



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## **ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

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

**Área de Conocimiento: Área de Ingeniería de los Procesos de  
Fabricación**

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

**Desarrollo e implementación de software para la recopilación de  
datos de crecimiento de grieta en ensayos de fatiga**

Grado en

Ingeniería en Tecnologías Industriales

Autor: Francisco Martínez Villalón

Tutor: FRANCISCO DE SALES MARTÍN FERNÁNDEZ

Cotutor: PABLO MORENO CEREZO

MÁLAGA, noviembre de 2024



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## Resumen

Este proyecto se centra en el desarrollo e implementación de un software diseñado para automatizar la toma de datos durante ensayos de fatiga. Estos ensayos son fundamentales para analizar la resistencia de componentes sometidos a cargas cíclicas.

El software, programado en Python, incorpora una interfaz gráfica que simplifica su uso durante los ensayos en laboratorio. Sus funcionalidades principales son la selección carpeta de destino de los archivos y la capacidad de realizar capturas de pantalla automáticas de los equipos de ensayo a intervalos definidos por el usuario, para un uso intuitivo y eficiente; esto se logró mediante el uso de hilos (threads), permitiendo la ejecución continua de las capturas sin interferir en la interacción con la interfaz, con un bajo consumo de recursos y con gran estabilidad.

La aplicación se diseñó con un enfoque adaptable y potenciando la compatibilidad con diferentes sistemas, lo que posibilita su uso en diferentes tipos de ensayo y su modificación en caso de necesidad. Durante el desarrollo, se realizaron pruebas extensivas con sistemas de ensayo reales para garantizar su fiabilidad y robustez.

En conjunto con este desarrollo también se ha empleado Python para el análisis de los datos obtenidos, tanto para su clasificación y selección como el procesado y medición de las imágenes, mediante el binarizado de la imagen para mejorar la visibilidad de la grieta y utilizar estas imágenes para poder medir los contornos de manera automática.

Para el desarrollo de los ensayos se han diseñado y fabricado probetas mediante fabricación aditiva con sistema Metal X, el material seleccionado ha sido el acero para herramientas D2, del que no se ha encontrado disponible documentación sobre la resistencia a la fatiga de piezas que no fuesen fabricadas mediante fabricación tradicional.

El software desarrollado resulta una herramienta útil y efectiva para el seguimiento de ensayos, con la eficiencia y la precisión en la recopilación de datos requerida, este proyecto también contribuye al seguimiento y análisis posterior, a una fracción del coste de las opciones comerciales disponibles y siendo de código abierto.

**Palabras clave:** Recopilación de datos, compatibilidad, Python, ensayo de fatiga, fabricación aditiva, Metal X.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## Índice

1. Objetivos y justificación.....	1
2. Marco de referencia.....	3
2.1. Ensayo de fatiga.....	3
2.1.1. Grietas y modos de fractura.....	4
2.1.2. Caracterización del crecimiento de grieta .....	7
2.1.3. Obtención de datos .....	14
2.2. Fabricación aditiva .....	17
2.2.1. Impresión de metales .....	19
2.2.2. Tecnología ADAM .....	21
3. Fabricación de las probetas .....	27
4. Metodología experimental de los ensayos .....	37
4.1. Probeta cilíndrica de tracción .....	37
4.2. Probetas de fatiga.....	39
5. Resultados obtenidos del programa.....	45
5.1. Tratamiento de datos.....	48
6. Análisis de resultados.....	53
6.1. Resultados ensayos de tracción .....	53
6.2. Análisis de las probetas de tracción ensayadas .....	56
6.3. Análisis de las probetas de fatiga ensayadas .....	57
6.4. Análisis de las probetas de microscopía .....	60
7. Conclusiones .....	65
8. Bibliografía.....	69
9. Anexos.....	71
Anexo I .....	71

## Índice de figuras

Figura 1: desviaciones en los flujos de fuerzas a través de una grieta a) Flujo sin grieta, b) Flujo con una grieta en el borde de la pieza, c) Flujo con una grieta interna (Richard y Sander, 2012). .....	5
Figura 2: representación de los modos de apertura de grieta a) modo I, b) modo II, c) modo III (Richard y Sander, 2012). .....	6
Figura 3: evolución de la longitud de grieta frente al número de ciclos (Moreno Morales, 2002). .....	7
Figura 4: gráfica de representación de un ensayo con un coeficiente de tensión R constante (Richard y Sander, 2012). .....	9
Figura 5: gráfica de representación de gráfica de representación de un ensayo con una intensidad de tensión máxima constante (Richard y Sander, 2012). .....	10
Figura 6: gráfica de representación de las cargas y el crecimiento de grieta durante un ensayo para determinar la curva da/dn (Richard y Sander, 2012). .....	11
Figura 7: gráfica de representación de las distintas regiones de la velocidad de crecimiento de grieta (Richard y Sander, 2012). .....	12
Figura 8: gráfica de representación del ensayo para determinar la K crítica, Crecimiento de grieta frente a la fuerza ejercida, la grieta no debe desviarse más de un 5% del plano de formación de grieta inicial («ASTM E399 - 12: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K <sub>Ic</sub> of Metallic Materials», 2012) .....	13
Figura 9: esquema de la galga y la instalación sobre la probeta («ASTM E1820 - 20: Test Method for Measurement of Fracture Toughness», 2020) .....	15
Figura 10: patente de estereolitografía 1986 (Hull, 1984). .....	18
Figura 11: a) patente de FDM (Crump, 1989) , b) patente de LOM (Feygin et al., 1992) , c) patente de SGC (Arndt, Lyon y Zguris, 2017). .....	18
Figura 12: imagen de Wire Arc Additive Manufacturing (Singh y Singh, 2022). .....	19
Figura 13: esquema del mecanismo de sinterizado en estado sólido en procesos PBF (Singh y Singh, 2022). .....	20
Figura 14: proceso de impresión en metal con la tecnología ADAM («Sistema Metal X», 2024). .....	21
Figura 15: máquinas del sistema Metal X, de izquierda a derecha: horno de sinterizado Sinter-2, impresora Metal X y máquina de lavado Wash-1 («Sistema Metal X», 2024) .....	22
Figura 16: probeta de ensayo de tracción antes del ensayo («ISO 6892-1: Materiales metálicos ensayos de tracción Parte 1: método de ensayo a temperatura ambiente», 2020). .....	29
Figura 17: probeta de ensayo de tracción diseñada en SOLIDWORKS. ....	29
Figura 18: probeta de ensayo de tracción exportada al software Eiger, formato .STL. ....	30
Figura 19: modelado de la impresión de la probeta de ensayo de tracción en el software Eiger. ....	30
Figura 20: probeta de ensayo de tracción exportada al software Eiger, formato .STL, mayor tiempo de impresión debido al raft. ....	31
Figura 21: modelado de la impresión de la probeta de ensayo de tracción con un raft para apoyarse en el software Eiger. ....	31
Figura 22: imágenes de las probetas de tracción previas al ensayo A) probetas A, B, D B) probeta D. ...	31
Figura 23: diseño de probeta CT según la norma ASTM E-647 («ASTM 647: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates», 2005). .....	32
Figura 24: probeta CT diseñada en SOLIDWORKS. ....	32
Figura 25: probeta CT exportadas a Eiger y simulación de impresión de la probeta: a) $\alpha=90^\circ$ con raft y soportes, b) $\alpha=90^\circ$ alt, c) $\alpha=0^\circ$ con raft y soportes. ....	33
Figura 26: imágenes de a) Laboton-3, b) Citopress-1. ....	35
Figura 27: imágenes de a) Labpol-21, b) Tegrapol-11. ....	36
Figura 28: imágenes de a) probeta CT cortada para ser preparada, b) probetas encapsuladas. ....	36
Figura 29: nomenclatura de las medidas de la probeta. ....	37
Figura 30: imágenes de máquina de ensayo de tracción uniaxial MTS Insight 300KN Standard Length. 38	
Figura 31: 1 fuente de luz, 2 máquina de ensayos de fatiga, 3 cámara, 4 ordenador con tarjeta de adquisición de datos de la máquina de ensayos. ....	40
Figura 32: proceso de apertura de grieta durante el ensayo de fatiga. ....	41
Figura 33: captura de pantalla del primer ensayo de fatiga tomada con el software ShareX. ....	42

