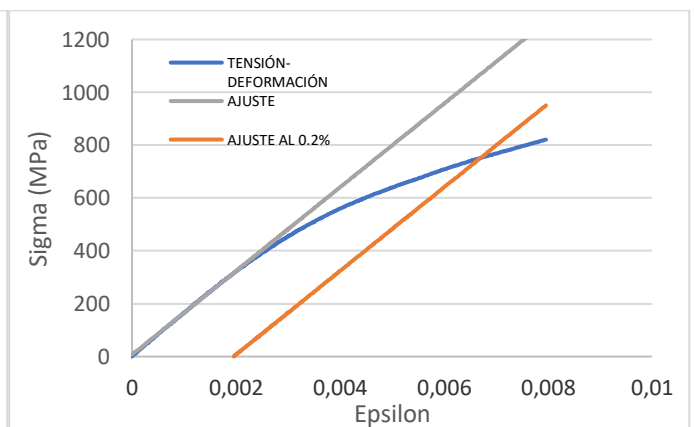
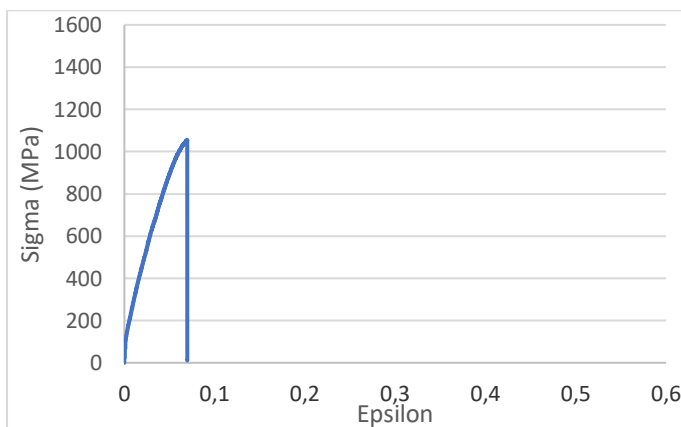


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (EXTENSOMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO INOXIDABLE 17 – 4PH
Codificación	SSC3

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.74
Espesor probeta	e [mm]	4.26
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.58



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	159.36
Límite de fluencia	R_p [MPa]	739.31
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1069.23
Límite de rotura	R_u [MPa]	1068.89
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	131.20
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	42.90
Alargamiento a la rotura	A [%]	3.18

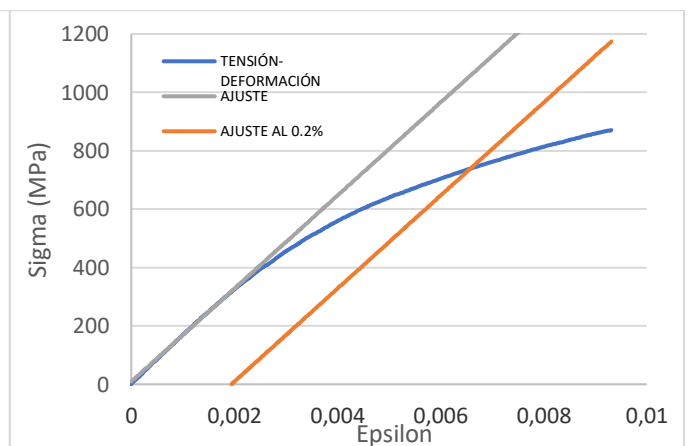
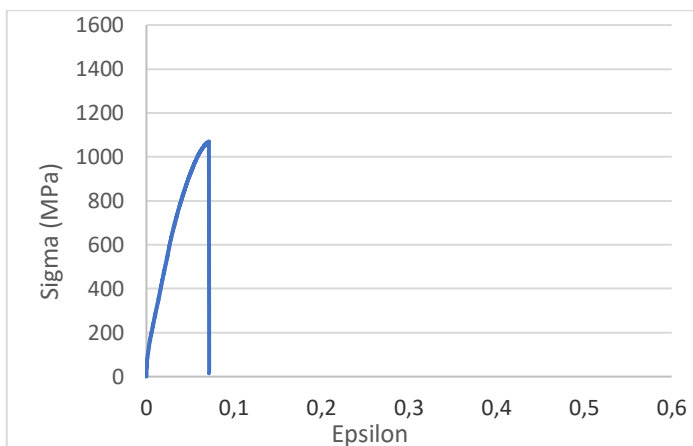


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO INOXIDABLE 17 – 4PH
Codificación	SSC4

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.74
Espesor probeta	e [mm]	4.36
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	42.08



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	159.58
Límite de fluencia	R_p [MPa]	683.67
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	997.53
Límite de rotura	R_u [MPa]	997.53
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	130.3
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	42.80
Alargamiento a la rotura	A [%]	1.72

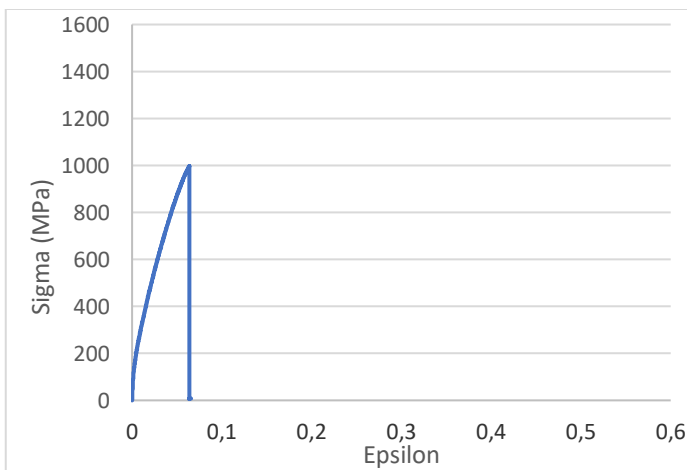


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

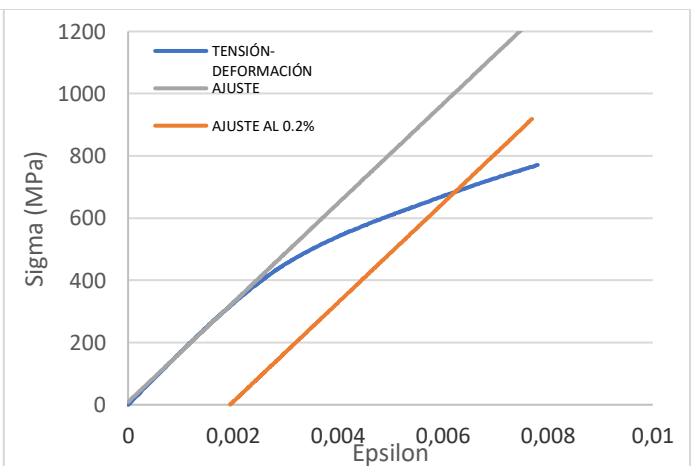


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO INOXIDABLE 17 – 4PH
Codificación	SSC5

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.68
Espesor probeta	e [mm]	4.22
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.36



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	175.75
Límite de fluencia	R_p [MPa]	689.65
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1053.05
Límite de rotura	R_u [MPa]	1053.05
Longitud final probeta	L_{if} [mm]	130.62
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	42.34
Alargamiento a la rotura	A [%]	2.36

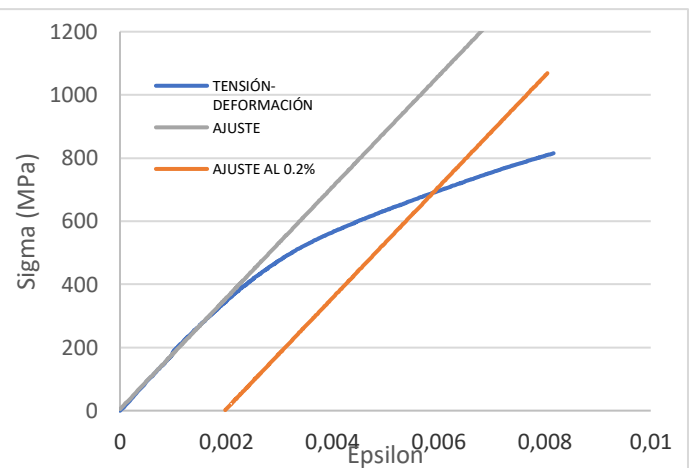
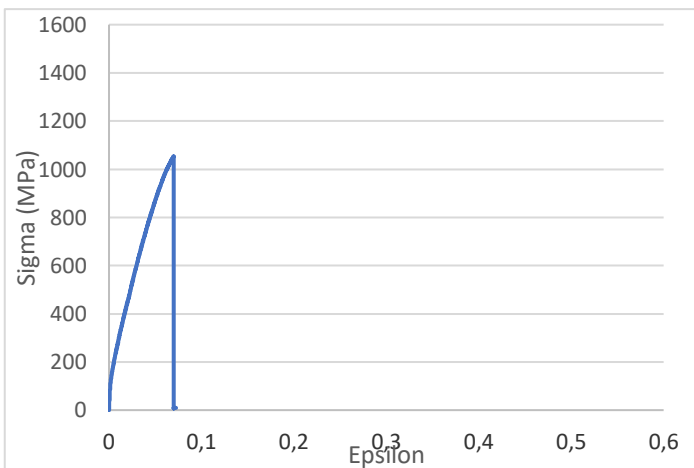


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA A2
Codificación	A21

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.86
Espesor probeta	e [mm]	4.23
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.69



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	157.38
Límite de fluencia	R_p [MPa]	301.39
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	380.25
Límite de rotura	R_u [MPa]	359.23
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	132.82
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.75
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.15

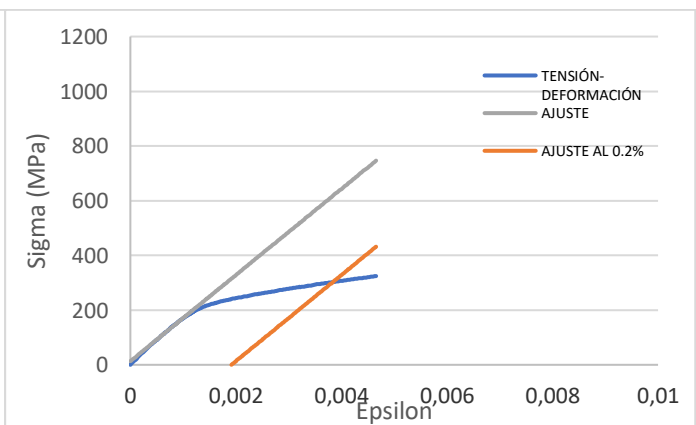
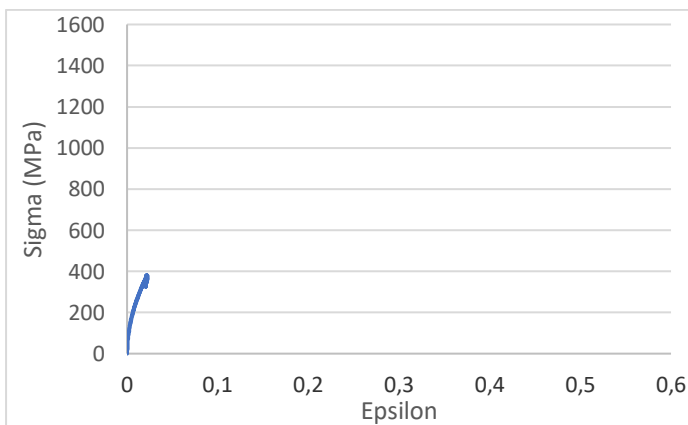


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (EXTENSOMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA A2
Codificación	A22

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.70
Espesor probeta	e [mm]	4.18
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.24



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	117.94
Límite de fluencia	R_p [MPa]	347.60
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	482.02
Límite de rotura	R_u [MPa]	463.20
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	132.76
Longitud entre marcas	$L_{finmarcas}$ [mm]	41.64
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.96