<i>Figura 34: captura de pantalla del ensayo de fatiga tomada con la aplicación desarrollada.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 35: a)interfaz inicial al ejecutar el programa, b)se introduce la ruta de la carpeta directamente en la interfaz o se puede navegar hasta el lugar donde se vayan a almacenar. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 36: a) interfaz del programa con todos los parámetros introducidos, b)una vez puestos los parámetros al pulsar comenzar se realizarán las capturas y al pulsar detener se detendrán y se reiniciarán los recuentos. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 37: imágenes del crecimiento de grieta a lo largo del ensayo , a) inicio de grieta ,b) crecimiento estable y c) inicio de la inestabilidad. ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 38: captura de pantalla antes y después del recorte. ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 39: a) imagen del ensayo de fatiga binarizada, b) imagen binarizada medida a través de python, c) imagen binarizada eliminando elementos de 1 píxel y d) imagen binarizada y procesada con un filtro gaussiano con <math>\sigma=1</math>.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 40: a) representación de todos los contornos medidos en una de las imágenes; b, c, d y e) seguimiento de la grieta a través de la división de la grieta en un mosaico. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 41: comparativa de los resultados de los ensayos de tracción de las probetas A, B, C y D. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 42: representación de los cálculos del módulo y límite elástico de las probetas A, B, C y D. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 43: resultados del ensayo de tracción a) probeta en la máquina de ensayo tras la prueba, b) y c) detalle de las superficies de la zona de rotura. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 44: imagen de la probeta de tracción a través del microscopio, 50 aumentos.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 45: representación del tamaño de grieta en milímetros. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 46: representación de la velocidad del tamaño de grieta da. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 47: curva da/dN.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 48: fotografías del resultado final del ensayo de fatiga, probeta con ángulo de 90°. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 49: micrografía de la probeta de fatiga, aquí se pueden ver claramente las capas formadas por el filamento metálico y hay algo de separación entre ellas.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 50: micrografía de la probeta de fatiga, se puede ver la distribución, bastante uniforme, de defectos sobre la superficie preparada.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 51: vistas de la porosidad del centro de la probeta de tracción con aumentos de x5, x20, x50 y x100.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 52: micrografías binarizadas con aumentos de x5, x20, x50 y x100.....</i>	<i>63</i>



## Índice de tablas

<i>Tabla 1: características de la máquina de impresión Metal X («Sistema Metal X», 2024).....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2: características de la lavadora Wash-2 del sistema Metal X («Sistema Metal X», 2024).....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3: características del horno de sinterizado Sinter-1 del sistema Metal X («Hoja informativa de materiales metálicos: D2 Acero para herramientas», 2024).....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 4: Composición química en porcentaje en peso del acero para herramientas D2 de Markforged («Hoja informativa de materiales metálicos: D2 Acero para herramientas», 2024).....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 5: Propiedades mecánicas de los distintos aceros D2 («Hoja informativa de materiales metálicos: D2 Acero para herramientas», 2024).....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 6: propiedades de la impresión de las piezas de eiger.io.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 7: mediciones tomadas con pie de rey de las probetas de tracción.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 8: mediciones tomadas con pie de rey de las probetas de fatiga.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 9: tabla de resultados obtenidos de la máquina de ensayos de tracción.....</i>	<i>54</i>



# 1. Objetivos y justificación

El objetivo de este proyecto es el desarrollo e implementación de un software capaz de recopilar información sobre los ensayos de fatiga y la caracterización de las propiedades mecánicas de piezas fabricadas con acero D2 mediante fabricación aditiva a través de los programas desarrollados. La fabricación aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, ha transformado significativamente la producción de componentes metálicos, ofreciendo ventajas notables en términos de diseño y eficiencia de material. Sin embargo, la resistencia a la fatiga de los materiales fabricados mediante este método aún no está completamente testada.

El acero D2 es ampliamente utilizado en aplicaciones que requieren alta resistencia al desgaste y dureza, como herramientas de corte y moldes. Evaluar su comportamiento bajo condiciones de fatiga es crucial para garantizar la fiabilidad y durabilidad de los componentes fabricados.

Para llevar a cabo este estudio es necesario un software para la medida de la grieta, en este caso debido a que no se contaba con uno se ha desarrollado un software específico para la captura de imágenes durante los ensayos de fatiga y otro para la medición de las grietas procesando estas imágenes. Este software permite una medición continua del crecimiento de grietas en las probetas, proporcionando datos para ser utilizados en la mejora de los procesos de fabricación aditiva. La capacidad de medir y analizar el crecimiento de grietas es esencial para comprender mejor los mecanismos de fallo y optimizar el diseño de los componentes.

Además, durante el desarrollo de este proyecto, se ha identificado las necesidades de establecer propiedades específicas que los fabricantes de equipos de fabricación aditiva no proporcionan y comprobación de las características mecánicas.

Con este trabajo se busca aportar al conocimiento científico y tecnológico en el campo de la ingeniería de materiales y la fabricación aditiva, ofreciendo nuevas perspectivas para la utilización de estos procesos y garantizando la durabilidad y fiabilidad de los componentes fabricados y desarrollando una aplicación para el estudio de estas con un coste reducido.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## 2. Marco de referencia

### 2.1. Ensayo de fatiga

Las normas ASTM definen la fatiga como: “Término general usado para describir el comportamiento de materiales sometidos a ciclos repetidos de tensión o deformación que ocasionan un deterioro del material que lleva a una fractura progresiva”. Las fracturas que resultan de la fatiga están entre las más difíciles de prever debido a la dificultad de reconocer las condiciones que las producen. La fatiga puede ocurrir a tensiones dentro del rango elástico; a veces ocurre bajo cargas intermitentes que a primera vista no parecen haberse repetido un número suficiente de veces como para causar fatiga («ASTM 647: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates», 2005).

La principal causa de fatiga son las no homogeneidades de los materiales, todos los materiales tienen imperfecciones que bajo cargas repetidas van amplificando los efectos de estas no homogeneidades. Aunque los mecanismos de fatiga involucrados pueden variar según el material estudiado, diferenciando metales y aleaciones, materiales compuestos, polímeros, etcétera.

Los fallos de mástiles y velas en barcos que realizaban travesías largas se referían como fenómeno de fatiga. Con la llegada de la revolución industrial este fenómeno se hizo más común y de crucial importancia, ya que con el cambio de equipamiento los esfuerzos a los que se sometían las herramientas dejaron de ser estáticos a ser cíclicos (Silva Ribeiro et al., 2010).

En 1837 se publican los primeros resultados de un test de fatiga, donde W. Albert empleó una máquina diseñada para el ensayo de cadenas para el transporte en minas (Schlitz, 1996).

Con el desarrollo de la metalurgia para uso en estructuras y maquinaria los fallos por fatiga empezaron a ser mayores y más frecuentes, en 1842 debido a una serie de accidentes el análisis sistemático de fatiga comienza con el estudio del fallo catastrófico de los ejes de los ferrocarriles. Fue en este momento cuando se introdujo la palabra fatiga para la descripción de fallos producidos por la repetición de una carga. Rankine en ese



año da a conocer que las áreas de concentración de esfuerzos son donde hay una mayor probabilidad de aparición del fallo (Moreno Morales, 2002).

En 1850 August Wöhler realiza pruebas sobre ejes de ferrocarril sometidos a esfuerzos axiales, de torsión y flexión. En estos experimentos utiliza diagramas S-N, esfuerzo frente a número de ciclos, demostrando como con diferentes amplitudes de esfuerzo la vida de la pieza variaba, introduciendo el concepto de “límite de resistencia”. También concluyó que el rango de esfuerzo cíclico es más importante que el esfuerzo máximo, y que por debajo de ciertas tensiones la vida de la pieza era infinita además la vida de estas se reduce drásticamente en presencia de muescas o irregularidades. También propuso un factor de seguridad de 2 para esfuerzos estáticos y de 4 para los dinámicos. Más adelante, en 1870, Wöhler también mencionaba la propagación de la grieta en uno de sus artículos sobre los ejes del ferrocarril.

Los diagramas S-N inicialmente se presentaron como tablas, hasta que el sucesor de Wöhler las representó como curvas y pasaron a llamarse curvas de Wöhler en 1936.