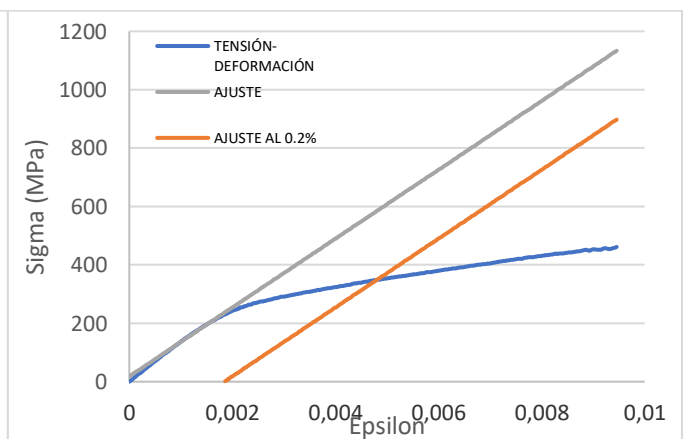
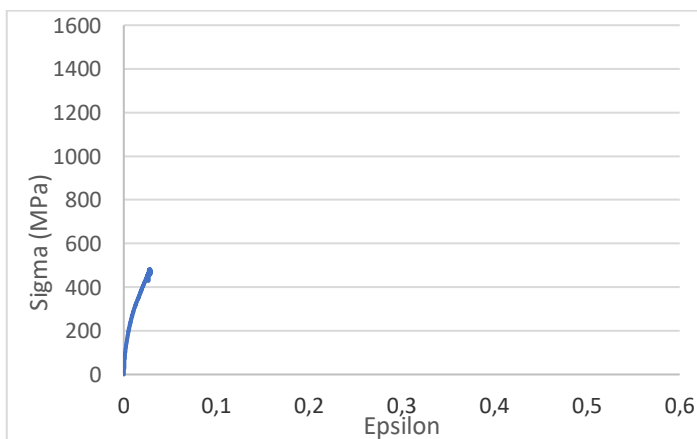


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (EXTENSOMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA A2
Codificación	A23

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.80
Espesor probeta	e [mm]	4.24
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.63



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	197.66
Límite de fluencia	R_p [MPa]	352.77
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	649.38
Límite de rotura	R_u [MPa]	648.72
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	131.80
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.96
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.78

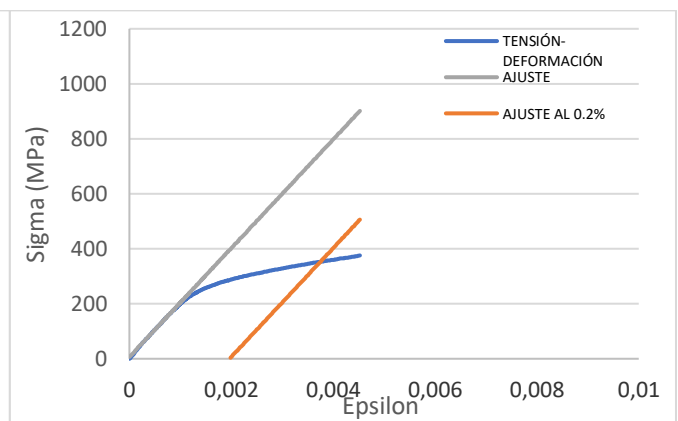
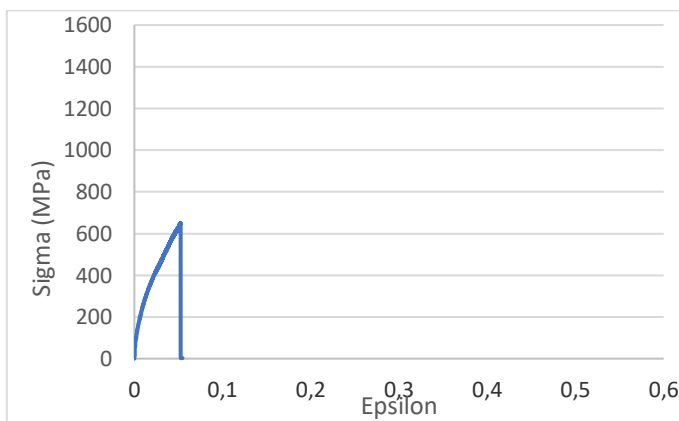
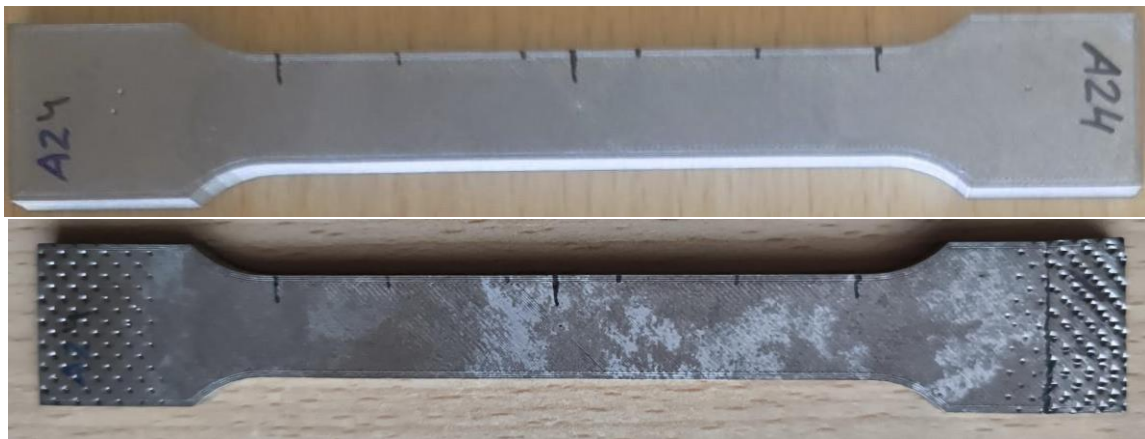


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA A2
Codificación	A24

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.72
Espesor probeta	e [mm]	4.16
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.03



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	142.36
Límite de fluencia	R_p [MPa]	297.89
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	648.51
Límite de rotura	R_u [MPa]	646.15
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	131.88
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.36
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.80

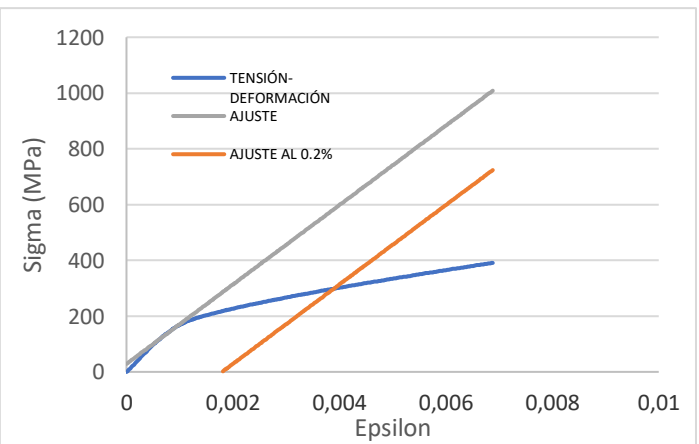
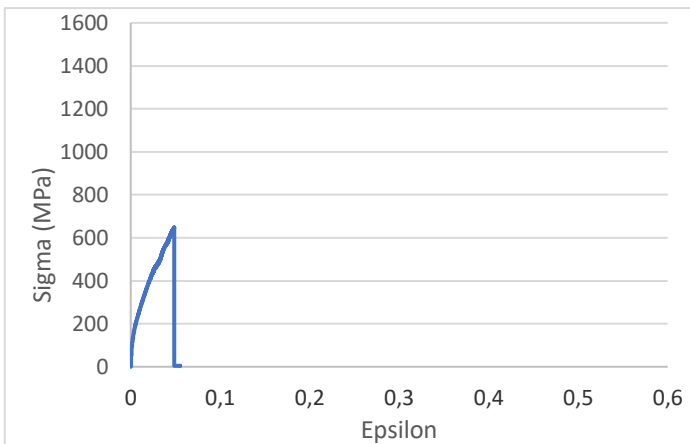


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA A2
Codificación	A25

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.74
Espesor probeta	e [mm]	4.16
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.03



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	110.96
Límite de fluencia	R_p [MPa]	269.38
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	638.40
Límite de rotura	R_u [MPa]	633.01
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	131.91
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.37
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.82

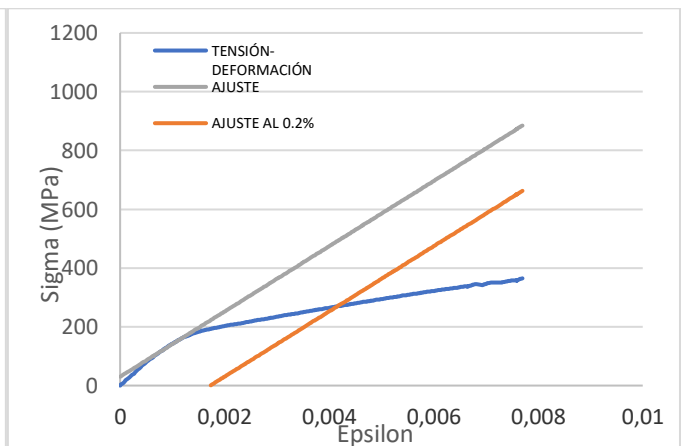
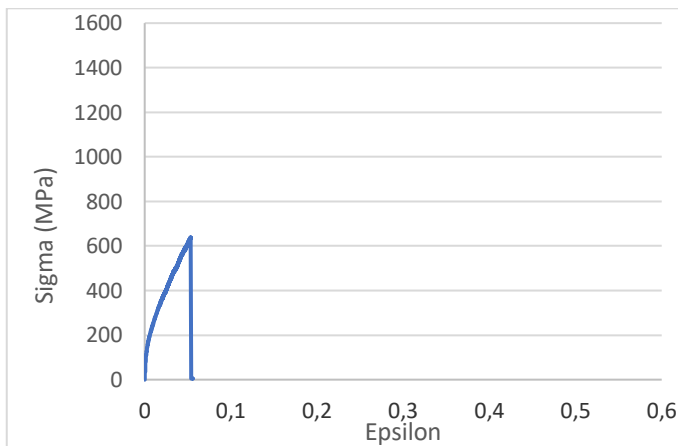


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (EXTENSOMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA A2
Codificación	A2C1

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.92
Espesor probeta	e [mm]	4.27
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.98



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	160.85
Límite de fluencia	R_p [MPa]	327.51
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	543.41
Límite de rotura	R_u [MPa]	543.41
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	131.15
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	42.34
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.85

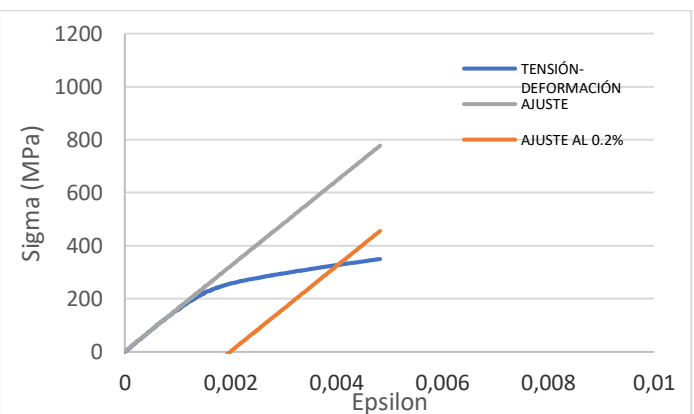
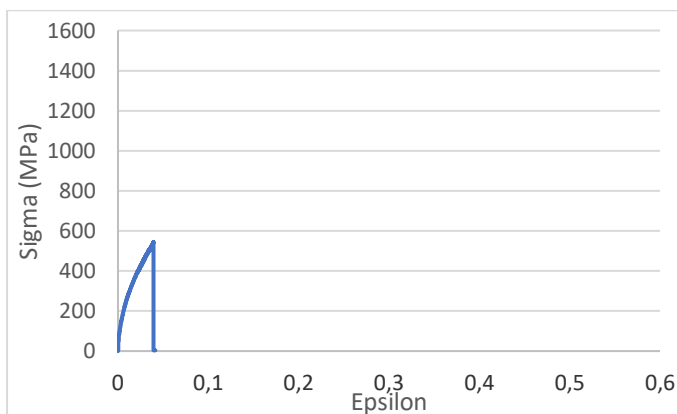


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (EXTENSOMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA A2
Codificación	A2C2

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.84
Espesor probeta	e [mm]	4.20
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.42



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	165.29
Límite de fluencia	R_p [MPa]	345.32
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	523.41
Límite de rotura	R_u [MPa]	520.20
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	131.12
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.74
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.79

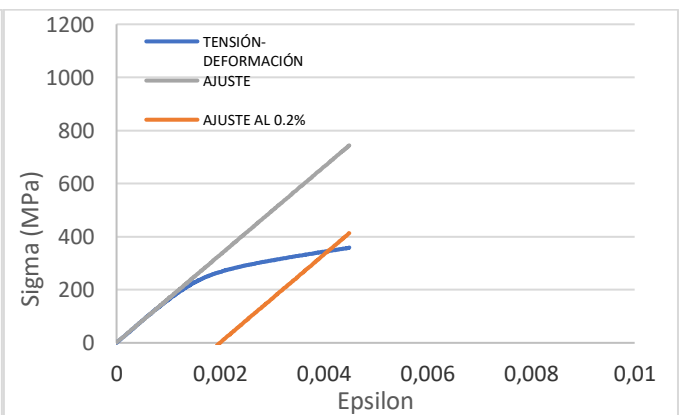
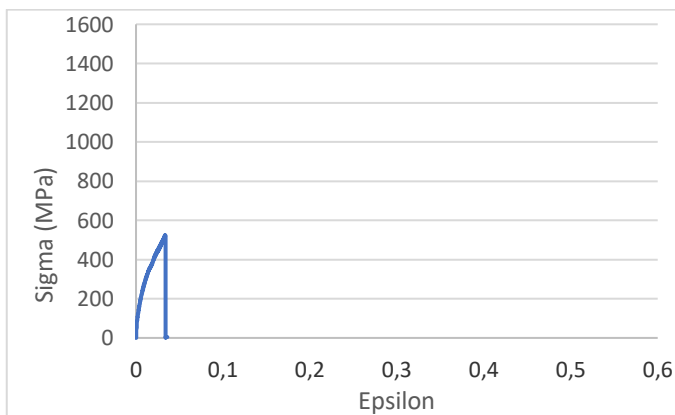
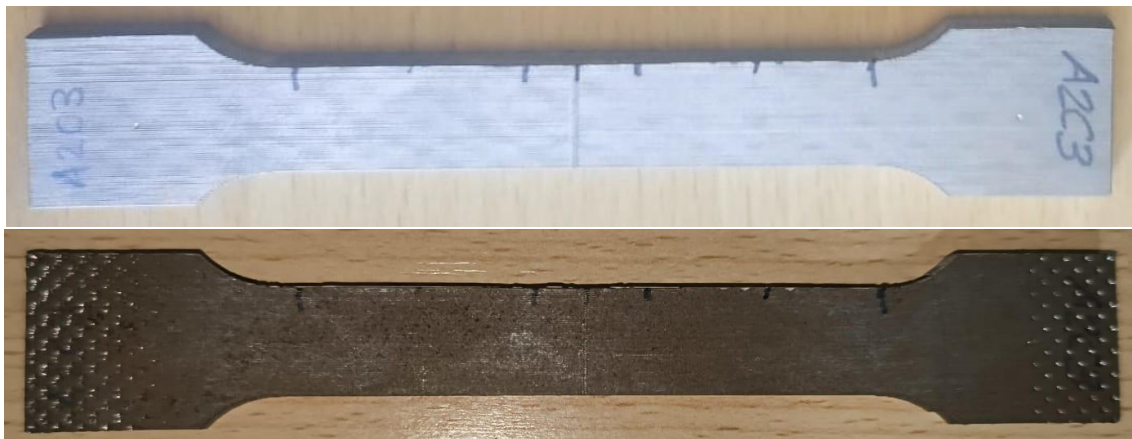


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (EXTENSOMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA A2
Codificación	A2C3

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.80
Espesor probeta	e [mm]	4.14
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	40.93



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	172.72
Límite de fluencia	R_p [MPa]	421.01
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	679.13
Límite de rotura	R_u [MPa]	679.13
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	130.35
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.26
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.81

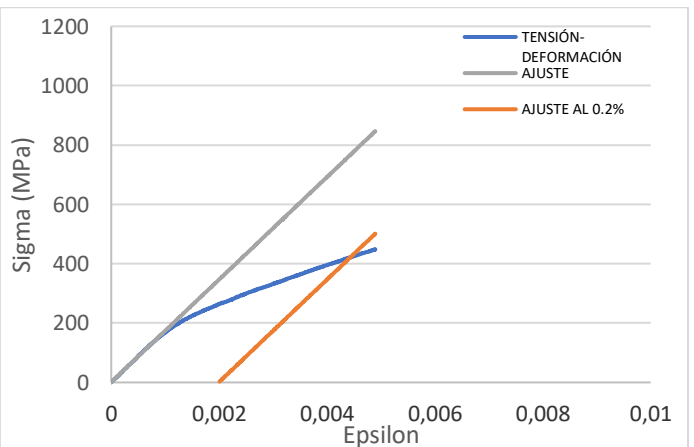
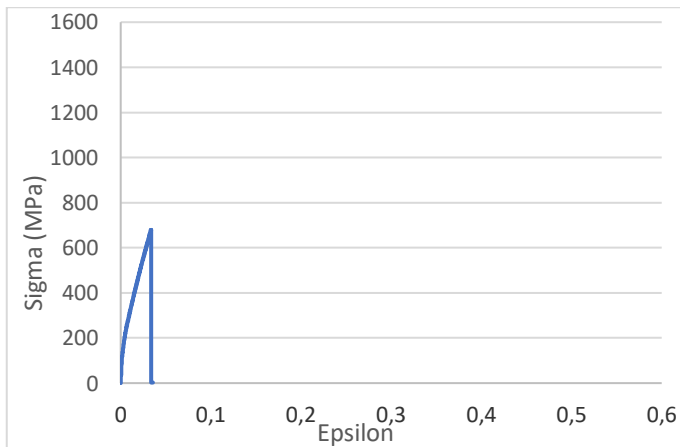


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA A2
Codificación	A2C4

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.86
Espesor probeta	e [mm]	4.04
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	40.77



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	165.11
Límite de fluencia	R_p [MPa]	410.05
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	702.61
Límite de rotura	R_u [MPa]	702.61
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	130.40
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.11
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.84

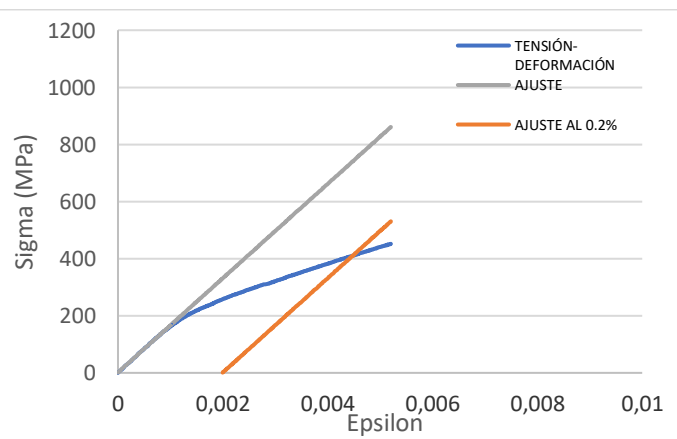
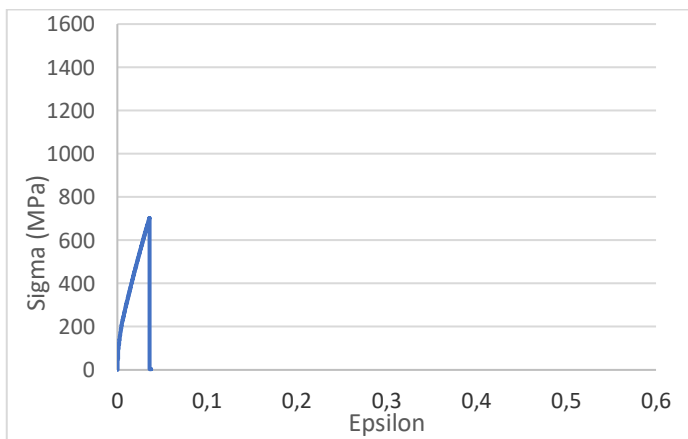
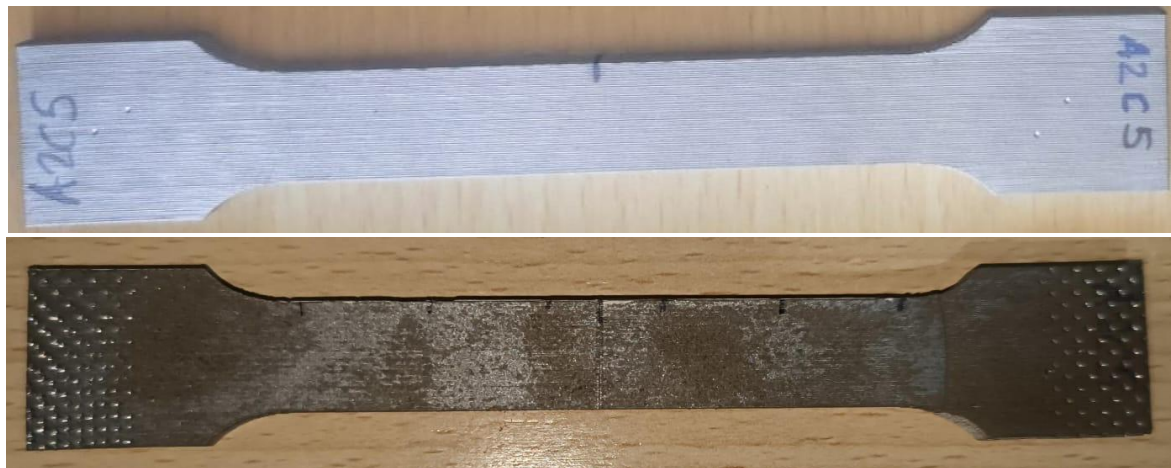


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA A2
Codificación	A2C5

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.90
Espesor probeta	e [mm]	4.08
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.04



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	171.24
Límite de fluencia	R_p [MPa]	293.55
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	538.13
Límite de rotura	R_u [MPa]	532.14
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	131.10
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.42
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.92

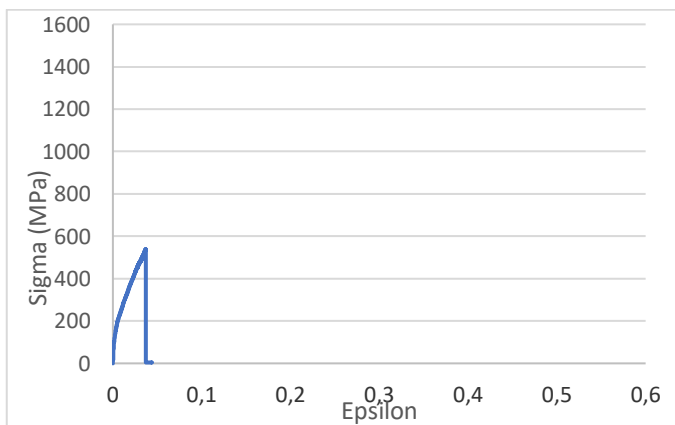


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

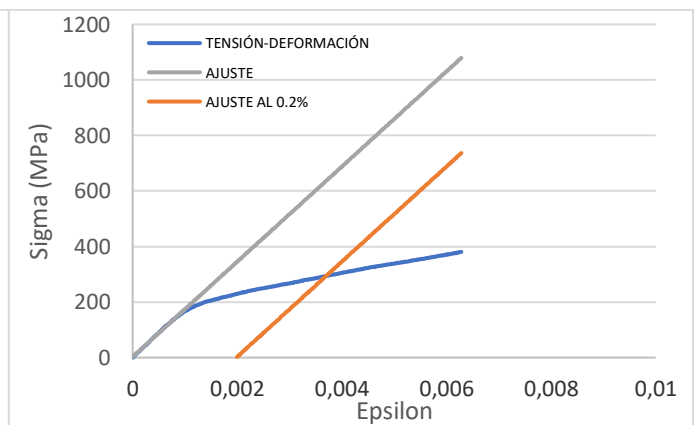


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA H13
Codificación	H131

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.75
Espesor probeta	e [mm]	4
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	40.35