En 1886, Bauschinger demostró que la resistencia a la tracción o compresión se reducía después de aplicar una carga de signo opuesto que causaba deformación inelástica. Esto fue precursor de la comprensión de la ablandamiento y endurecimiento cíclicos de los metales.

A principios del siglo XX Ewing y Humfrey observaron las llamadas líneas y bandas de deslizamiento en especímenes de ensayos de fatiga torsional mediante microscopio óptico, lo que descartó la teoría de la cristalización en el metal debido a las vibraciones. A partir de este momento se incrementa el número de publicaciones metalúrgicas sobre los ensayos de fatiga.

A partir de este momento el desarrollo de los ensayos, maquinaria y medición han mejorado en gran medida, permitiendo una mejora en el cálculo de la vida a fatiga y una mayor fiabilidad de estos resultados.

### 2.1.1. Grietas y modos de fractura

Las grietas son separaciones locales del material de una estructura (Richard y Sander, 2012). Estas separaciones materiales alteran el flujo de fuerza en el componente. El flujo

de fuerza es redirigido bruscamente y aparece un campo de tensión singular local en el área de la grieta. punta o el frente de la grieta. La figura 1b, muestra la perturbación del flujo de fuerza por grietas en comparación con un componente sin grietas, Fig. 1a.

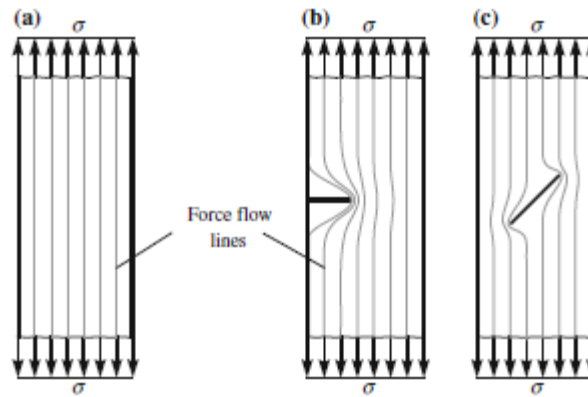


Figura 1: desviaciones en los flujos de fuerzas a través de una grieta a) Flujo sin grieta, b) Flujo con una grieta en el borde de la pieza, c) Flujo con una grieta interna (Richard y Sander, 2012).

El flujo de fuerzas se define como la transmisión de fuerzas o tensiones a través de un componente. Las líneas de flujo de fuerza también pueden entenderse como líneas de nivel de tensión. Donde las líneas de flujo de fuerza están fuertemente redireccionadas y se encuentran cerca unas de otras son las zonas de concentración de estrés.

Una placa sometida a tensión sin defectos ni grietas tiene un flujo de fuerza completamente inalterado, Fig. 1a. En un componente con una grieta en el borde, las líneas de flujo de fuerza están muy desviadas y comprimidas debido a la grieta, Fig. 1b. En la punta de la grieta surge una concentración de tensión de tensiones infinitamente altas, puramente teóricas. La Figura 1c muestra la trayectoria del flujo de fuerza de un componente con una grieta interna inclinada. La transmisión de fuerza a través del componente se ha visto nuevamente alterada considerablemente. Sin embargo, a diferencia del flujo de fuerza en la Fig. 1b, la trayectoria del flujo de fuerza ahora es asimétrica con respecto a la grieta. Las diferentes grietas concentran los esfuerzos de manera diferente en la Fig. 1b que en la Fig. 1c.

Debido a la simplicidad de la geometría de las grietas (en la mecánica de fracturas, las grietas se consideran una sección matemática), solo existen tres tipos básicos de carga de grietas (modos de carga) para todas las grietas que aparecen en componentes y estructuras.

- Modo I

El primer modo de carga de grieta contempla todas las cargas normales que causan la apertura de la grieta, Fig. 2a, en este caso las paredes de la grieta se mueven simétricamente con respecto al plano de crecimiento de grieta. Existe un estado puro de tensión de modo I cuando hay una trayectoria de flujo de fuerza simétrica con respecto al plano de la grieta. Fig. 1b. Dado que el crecimiento extendido de grietas por fatiga se produce bajo la influencia de la tensión normal, las grietas cuya dirección de carga no cambia en el proceso de agrietamiento generalmente se encuentran en un estado de carga de modo I.

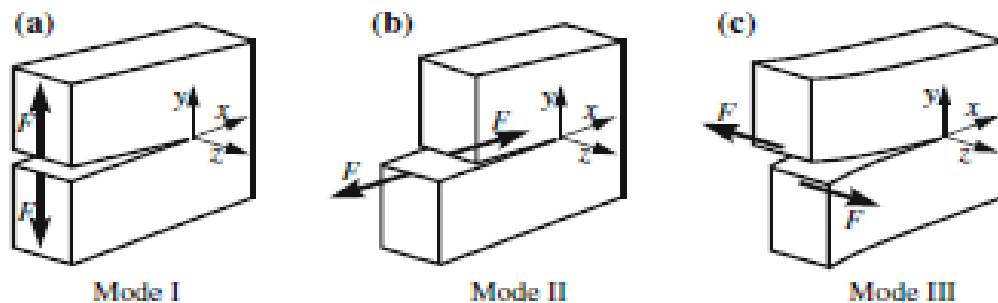


Figura 2: representación de los modos de apertura de grieta a) modo I, b) modo II, c) modo III (Richard y Sander, 2012).

- Modo II

El modo II, Fig. 2b, está asociado a todas las tensiones de corte que generan un deslizamiento opuesto de las superficies de la grieta en la dirección de la grieta, Fig. 2a. Este es el caso, por ejemplo, en componentes que están, ya sea global o localmente, bajo la influencia de una carga de corte plana.

- Modo III

El modo III corresponde al estado de esfuerzo cortante no plano, que hace que las superficies de la grieta se muevan una contra la otra en un ángulo recto con respecto a la dirección de la grieta, es decir, en la dirección del frente de la grieta, Fig. 2c. La carga del modo III se puede encontrar, por ejemplo, en ejes cargados por torsión cuando la grieta se encuentra en un plano que es perpendicular al eje del eje.

Estas tipologías de carga descritas también pueden darse de manera simultánea, dando lugar a cargas mixtas.

### 2.1.2. Caracterización del crecimiento de grieta

La velocidad de crecimiento de grietas sometidas a cargas cíclicas de amplitud constante se expresa en incrementos de longitud de grieta por ciclo,  $da/dN$ . Para diferentes condiciones de carga los valores de  $da/dN$ , tasa de crecimiento de grieta por ciclo, se determina experimentalmente a partir de cambios de longitud de grieta después de cierto número de ciclos. La velocidad de crecimiento de grieta aumenta con el número de ciclos si las tensiones aplicadas se mantienen con constantes (Moreno Morales, 2002).

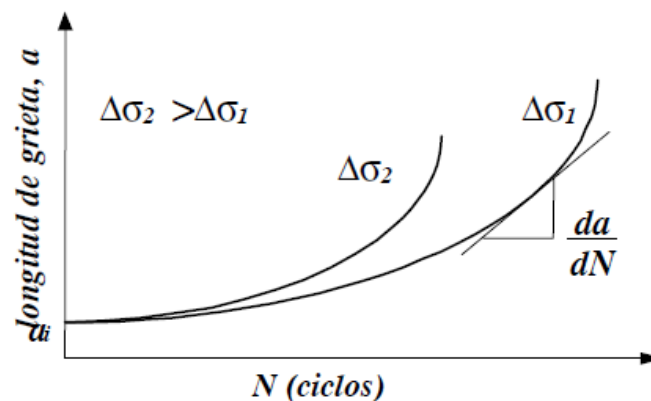


Figura 3: evolución de la longitud de grieta frente al número de ciclos (Moreno Morales, 2002).

Uno de los objetivos de las filosofías de diseño basadas en la fatiga es caracterizar de manera fiable la velocidad de crecimiento de las grietas, eligiendo adecuadamente parámetros que describan con mayor fidelidad la resistencia inherente del material al crecimiento de grieta para los diferentes factores de aplicación de las tensiones, como la geometría y la carga. Muchos estudios en los años 60 llevan a la caracterización de esta velocidad con la ecuación  $\frac{da}{dN} = C \cdot a = C (\Delta\sigma)^m a^n$ ; donde  $C$ ,  $m$  y  $n$  son constantes determinadas experimentalmente (Richard y Sander, 2012).