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	203.77
Límite de fluencia	R_p [MPa]	932.01
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1548.48
Límite de rotura	R_u [MPa]	1548.48
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	133.52
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.86
Alargamiento a la rotura	A [%]	3.75

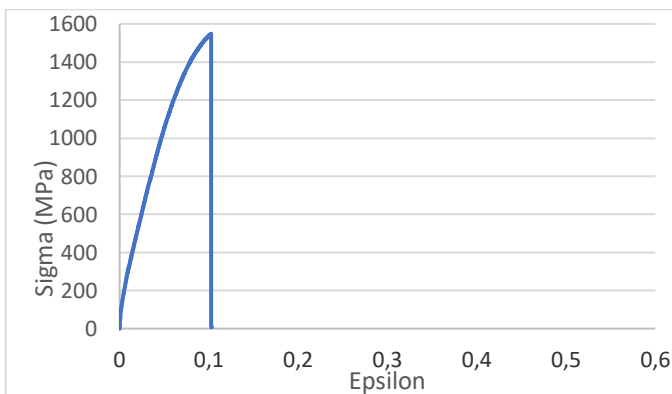


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

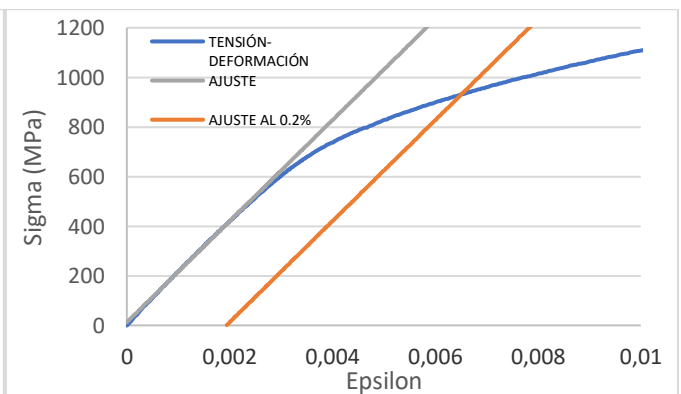


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA H13
Codificación	H132

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.88
Espesor probeta	e [mm]	3.99
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	40.52



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	174.16
Límite de fluencia	R_p [MPa]	1018.06
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1548.13
Límite de rotura	R_u [MPa]	1548.13
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	135.22
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	42.44
Alargamiento a la rotura	A [%]	4.78

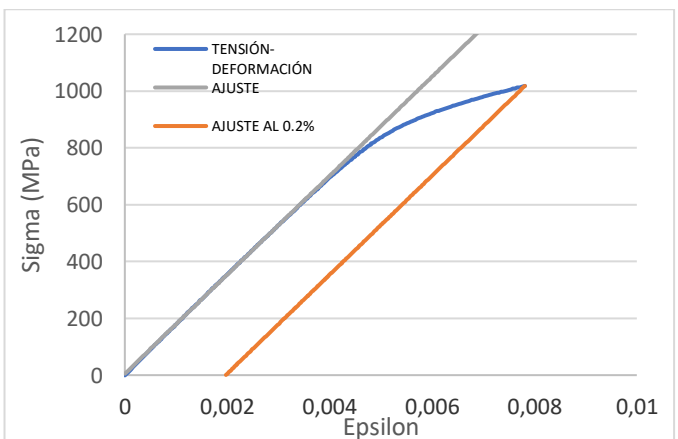
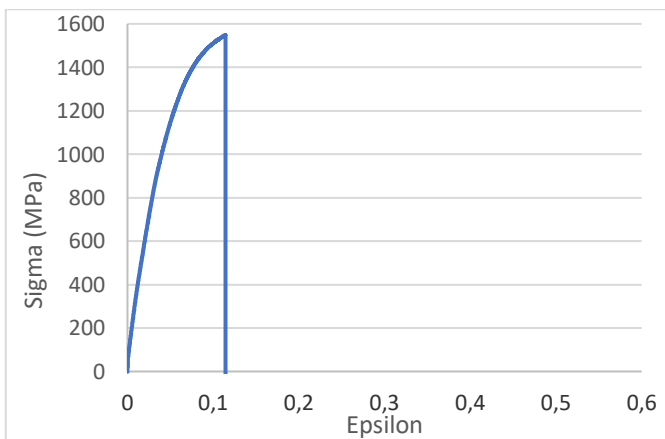
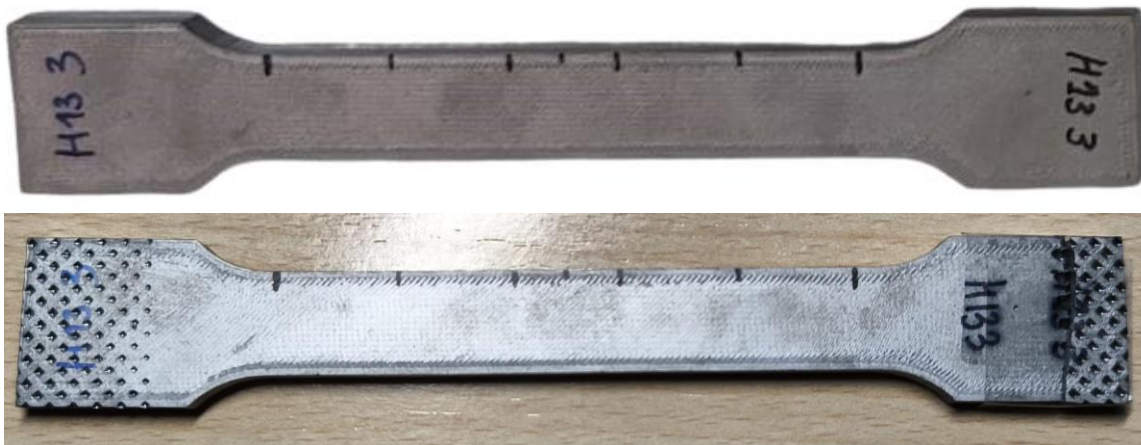


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA H13
Codificación	H133

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.74
Espesor probeta	e [mm]	4.10
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	40.79



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	167.46
Límite de fluencia	R_p [MPa]	739.47
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1456.47
Límite de rotura	R_u [MPa]	1456.47
Longitud final probeta	L_{if} [mm]	133.11
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.86
Alargamiento a la rotura	A [%]	2.62

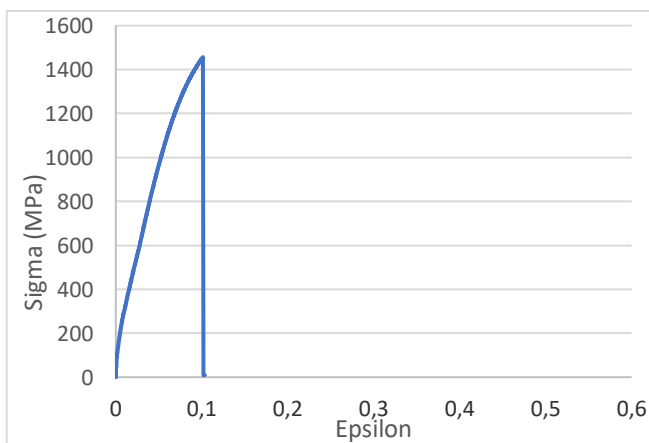


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

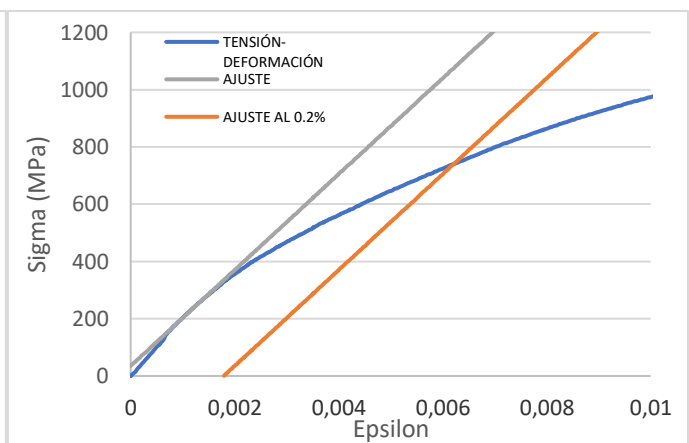


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA H13
Codificación	H134

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.78
Espesor probeta	e [mm]	4.02
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	40.53



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	166.82
Límite de fluencia	R_p [MPa]	746.46
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1549.37
Límite de rotura	R_u [MPa]	1549.26
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	133.82
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.98
Alargamiento a la rotura	A [%]	3.58

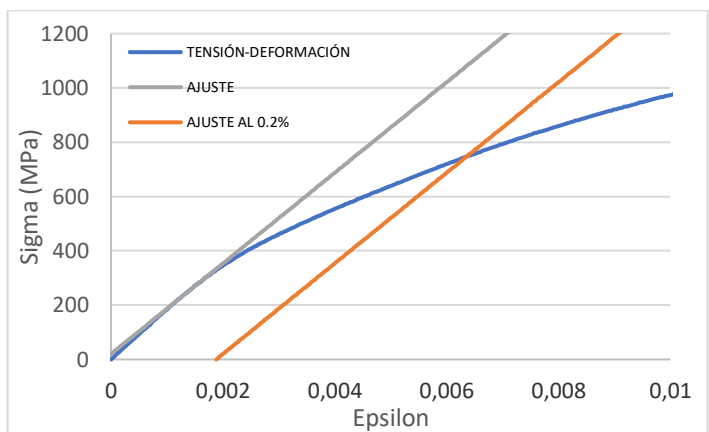
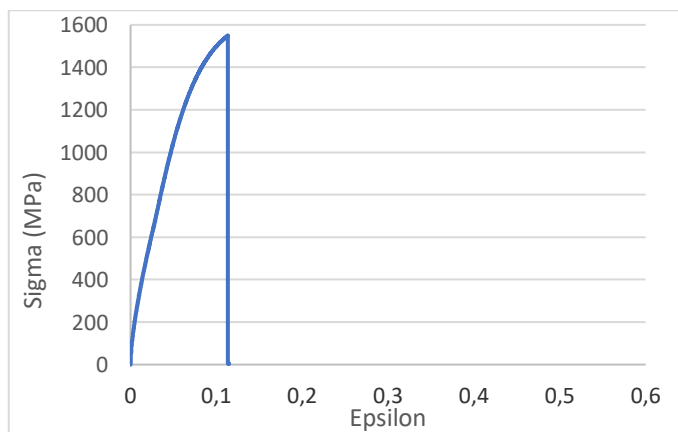
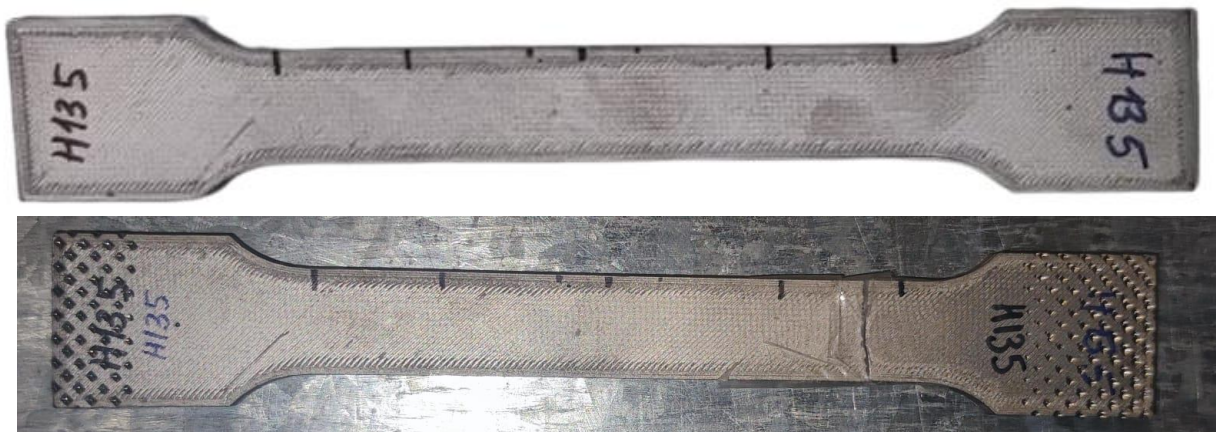


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (EXTENSOMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA H13
Codificación	H135

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.80
Espesor probeta	e [mm]	4.06
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	40.74



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	157.79
Límite de fluencia	R_p [MPa]	744.37
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1565.01
Límite de rotura	R_u [MPa]	1565.01
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	133.67
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.98
Alargamiento a la rotura	A [%]	3.05

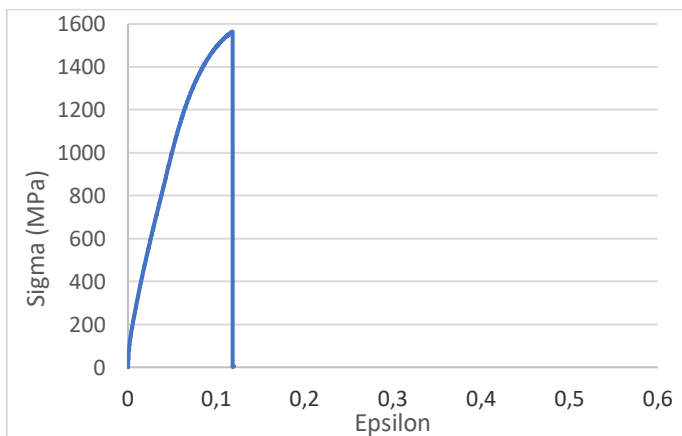


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

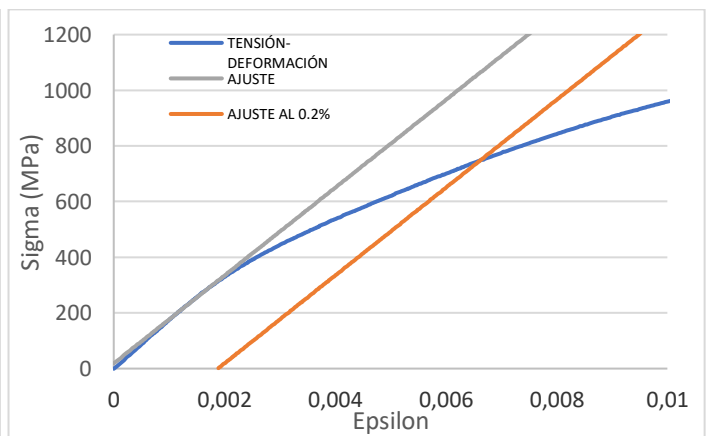
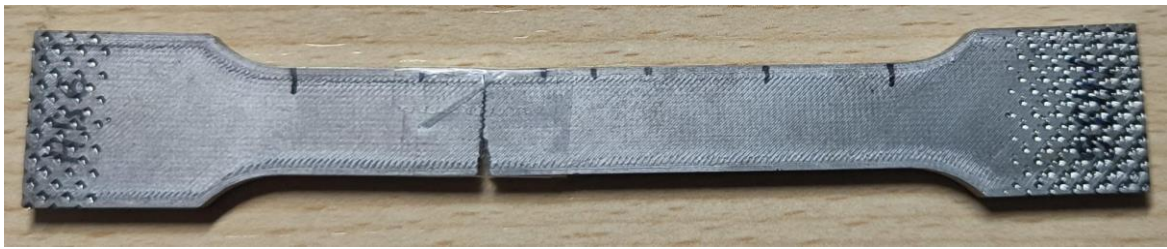


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA H13
Codificación	H136

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.80
Espesor probeta	e [mm]	4.10
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	40.91



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	164.36
Límite de fluencia	R_p [MPa]	788.96
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1493.43
Límite de rotura	R_u [MPa]	1493.33
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	133.43
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.42
Alargamiento a la rotura	A [%]	1.22

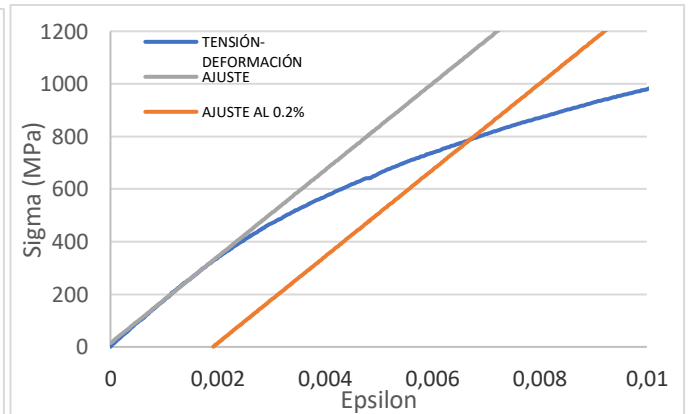
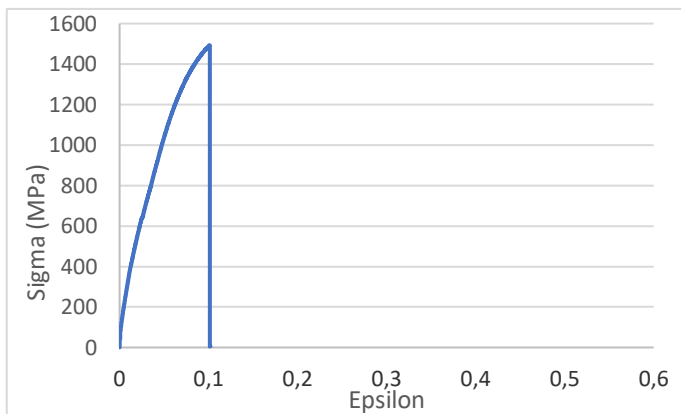


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA H13
Codificación	H13C1

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.95
Espesor probeta	e [mm]	4.08
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.07



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	175.34
Límite de fluencia	R_p [MPa]	741.38
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1050.61
Límite de rotura	R_u [MPa]	1050.61
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	130.60
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.36
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.70

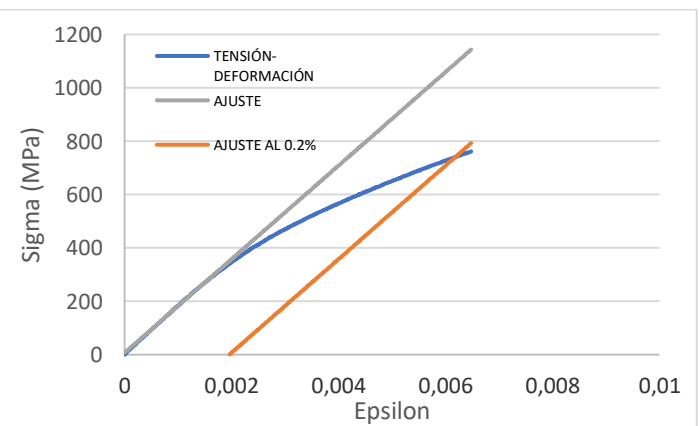
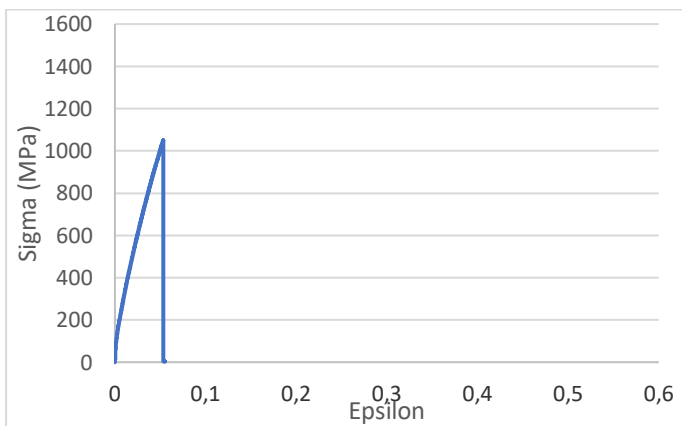


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (EXTENSOMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA H13
Codificación	H13C2

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.96
Espesor probeta	e [mm]	4.18
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.61



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	161.58
Límite de fluencia	R_p [MPa]	724.61
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1233.40
Límite de rotura	R_u [MPa]	1233.40
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	131.28
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.97
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.87

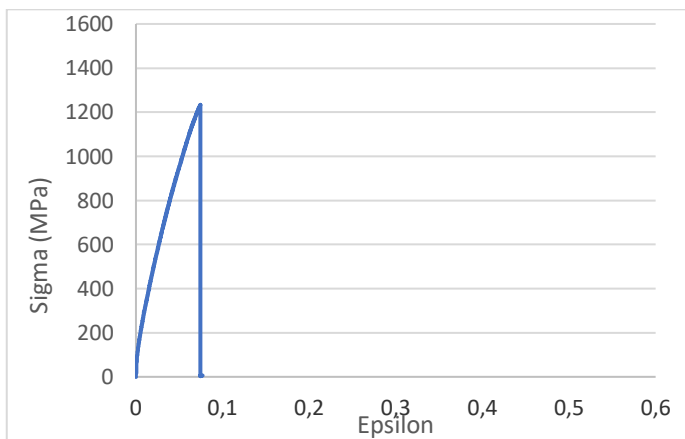


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

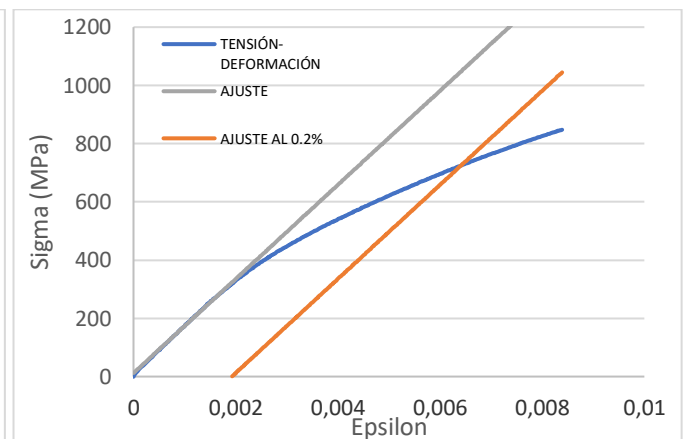


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA H13
Codificación	H13C3

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.92
Espesor probeta	e [mm]	4.16
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.50



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	169.88
Límite de fluencia	R_p [MPa]	741.28
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1066.38
Límite de rotura	R_u [MPa]	1066.38
Longitud final probeta	L_{if} [mm]	130.84
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.84
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.82