#### Región I

La propagación de grietas es causada principalmente por procesos de fractura no continuos, donde el aumento en la longitud de la grieta en un ciclo es inferior a  $10^{-6}$  mm/ciclo. La tasa de crecimiento se acelera significativamente cuando  $\Delta K$  es baja, lo que

indica la presencia de un rango de factor de intensidad de tensión umbral  $\Delta K_{th}$  por debajo del cual la grieta no crece o su tasa de crecimiento es casi inapreciable.

Para determinar el Umbral  $\Delta K_{th}$  según la norma ASTM E647, la probeta se somete a cargas en el rango de generación de grietas o superior. La velocidad de crecimiento de grieta se ralentiza cada vez más a medida que se reduce cada vez más la amplitud de la carga. Al principio la grieta crece relativamente rápido, al final del ensayo el crecimiento de grieta se ralentiza cada vez más hasta que la grieta se detiene o al menos se alcanza una velocidad de grieta  $da/dN$  de  $10^{-7}$  mm/ciclo. Cuando se alcanza este punto, se puede determinar el  $\Delta K_{th}$ . Con este método se puede determinar el umbral  $\Delta K_{th}$  (fase I) y la recta de Paris (fase II).

#### Ensayo con una relación de tensión R constante

Con los métodos con coeficiente de tensión constante, las tensiones máxima y mínima se reducen para disminuir la tensión por ciclo (Fig. 4). La norma ASTM E647 permite realizar tanto una reducción escalonada como una reducción continua. En el caso de una reducción escalonada, las fuerzas (P) son constantes dentro de un incremento. Esto provoca un aumento a corto plazo de la intensidad de tensión por la grieta creciente, hasta que la carga se reduce de nuevo. De este modo, según la norma ASTM E647, la altura del escalón no debe superar el 10% de la carga superior o la anchura de los escalones debe ser de al menos 0,5 mm.

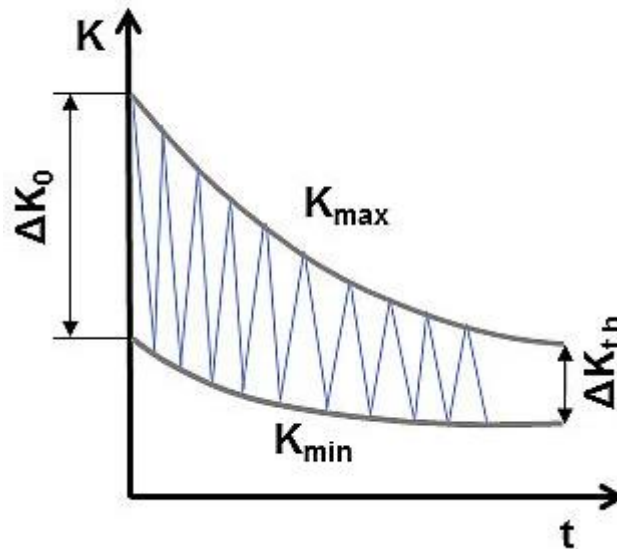


Figura 4: gráfica de representación de un ensayo con un coeficiente de tensión  $R$  constante (Richard y Sander, 2012).

#### Ensayo con una intensidad de tensión máxima constante

Además de los métodos en los que la relación  $R$  se mantiene constante, en la norma ASTM E647 se permite un método con un factor de intensidad de tensión máxima constante. En este método para la determinación del umbral, partiendo de un factor de intensidad de tensión cíclicas alto, la intensidad de tensión mínima aumenta continuamente hasta alcanzar el umbral (Fig. 5).

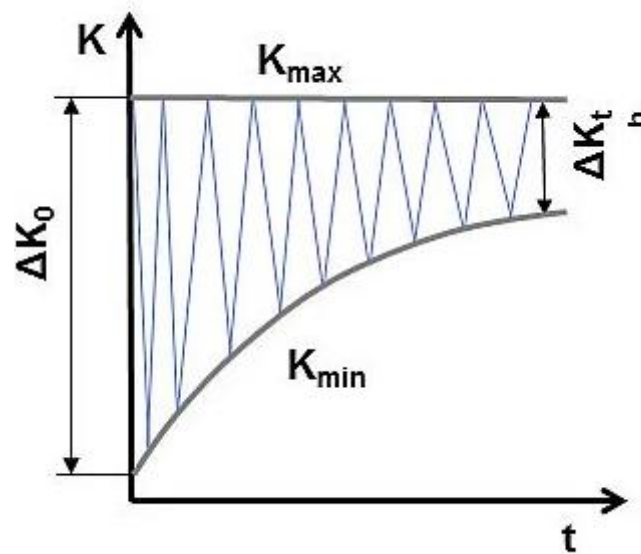


Figura 5: gráfica de representación de un ensayo con una intensidad de tensión máxima constante (Richard y Sander, 2012).

## Región II

La variación es prácticamente lineal y corresponde al área que puede ajustarse fácilmente según la ley de París. Esta expresión no considera el impacto de la tensión media y el comportamiento de las curvas para valores extremos de  $\Delta K$ . Como resultado, esta ley es más adecuada para casos con  $\Delta K$  medio, pero puede presentar algunas variaciones en los extremos de la curva.

## Crecimiento de grieta $da/dN$ según ASTM E647 (fase II)

Para poder determinar el crecimiento de grieta estable  $da/dN$  según la norma ASTM E647 manteniendo la amplitud de carga, se mantienen constantes la  $F_{m\acute{a}x.}$  y  $F_{m\acute{i}n.}$  durante todo el ensayo (fig. 6). Debido a la disminución de la sección transversal de carga y, por tanto, al aumento de la intensidad de la tensión en el pico de la grieta, se acelera la propagación de la grieta.

Con este análisis, se puede determinar la curva general de crecimiento de grieta (fase II) y la recta de París. No se puede determinar el umbral  $\Delta K_{th}$ .

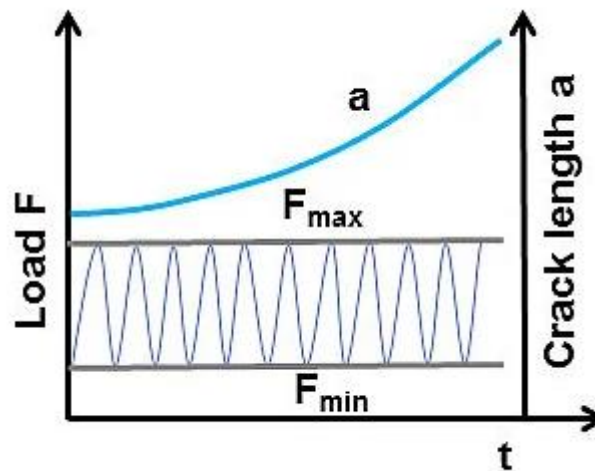


Figura 6: gráfica de representación de las cargas y el crecimiento de grieta durante un ensayo para determinar la curva  $da/dn$  (Richard y Sander, 2012).

La relación conocida como ley de Paris,  $\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$ , representa una variación lineal entre el  $\log da/dN$  y  $\log \Delta K$ , que se corresponde con el crecimiento estable de la grieta solamente en una parte de la curva total de resistencia al crecimiento del material, para el rango intermedio de valores de  $\Delta K$ . Este valor  $\Delta K$  es el factor de intensidad del estrés, que sirve para la predicción de la propagación de la grieta, y que en este caso se calcula como  $\Delta K = K_{MAX} - K_{min}$  siendo estos los valores máximos y mínimos de tensión durante un ciclo, el factor  $\Delta K$  se puede expresar como  $K_{MAX} - K_{min} = K_{MAX} \cdot (1 - R)$ .  $C$  es una constante del material obtenida experimentalmente y depende de temperatura y propiedades mecánicas del material y  $m$  es el exponente del material, que indica cómo se comporta con respecto a  $\Delta K$ .

Para valores extremos de  $\Delta K$ , tanto por encima de ese rango intermedio como por debajo, la velocidad de crecimiento aumenta rápidamente con el valor de  $\Delta K$ . Para la mayoría de los materiales, la variación de  $da/dN$  frente a  $\Delta K$  exhibe un comportamiento como el que se representa en la figura 10 en escala logarítmica. En la figura 10 pueden identificarse tres zonas o regímenes distintos de crecimiento: la región I o régimen próximo al umbral, la región II o intermedia, donde se encuentra la línea de Paris y la región III de rápida propagación de la grieta (fig. 7).

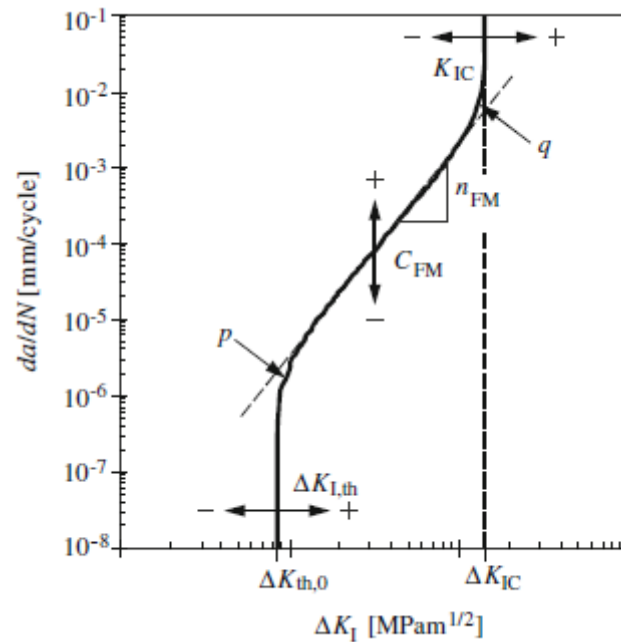


Figura 7: gráfica de representación de las distintas regiones de la velocidad de crecimiento de grieta (Richard y Sander, 2012).

### Región III

En la zona III correspondiente a altos valores de  $\Delta K$  la velocidad de crecimiento aumenta rápidamente causando la fractura total del componente. Esta se produce cuando el valor máximo del factor de intensidad de tensiones ( $K_{max}$ ) alcanza un cierto valor crítico  $K_C$ . En deformación plana dicho valor crítico  $K_{IC}$ , denominado tenacidad a fractura, es una característica del material y representa el máximo factor de intensidad de tensiones que una grieta puede soportar bajo carga estática antes de propagarse inestablemente.

En la zona de valores altos para  $\Delta K$ , la velocidad de crecimiento aumenta rápidamente, provocando la fractura completa del componente. Esto sucede cuando el valor más alto del factor de intensidad de estrés ( $K_{max}$ ) alcanza un umbral crítico conocido como  $K_C$ . En deformación plana, el valor crítico  $K_{IC}$ , tenacidad a la fractura, es una propiedad del material e indica el factor de intensidad de tensión máximo que una grieta puede soportar sin mayor propagación en condiciones de carga estática.

ASTM E399 Fase III de la curva de crecimiento de grietas

La norma ASTM E399 para la determinación del factor crítico de intensidad de tensión K<sub>1C</sub> se ocupa de la fase III de la curva de crecimiento de grieta.

El K<sub>1C</sub> se determina normalmente en materiales frágiles. En primer lugar, se genera una grieta definida en la probeta por oscilación de acuerdo con ASTM E399. 2,5% antes de alcanzar la longitud de grieta definida, la intensidad de la tensión se reduce.

En el siguiente paso, estira la probeta de forma constante hasta la fractura y se alcanza el valor K<sub>Q</sub>. Después del ensayo, el valor K<sub>Q</sub> determinado se establece una relación entre el ancho de la probeta, la longitud de la grieta y el límite elástico del material. Si esta relación cumple el criterio mínimo de validez definido en la norma, se declara K<sub>Q</sub> como valor K<sub>1C</sub> válido.

El crecimiento de grieta se determina con un transductor de propagación de grietas adecuado y con el método de cálculo de cumplimiento.

Además de las probetas compactas (CT) muy comunes, también pueden utilizarse probetas de flexión (SEB) para determinar la intensidad de tensión crítica K<sub>1C</sub> (fig. 8).

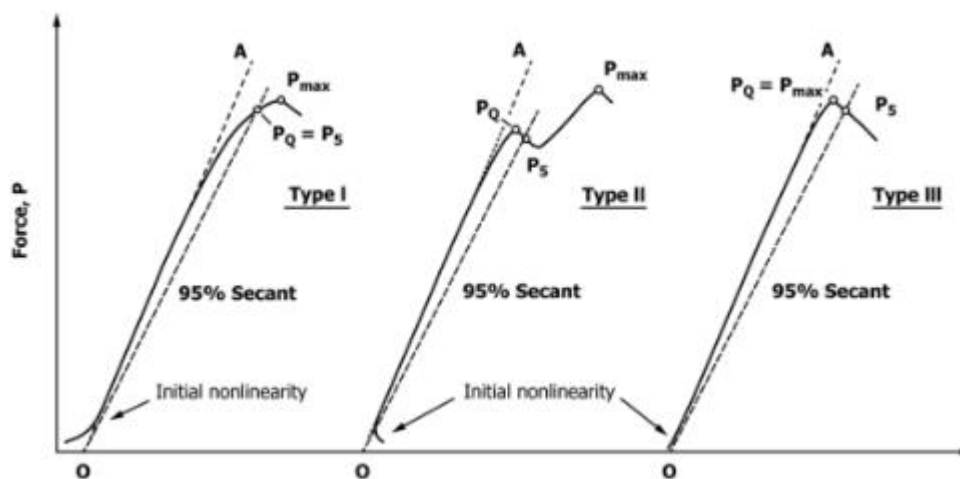


Figura 8: gráfica de representación del ensayo para determinar la K crítica, Crecimiento de grieta frente a la fuerza ejercida, la grieta no debe desviarse más de un 5% del plano de formación de grieta inicial («ASTM E399 - 12: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K<sub>1C</sub> of Metallic Materials», 2012) .

Es de gran interés para la ingeniería de materiales el definir las características de los materiales cuando son utilizados en procesos de fabricación aditiva, ya que estos procesos son muy versátiles y son muy ventajosos frente a la fabricación tradicional según su

aplicación. La fabricación aditiva es sensible a los cambios de los parámetros de impresión, lo que también se traduce en un aumento o disminución de los defectos entre capas de impresión, lo que altera las propiedades mecánicas y que podrían reducir la vida útil de las piezas comparando con la fabricación tradicional.

### 2.1.3. Obtención de datos

El ensayo de fatiga en probetas Compact Tension (CT) es fundamental en la evaluación de la resistencia y durabilidad de materiales bajo cargas cíclicas. Este tipo de ensayo permite estudiar el crecimiento de grietas y predecir la vida útil de materiales en aplicaciones críticas. En los ensayos de fatiga, es crucial obtener datos precisos y fiables que permitan interpretar correctamente el comportamiento de los materiales. A continuación, se describen las técnicas más relevantes para la obtención de datos en ensayos de fatiga de probetas CT, abarcando métodos visuales, sensores de galgas extensométricas y mediciones basadas en el potencial eléctrico.

#### Medición Visual

La medición visual del crecimiento de grietas es una técnica común en ensayos de fatiga. Consiste en la monitorización de manera continua o periódica de la zona de grieta en la probeta CT mediante cámaras de alta resolución. Este enfoque presenta las siguientes características y ventajas:

Las cámaras de alta resolución y velocidad permiten observar y capturar imágenes detalladas del crecimiento de grietas. Este proceso es complementado por algoritmos de procesamiento de imágenes y herramientas como el Análisis Digital de Correlación de Imágenes (DIC), que permite calcular las deformaciones superficiales y visualizar las zonas de concentración de esfuerzos. Este método es particularmente útil para caracterizar el crecimiento de grietas y las deformaciones en áreas próximas. La norma ASTM 647 tiene secciones donde se detallan las pautas para la medida de las tasas de crecimiento de grieta.

La precisión de la medición visual depende de la resolución de las imágenes y de la visibilidad de la grieta, por lo cual puede ser necesario detener el ensayo para ajustar la captura de imágenes o la iluminación si fuese necesario.