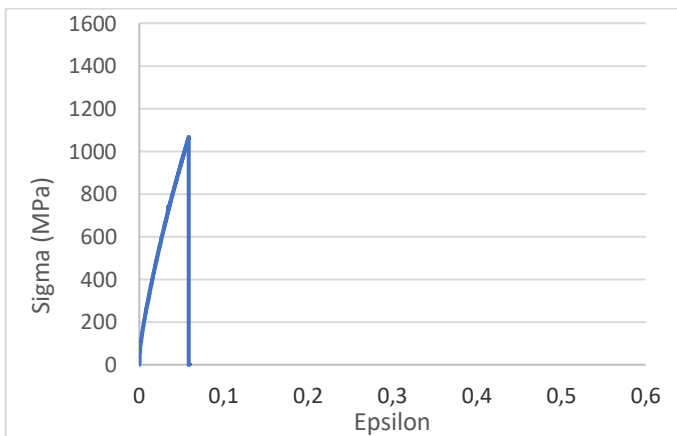


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

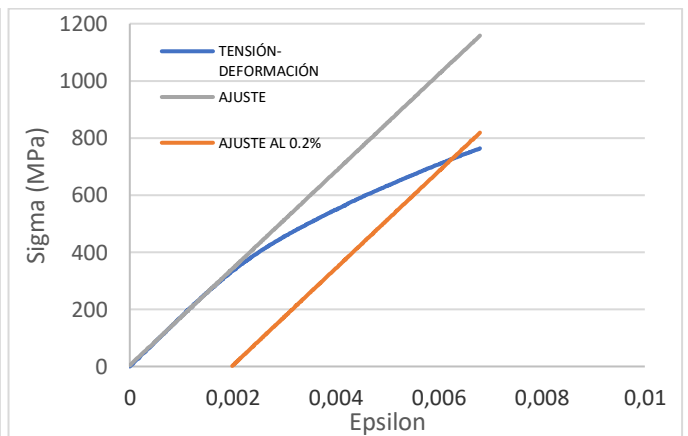
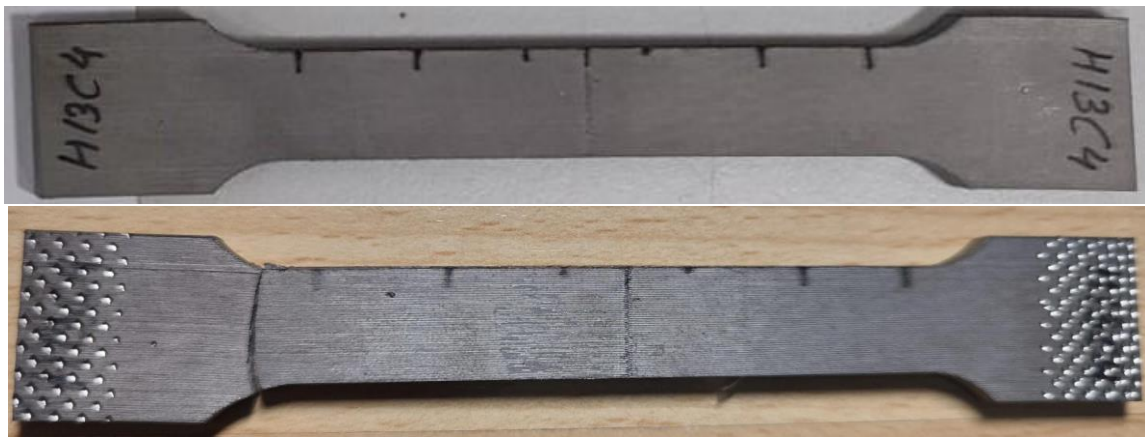


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA H13
Codificación	H13C4

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.88
Espesor probeta	e [mm]	4.17
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.56



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	157.31
Límite de fluencia	R_p [MPa]	692.35
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1145.32
Límite de rotura	R_u [MPa]	1145.32
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	130.90
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.84
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.88

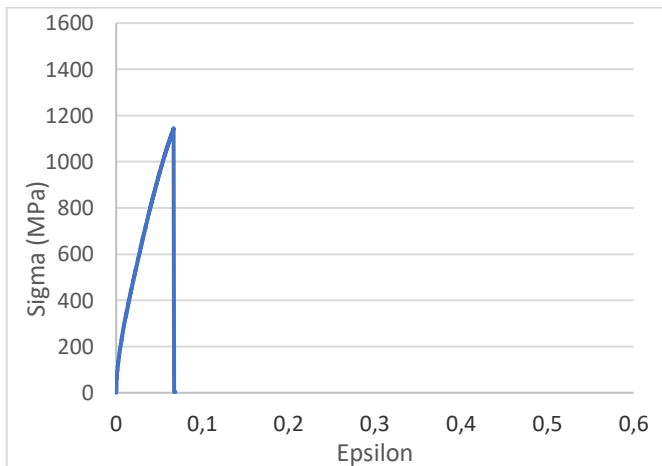


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

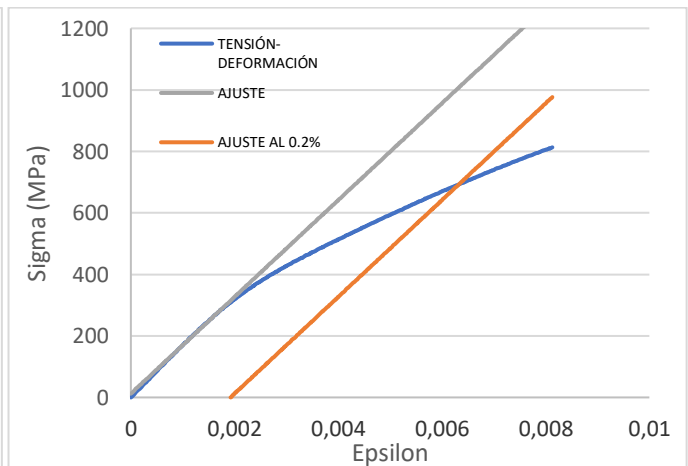


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	ACERO PARA HERRAMIENTA H13
Codificación	H13C5

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.78
Espesor probeta	e [mm]	4.14
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.06



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	170.36
Límite de fluencia	R_p [MPa]	777.14
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	1306.84
Límite de rotura	R_u [MPa]	1306.84
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	131.31
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	41.44
Alargamiento a la rotura	A [%]	0.92

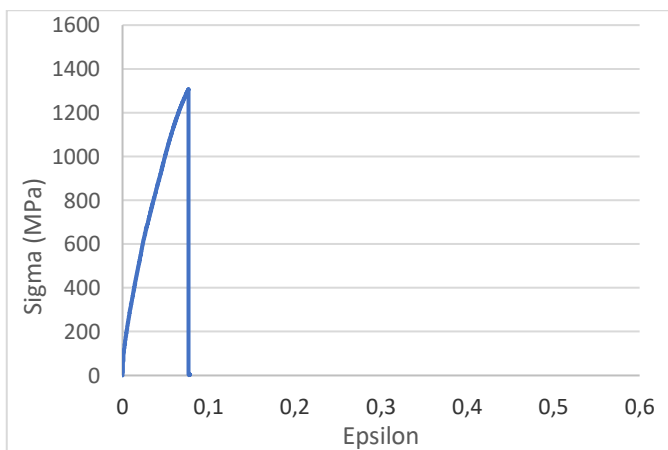


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

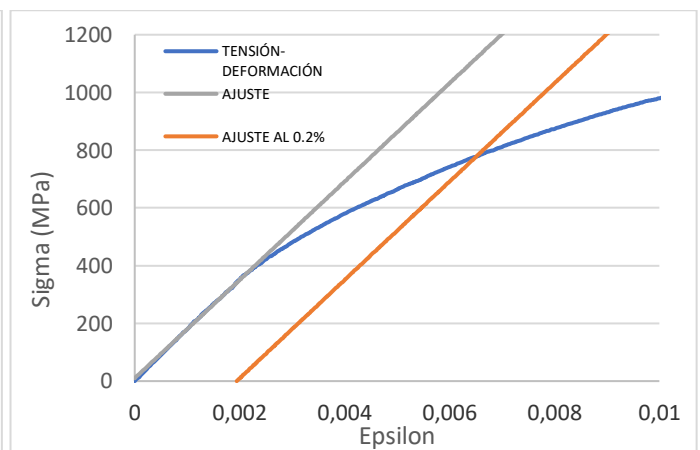


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	INCONEL 625
Codificación	INC1

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.84
Espesor probeta	e [mm]	4.11
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.06



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	17.72 (USANDO DESPLAZAMIENTOS)
Límite de fluencia	R_p [MPa]	356.02
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	794.06
Límite de rotura	R_u [MPa]	794.06
Longitud final probeta	L_{if} [mm]	164.18
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	57.66
Alargamiento a la rotura	A [%]	40.43

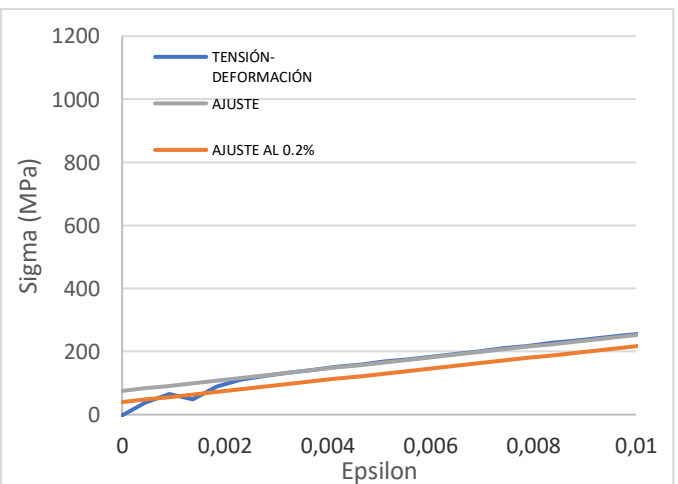
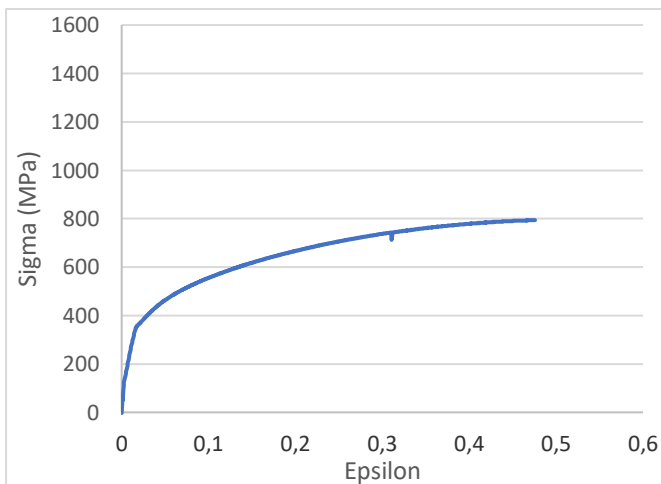


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (DESPLAZAMIENTOS)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	INCONEL 625
Codificación	INC2

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.86
Espesor probeta	e [mm]	4.20
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.52



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	16.71 (USANDO DESPLAZAMIENTOS)
Límite de fluencia	R_p [MPa]	334.75
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	764.42
Límite de rotura	R_u [MPa]	757.43
Longitud final probeta	L_{if} [mm]	165.06
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	58.07
Alargamiento a la rotura	A [%]	39.85

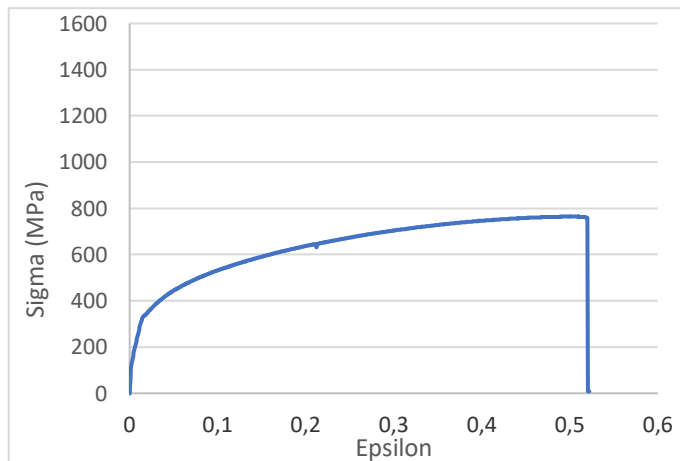


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

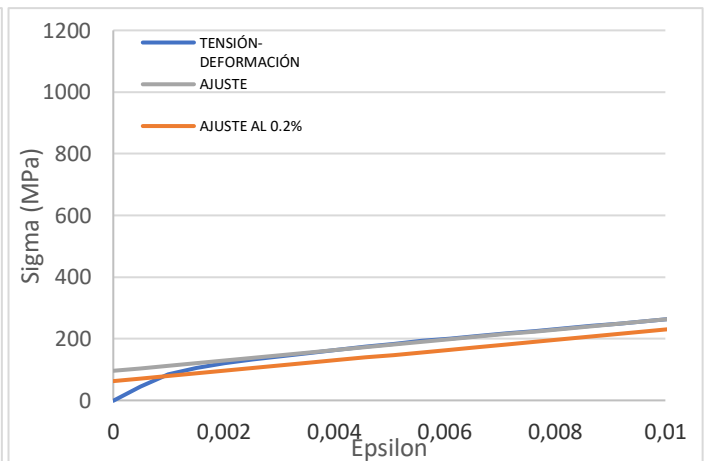


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (DESPLAZAMIENTOS)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	INCONEL 625
Codificación	INC3

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.92
Espesor probeta	e [mm]	4.04
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	40.80



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	166.97
Límite de fluencia	R_p [MPa]	364.01
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	798.73
Límite de rotura	R_u [MPa]	789.30
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	164.83
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	58.34
Alargamiento a la rotura	A [%]	43.00

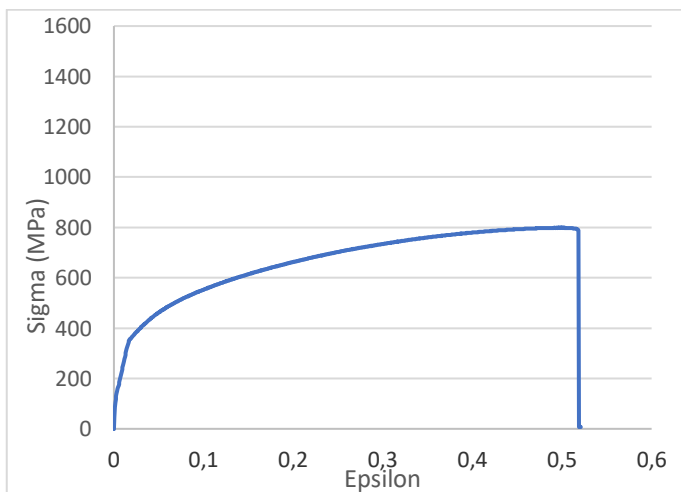


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

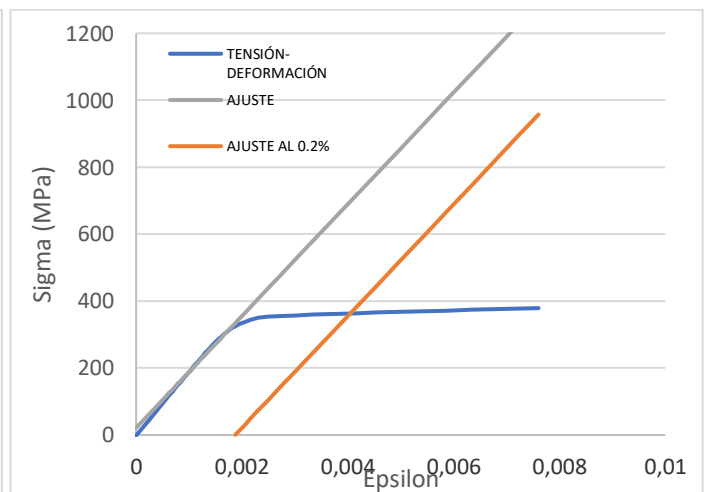


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	INCONEL 625
Codificación	INC4

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.80
Espesor probeta	e [mm]	4.06
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	40.85



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	146.81
Límite de fluencia	R_p [MPa]	348.27
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	788.00
Límite de rotura	R_u [MPa]	785.17
Longitud final probeta	L_{if} [mm]	164.75
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	58.84
Alargamiento a la rotura	A [%]	44.03

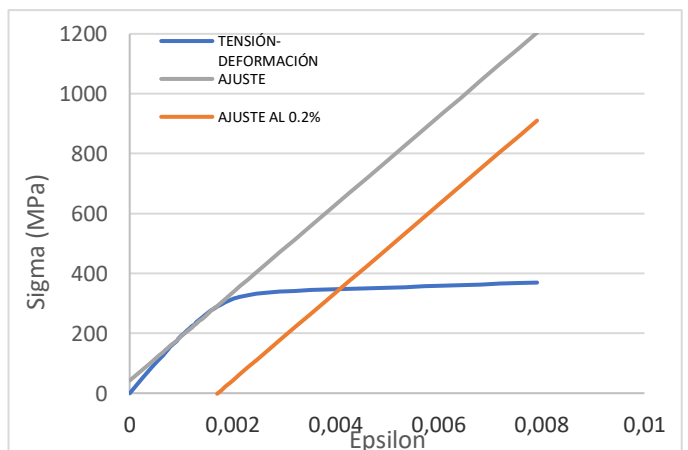
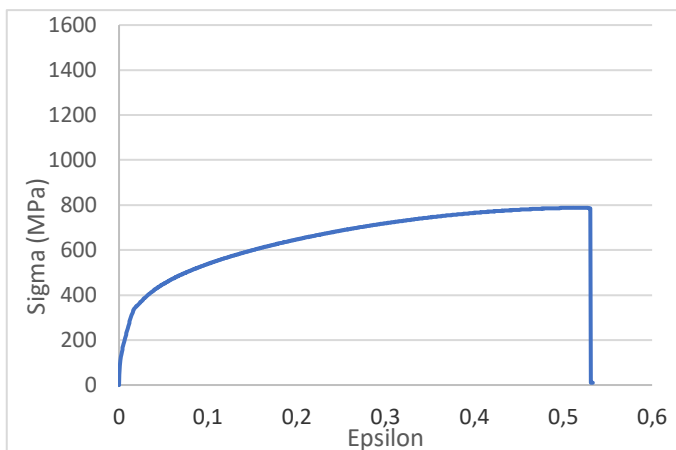
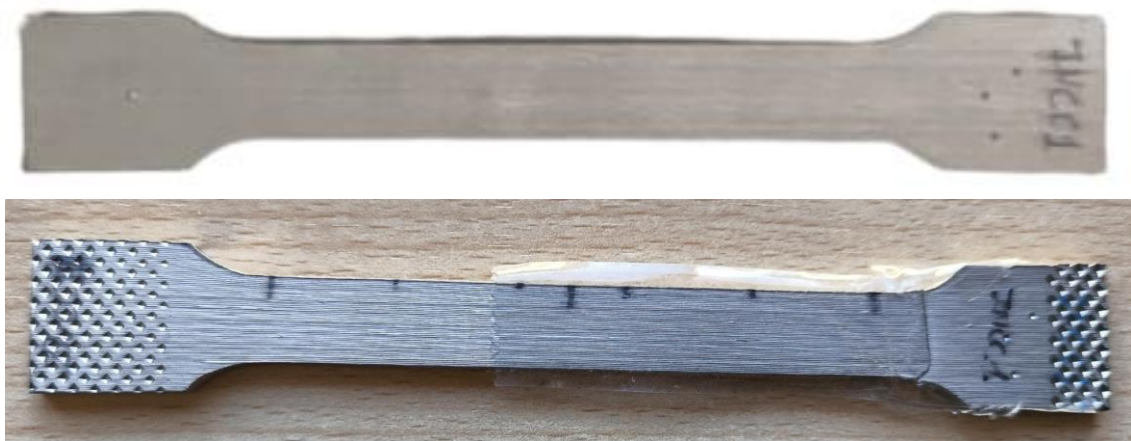


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (EXTENSOMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	INCONEL 625
Codificación	INCC1

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.92
Espesor probeta	e [mm]	4.20
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.64



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	16.05 (POR DESPLAZAMIENTOS)
Límite de fluencia	R_p [MPa]	334.81
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	675.92
Límite de rotura	R_u [MPa]	669.82
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	147.29
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	48.10
Alargamiento a la rotura	A [%]	15.51

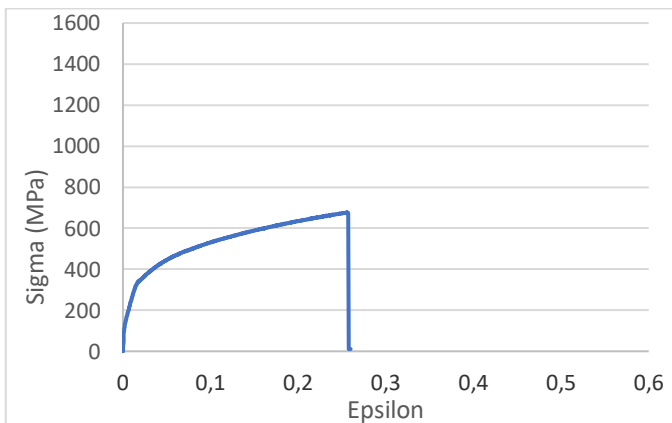


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

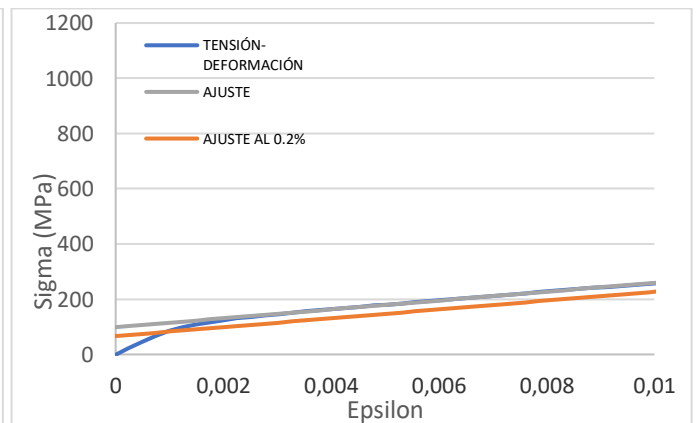


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (DESPLAZAMIENTO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	INCONEL 625
Codificación	INCC2

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.70
Espesor probeta	e [mm]	4.24
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	40.46



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	16.21 (POR DESPLAZAMIENTOS)
Límite de fluencia	R_p [MPa]	343.12
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	696.45
Límite de rotura	R_u [MPa]	650.21
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	148.15
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	48.52
Alargamiento a la rotura	A [%]	17.03

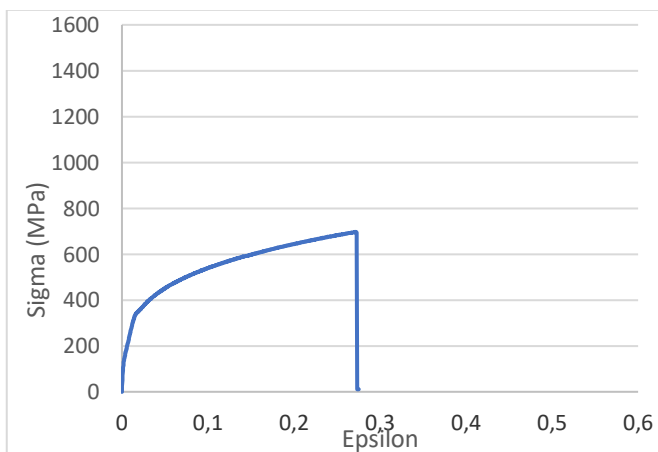


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

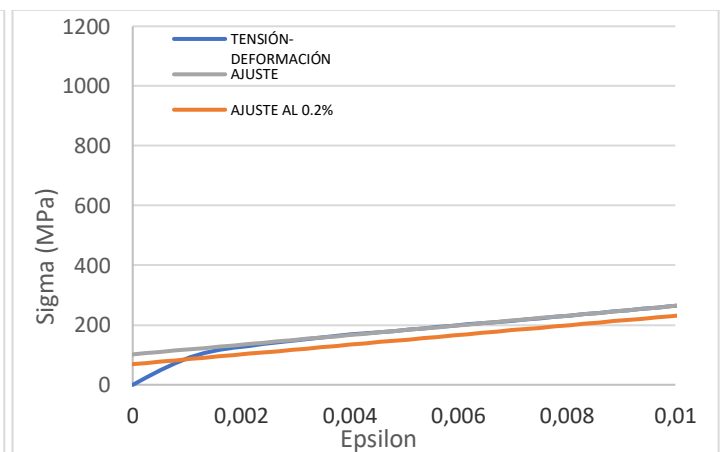


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (DESPLAZAMIENTO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	INCONEL 625
Codificación	INCC3

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.78
Espesor probeta	e [mm]	4.20
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.34



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	16.52 (POR DESPLAZAMIENTOS)
Límite de fluencia	R_p [MPa]	333.78
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	687.80
Límite de rotura	R_u [MPa]	673.85
Longitud final probeta	L_{tf} [mm]	148.61
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	48.20
Alargamiento a la rotura	A [%]	16.57