## Medición con Galgas Extensométricas

El uso de galgas extensométricas es otra técnica utilizada en ensayos de fatiga para medir deformaciones y detectar el crecimiento de grietas en la probeta CT. En combinación con el conocimiento las características mecánicas del material, las galgas permiten un análisis detallado de los cambios en la estructura de la probeta:

Se colocan galgas cercanas a la grieta una vez esta se ha iniciado (fig. 9) y es estable para medir las deformaciones locales. A medida que la grieta crece, la deformación medida por la galga cambia, permitiendo así estimar el avance de la grieta. Al conocer el módulo de elasticidad del material, es posible interpretar los datos de deformación en términos de esfuerzos, esto se describe en detalle en la norma ASTM 1820. Esto es particularmente útil para materiales metálicos donde el módulo de elasticidad es constante a través de la vida útil hasta la falla.

Aunque las galgas ofrecen datos precisos en el punto de medición, no da una imagen completa de la distribución de deformaciones en la probeta. Adicionalmente, la instalación de galgas en probetas sometidas a ciclos de fatiga puede ser compleja y requiere una preparación minuciosa para asegurar la adherencia y precisión de los datos.

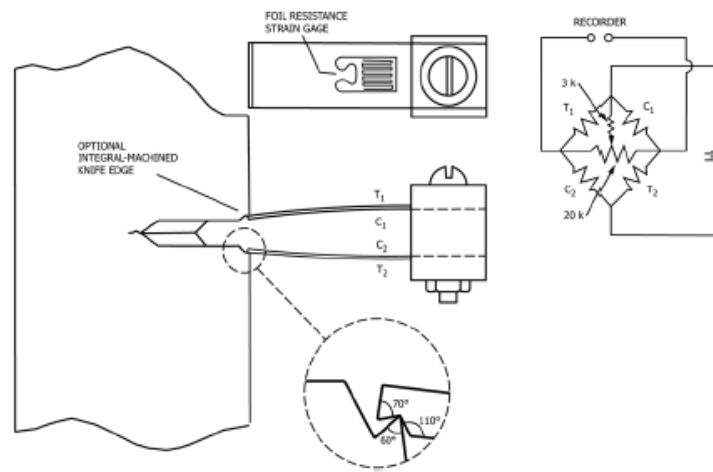


Figura 9: esquema de la galga y la instalación sobre la probeta («ASTM E1820 - 20: Test Method for Measurement of Fracture Toughness», 2020)

## Medición de Diferencia de Potencial en la Probeta

La medición de la diferencia de potencial eléctrico (DCP) es una técnica moderna y no invasiva para monitorizar el crecimiento de grietas durante ensayos de fatiga. Este



método se basa en la relación entre la resistencia eléctrica de la probeta y el crecimiento de grietas, permitiendo obtener datos continuos sin necesidad de interferir físicamente en la muestra.

A medida que se desarrolla la grieta, cambia la geometría de la probeta y, por tanto, su resistencia eléctrica. La medición de DCP en distintos puntos permite detectar la propagación de la grieta a través de la variación en el potencial eléctrico.

Es un método efectivo para detectar grietas incluso en etapas tempranas, proporcionando una forma indirecta de medir el crecimiento de grietas sin contacto directo. Esta técnica es ideal para ensayos de larga duración en los que se busca minimizar las interrupciones en la prueba, aunque la precisión de la medición de DCP depende de varios factores, como la uniformidad del material y las condiciones de contacto eléctrico. Además, se requiere un sistema de calibración adecuado para correlacionar las lecturas de potencial con el avance de la grieta.

## 2.2. Fabricación aditiva

Según la norma ASTM F2792 – 12a la fabricación aditiva se define como el proceso de unir materiales para hacer un objeto desde datos de un modelo 3D, normalmente capa sobre capa, al contrario que las metodologías de fabricación sustractiva (‘ASTM F2792 – 12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies’, 2012).

En los años 60 se llevaron a cabo los primeros intentos de crear objetos sólidos mediante la polimerización por láser de fotopolímeros, una resina inventada por DuPont en los años 50 (Terry Wohlers et al., 2016).

A principios de los años 70 Formigraphic Engine Co. usó el enfoque de utilizar dos láseres para el primer proyecto comercial de fabricación de prototipos por láser, procedimiento llamado mecanizado fotoquímico, generando así objetos 3D con un sistema rudimentario.

A finales de los años 70 también Dynell Electronics Corp. introdujo una serie de patentes sobre fotografía sólida. Este método consistía en el corte de secciones con un taladro o un láser controlado por ordenador y apilar estas secciones para la creación de un objeto 3D.

En 1980 Hideo Kodama es el primero en utilizar la curación de resina con un solo rayo láser, su experimento consistía en la proyección de rayos UV a una resina fotosensible en el que se controlaba la zona de exposición enmascarándose con film blanco y negro. También se discute la posibilidad de utilizar un trazador de rayos UV en ejes x-y con fibra óptica para aplicar en un solo punto los rayos. En sus siguientes artículos sobre la creación de piezas de plástico se describen los elementos clave de la estereolitografía, la formación de capas de fotopolímero curado y la inmersión a la profundidad de la siguiente capa en el polímero sin solidificar.

En agosto de 1984 Charles Hull, cofundador de 3D Systems aplica para la patente (fig. 10) titulada “Aparato para la producción de objetos tridimensionales por estereolitografía”. Según 3D Systems, la estereolitografía “utiliza un láser ultravioleta para curar con precisión secciones transversales de fotopolímeros, convirtiéndolos de líquidos en sólidos. Las piezas se imprimen directamente desde los datos de CAD, capa

por capa, para elaborar prototipos, patrones de microfusión, herramientas y piezas de uso final.”. El uso comercial de la fabricación aditiva comenzó en 1987 con la estereolitografía (Stereolithography, SL).

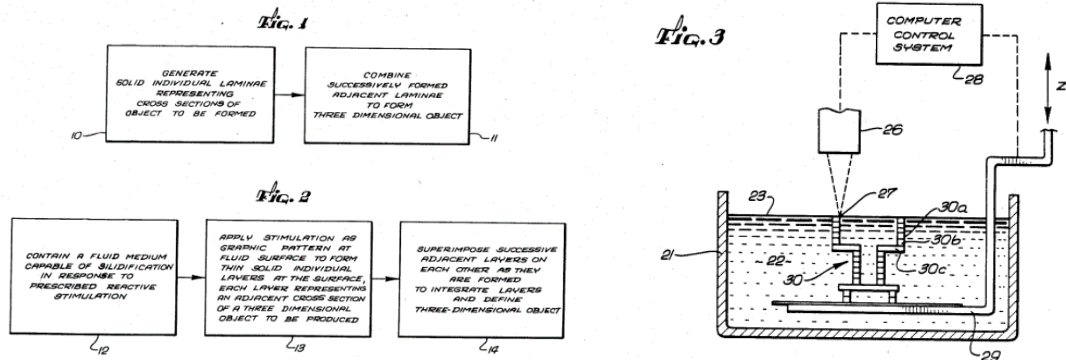


Figura 10: patente de estereolitografía 1986 (Hull, 1984).

En 1991, tres tecnologías de fabricación aditiva fueron introducidas en el mercado: modelado por deposición fundida (Fused Deposition Modelling, FDM), curado de suelo sólido (Solid Ground Curing, SGC) y fabricación de objetos laminados (Laminated Object Manufacturing, LOM). FDM (fig. 11a) extruye un material termoplástico en filamento para producir partes capa por capa. LOM(fig. 11b) corta y adhiere capas de material utilizando un láser guiado digitalmente. Solid Ground Curing (SGC) (fig. 11c) utilizó un polímero líquido sensible a los rayos UV, solidificando por completo capas en una sola pasada inundando de luz ultravioleta a través de máscaras creadas con Tóner electrostático sobre una placa de vidrio. Las empresas responsables de LOM y SGC no tuvieron un gran éxito.

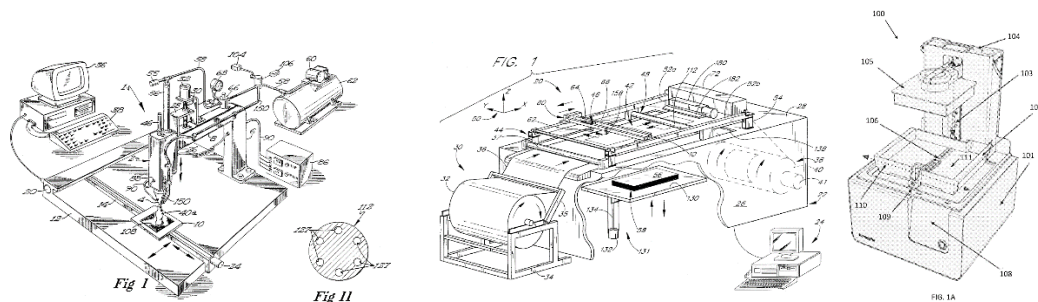


Figura 11: a) patente de FDM (Crump, 1989) , b) patente de LOM (Feygin et al., 1992) , c) patente de SGC (Arndt, Lyon y Zguris, 2017).