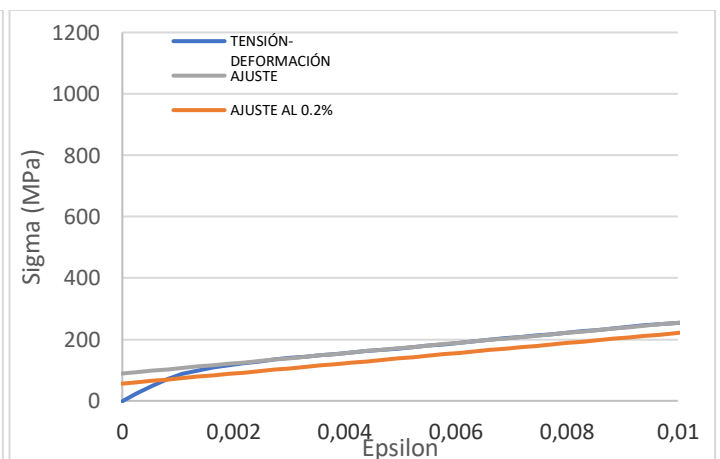
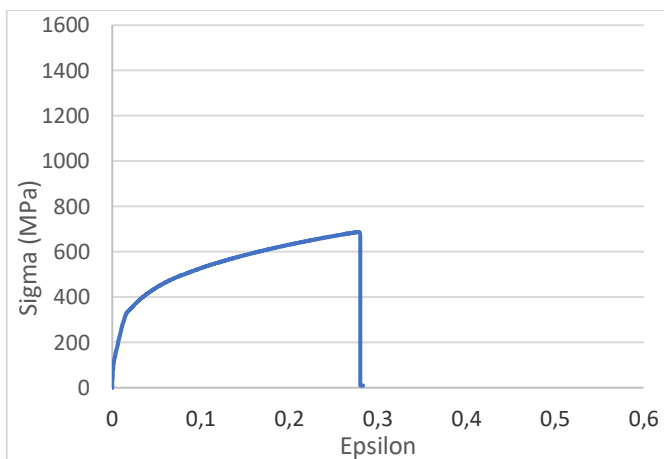


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (DESPLAZAMIENTO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	INCONEL 625
Codificación	INCC4

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.78
Espesor probeta	e [mm]	4.18
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.31



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	15.57 (POR DESPLAZAMIENTOS)
Límite de fluencia	R_p [MPa]	346.25
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	749.23
Límite de rotura	R_u [MPa]	748.59
Longitud final probeta	L_{if} [mm]	154.94
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	51.01
Alargamiento a la rotura	A [%]	23.49

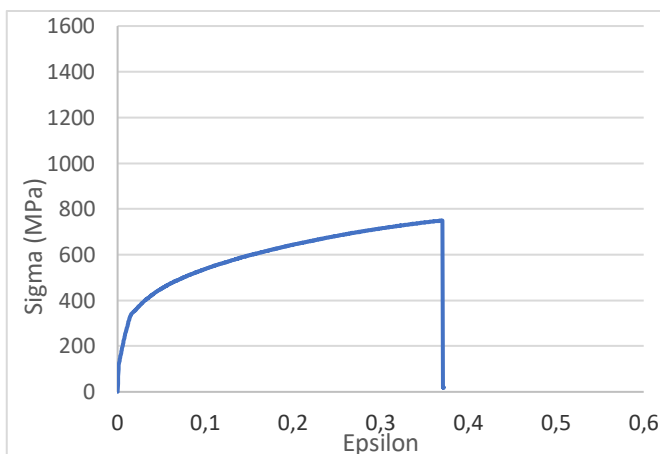


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

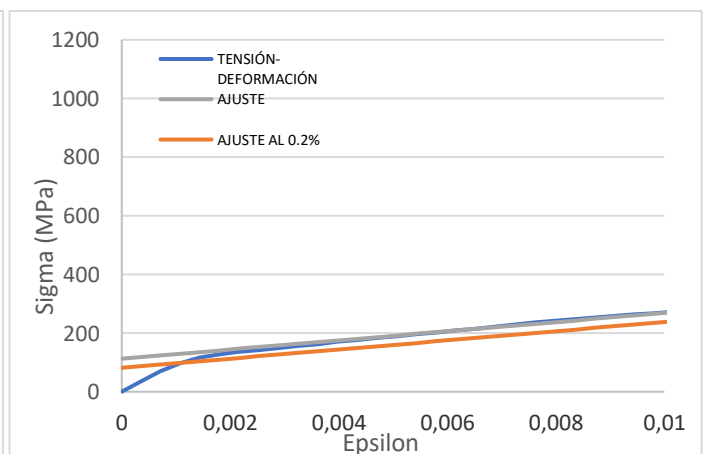
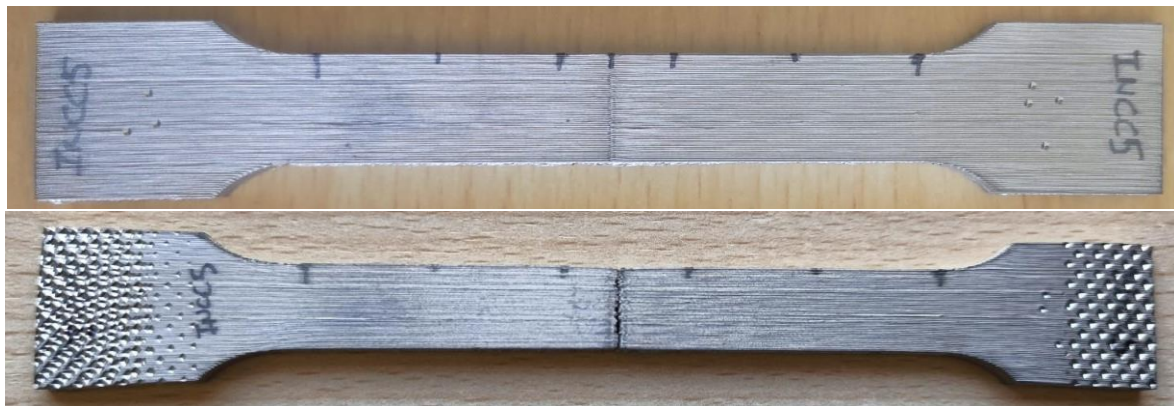


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (DESPLAZAMIENTO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	INCONEL 625
Codificación	INCC5

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.77
Espesor probeta	e [mm]	4.23
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.536



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	192.58
Límite de fluencia	R_p [MPa]	339.70
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	722.18
Límite de rotura	R_u [MPa]	719.10
Longitud final probeta	L_{if} [mm]	152.70
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	51.47
Alargamiento a la rotura	A [%]	23.92

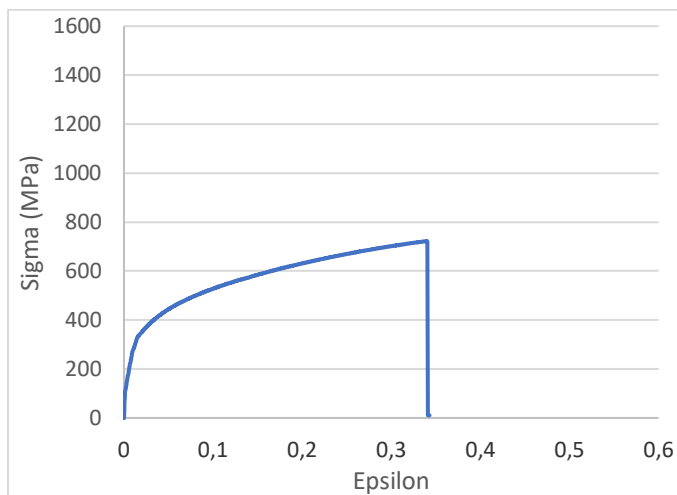


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

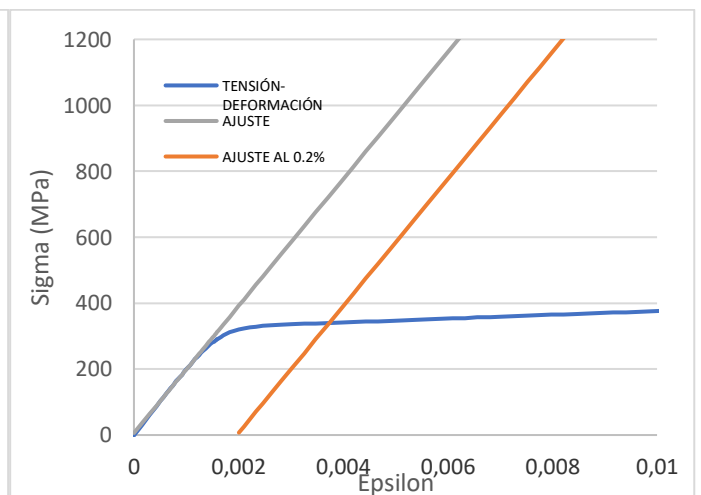


DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)

INFORMACIÓN GENERAL	
Material	INCONEL 625
Codificación	INCC6

DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud inicial probeta	L_{i0} [mm]	128
Ancho probeta	b [mm]	12.80
Espesor probeta	e [mm]	4.16
Longitud entre marcas	$l_{0marcas}$ [mm]	41.21



RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO		
Módulo de elasticidad	E [GPa]	188.76
Límite de fluencia	R_p [MPa]	349.13
Resistencia a la tracción	R_m [MPa]	731.29
Límite de rotura	R_u [MPa]	730.29
Longitud final probeta	L_{if} [mm]	152.00
Longitud entre marcas	$L_{fmarcas}$ [mm]	51.59
Alargamiento a la rotura	A [%]	25.19

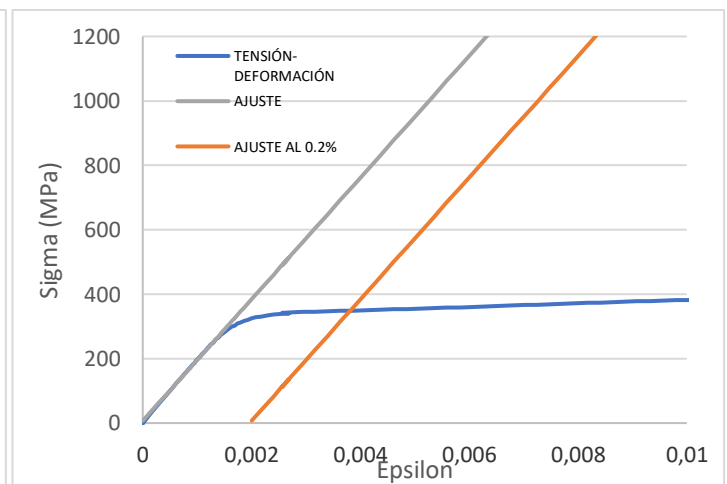
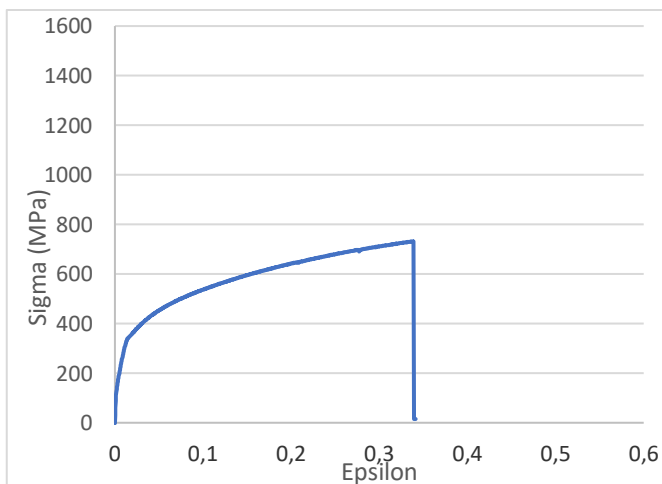


DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION (DESPLAZAMIENTO DE MORDAZAS)

DIAGRAMA TENSION-DEFORMACION AL 0.2% (EXTENSÓMETRO)