La caducidad de la patente de la FDM en 2013 ha llevado a una explosión en la variedad y accesibilidad a las impresoras basadas en la extrusión.

### 2.2.1. Impresión de metales

La fabricación aditiva de metales tiene como factor crucial el punto de fusión de los metales utilizados, por eso las fuentes de calor utilizadas tienden a ser de gran potencia para ser lo más eficientes posible, o en otros casos se tiende al uso de aleaciones con un punto de fusión lo suficientemente bajo (Singh y Singh, 2022).

La primera vez que se empleó la fabricación aditiva con metales fue Mitsubishi en 1971. A través de la soldadura SAW y TIG. Utilizándose técnicas tradicionales de soldadura se depositan unas capas de metal sobre otras, al igual que en la fabricación aditiva que conocemos hoy día. Este sistema también conocido como Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) (fig. 12) tiene la ventaja de que no necesita gran cantidad de material de aporte como la que necesita la fabricación mediante cama de polvo. Con este método de fabricación las piezas son el resultado de fundir el material completamente en una atmósfera inerte, lo que hace que las piezas producidas sean densas. Esta tecnología tiene ya una larga trayectoria comparada con otras, aunque tiene ventajas como la velocidad de deposición los acabados no suelen ser tan buenos y no permite hacer voladizos.

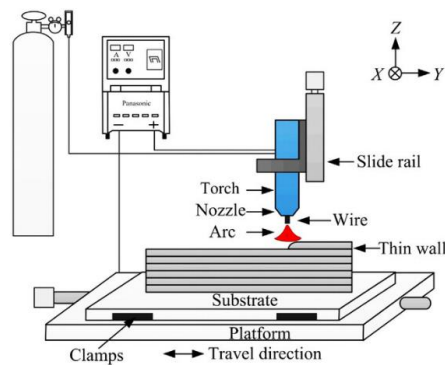


Figura 12: imagen de Wire Arc Additive Manufacturing (Singh y Singh, 2022).

Esta metodología es usada con material de aporte tanto en forma de polvo como de filamento y requieren de una fuente de calor como un láser o un haz de electrones, siendo el haz el método más utilizado debido a que el área de deposición es mayor. Este método también tiene una variante que utiliza la energía cinética, llamado spray en frío, en el que el polvo se proyecta a gran velocidad a través de la boquilla con un gas precalentado y presurizado previamente, y las partículas se unen por los grandes esfuerzos a los que se someten.

El proceso de Powder Bed Fusion (PBF) se desarrolla durante los años 80, y fue una de las primeras tecnologías en comercializarse. Las máquinas de PBF tienen una plataforma que se mueve hacia arriba y abajo, se forma una capa de polvo sobre la plataforma y una fuente de calor pasa sobre las regiones seleccionadas por capas consolidándose hasta formar el diseño. Este sistema puede tener dos fuentes de calor: láser o haz de electrones, el láser utiliza atmósfera inerte y necesita ajustar la velocidad de paso, y el haz necesita vacío. Es más rápido, pero no puede ser utilizado sobre materiales no conductores. Este método puede utilizar tres métodos de unión del polvo: el sinterizado en estado sólido (fig. 13), sinterizado en estado líquido y fusión total, este último el más extendido por tener la mayor capacidad de adhesión.

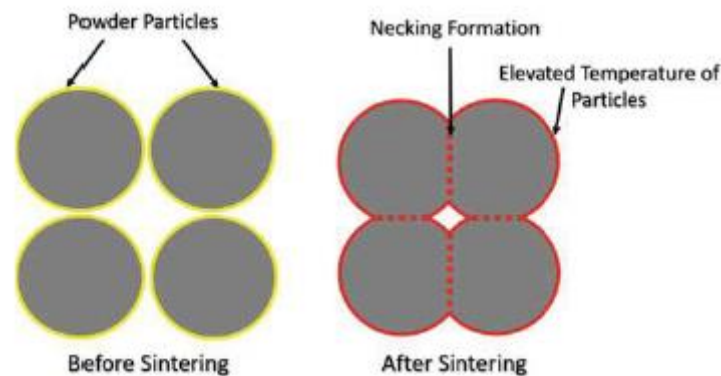


Figura 13: esquema del mecanismo de sinterizado en estado sólido en procesos PBF (Singh y Singh, 2022).

En 1999 se crea la Binder Jetting Technology que funciona a través de la unión de secciones de material definidas por el fileteo del modelo y pegadas mediante un adhesivo. En este caso el adhesivo se vierte sobre la capa de polvo y a continuación con una fuente de calor se curan las partes saturadas con el pegamento para que cobre integridad estructural. Este tipo de impresión requiere de un procesamiento posterior que suele ser más largo que la propia impresión. Este método de impresión admite una gran variedad de materiales para ser impresos y no requiere de una fuente de calor tan potente como las de los procesos descritos anteriormente. Otra ventaja de este método es que la propia cama de polvo sobrante fuera del área curada actúa como soporte para los voladizos de la pieza.

Por último, cabe mencionar el Fused Filament Fabrication (FFF), que en esencia es el sistema ADAM utilizado en la impresora Metal X y que también requiere de un post-procesado.

### 2.2.2. Tecnología ADAM

Las impresoras utilizadas para la fabricación de las probetas emplean la tecnología ADAM, Atomic Difusion Additive Manufacturing. Se trata de un proceso de inicio a fin con tres etapas distintas posteriores al diseño de la pieza, uno de fabricación y otro de procesado de la pieza hasta el producto final (fig. 14).

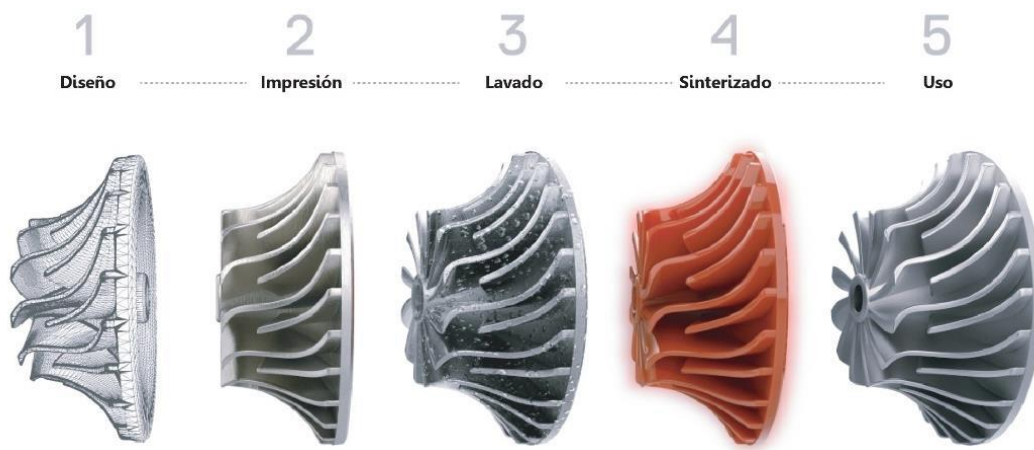


Figura 14: proceso de impresión en metal con la tecnología ADAM («Sistema Metal X», 2024).

En la primera etapa, tras el diseño de la pieza, se fabrica la pieza con el filamento metálico, que contiene las partículas del metal elegido y los aglutinantes para que el filamento conserve la forma. Una vez impresa la pieza se procede con el lavado, donde se le retira la mayor parte de los aglutinantes. En la última fase la pieza pasa por el horno de sinterizado, donde además se terminan de retirar los aditivos del filamento.

La impresora (fig. 15, centro) se alimenta con dos filamentos, por un lado, el filamento metálico y por otro lado el filamento cerámico, el filamento cerámico siendo principalmente para las partes de apoyo de la pieza en caso de que la geometría de la pieza lo requiera.



Figura 15: máquinas del sistema Metal X, de izquierda a derecha: horno de sinterizado Sinter-2, impresora Metal X y máquina de lavado Wash-1 («Sistema Metal X», 2024)

Las principales ventajas de metal x son su bajo coste, versatilidad, facilidad de uso y la seguridad, ya que no emplea polvo metálico, lo que puede suponer un riesgo si no se usa correctamente. La desventaja de esta tecnología es que las piezas impresas no son macizas, aunque las piezas de menor tamaño si se pueden rellenar al completo, aunque no al 100%. En la tabla 1 se presentan las características de la impresora.

Propiedades de la impresora	Proceso	FFF en metal
	Volumen de construcción	300 x 220 x 180 mm
	Tamaño de la impresora	575 x 467 x 1120 mm
	Cámara de impresión	Caliente
	Cama de impresión	Caliente, hoja de impresión sellada al vacío, nivelación automática de la cama
	Sistema de impresión	Dos boquillas (material metálico y material de liberación)
	Geometría de las piezas internas	Relleno de celdas cerradas (triangular) o piezas sólidas
Materiales	Material metálico	Acero inoxidable (17-4 PH), Acero para herramientas (H13, A2, D2), Inconel 625, Cobre
	Material de liberación	Cerámico
	Bobinas	Filamentos de polvo unidos
Propiedades de las piezas	Tamaño máximo de piezas	250 x 183 x 150 mm, 10kg
	Soportes	Material metálico con capas de material cerámico de liberación
	Resolución de la capa Z	50 $\mu\text{m}$ – 125 $\mu\text{m}$ (postsinterización)
Software	Software suministrado	Eiger Cloud (Otras opciones disponibles)

Tabla 1: características de la máquina de impresión Metal X («Sistema Metal X», 2024).

En la segunda etapa se utiliza el equipo de lavado (fig. 15, derecha), en el que se sumergen las piezas en verde en disolvente. La lavadora cuenta con dos cámaras, la primera donde se sumerge la pieza y la segunda donde hay una fase de secado, la pieza debe quedar totalmente seca antes de sacarlas, por lo que el disolvente debe evaporarse por completo. El lavado tiene un ciclo de evaporación-condensación, donde el disolvente en estado líquido se mantiene a temperatura constante para que no se evapore, las bobinas de condensación serán lo que inicie cada ciclo. Hay ciertas pérdidas de disolvente entre ciclos por lo que no se puede almacenar indefinidamente y hay que rellenar el disolvente, pero el ciclo hace que se pueda almacenar durante más tiempo. En la tabla 2 se presentan las características de la lavadora.

Lavadora	Tamaño de la lavadora	609 x 685 x 1067 mm
	Tiempo de lavado	12-72 horas
	Disolvente	Opteon SF-79
	Volumen de trabajo	356 x 254 x 203 mm

Tabla 2: características de la lavadora Wash-2 del sistema Metal X («Sistema Metal X», 2024).

Una vez en la etapa de lavado las piezas en verde se sumergen en el disolvente y se eliminan la mayoría de los aditivos que contiene el filamento para aglutinar el polvo metálico. Las piezas se lavarán según el volumen que tengan, esto viene determinado por el software de la máquina; una vez lavadas y secadas se procederá al pesado de la pieza para comprobar la eliminación del aglutinante y si se necesita otro lavado. Se deben introducir las piezas en el horno lo más limpias posible. En este punto las piezas pasan a denominarse marrones.

En la última fase las piezas se introducen en el horno de sinterizado (fig. 15, izquierda). Donde hay dos etapas para el proceso de sinterizado, una primera donde se eliminan los últimos rastros del aglutinante que no se pueden eliminar con el lavado y la segunda etapa donde se sinteriza la pieza para obtener el producto final. El lavado y sinterizado reducen el tamaño y peso de la pieza debido a la eliminación de material, el

software de Metal X calcula estas variaciones y ajusta el modelo en la impresión para que la pieza final coincida con las especificaciones indicadas inicialmente. En la tabla 3 se presentan las características de capacidad del horno de sinterizado.

Horno de sinterizado	Tamaño del horno de sinterizado	1200 x 700 x 1500 mm
	Tiempo de ejecución	17-31 horas
	Volumen de sinterización	18356 cm <sup>3</sup>
	Temperatura interna máxima	1300°C

Tabla 3: características del horno de sinterizado Sinter-1 del sistema Metal X («Hoja informativa de materiales metálicos: D2 Acero para herramientas», 2024)

El horno de sinterizado tiene está alimentado por una botella de Argón y otra de una mezcla de Argón-Hidrógeno. Con los paneles de control del horno, se puede controlar la presión de los gases dentro del horno. Con la atmósfera inerte las piezas, según el material de fabricación, se someten al tratamiento térmico elegido, estos son los dos parámetros que definen el tiempo que la pieza está en el horno. Tras un ciclo de enfriamiento se podrán retirar las piezas del horno y se podrán quitar los soportes si hubiesen sido necesarios.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



### 3. Fabricación de las probetas

Inicialmente las principales razones para la elección del Acero D2 eran la disponibilidad de material, las propiedades y la falta de bibliografía con respecto al comportamiento en ensayos de fatiga de este material utilizando la fabricación aditiva.

El material utilizado es un acero, por lo que las propiedades mecánicas de este material son ampliamente conocidas y estudiadas, aunque no sea de este tipo en concreto, tiene una resistencia a la tracción similar a la de otros aceros, 210 GPa.

El acero D2 un acero versátil, sus principales usos son las herramientas de trabajo en frío, moldes y matrices de estampado, aunque tiene más usos industriales. Tiene una alta dureza, 60 HRC, después de tratamiento térmico, lo que hace que tenga una baja deformación y dificulta el mecanizado, lo que lo hace un buen candidato para métodos de fabricación no sustractivos. Cuenta con una buena resistencia a la fatiga, por eso se utiliza para aplicaciones con esfuerzos cíclicos. Por último, al ser un acero para herramientas también tiene buena estabilidad dimensional tras los tratamientos térmicos, lo que lo haría un buen candidato para su uso en impresión 3D. Se trata de un acero resistente a la corrosión, aunque no tanto a la oxidación, también tiene una buena resistencia al desgaste, debido al contenido en cromo y carbono. Debido a su dureza los acabados superficiales también resultan costosos de realizar. Dentro de los materiales que provee Markforged para la impresión el acero D2 parece el más interesante debido a sus propiedades mecánicas de resistencia, dureza, durabilidad y dificultad para el mecanizado y el coste de realizar acabados sobre este material, que no serían un problema usando la impresión 3D.

## Acero D2

Composición	Porcentaje
Cromo	11-13 %
Carbono	1,4-1,6 %
Molibdeno	0,7-1,2 %
Vanadio	0,5-1,1 %
Níquel + cobre	Máx. 0,75 %
Manganeso	0,1-0,6 %
Silicio	0,1-0,6 %
Fósforo	Máx. 0,03%
Azufre	Máx. 0,03%
Hierro	bal

Tabla 4: Composición química en porcentaje en peso del acero para herramientas D2 de Markforged («Hoja informativa de materiales metálicos: D2 Acero para herramientas», 2024).

Propiedades mecánicas típicas	Estándar	Markforged tratado térmicamente <sub>1</sub>	Forjado tratado térmicamente <sub>2</sub>
Límite de resistencia a la compresión de 0,2 %	ASTM E9	1690 MPa	2200 MPa
Módulo elástico	ASTM E9	187 GPa	210 GPa
Dureza <sub>3,5</sub>	ASTM E18	55 HRC	62 HRC
Densidad relativa <sub>4</sub>	ASTM B923	97 %	100 %

Tabla 5: Propiedades mecánicas de los distintos aceros D2 («Hoja informativa de materiales metálicos: D2 Acero para herramientas», 2024).

Previo al ensayo de fatiga era necesario realizar un ensayo de tracción para estimar la resistencia a la tracción del acero D2 fabricado por FFF.

Para este ensayo de tracción se ha utilizado la probeta cilíndrica de la norma UNE-EN ISO 6892-1 (fig. 16), debido a la disponibilidad de la máquina de tracción uniaxial y que las mordazas se adaptan mejor a este tipo de perfil. Este tipo de probeta tiene como ventaja sobre la plana que tiene una mejor distribución del esfuerzo por su simetría y a que los esfuerzos de flexión son menores debido a que la probeta facilita el centrado por su geometría. Por último, estas probetas se ven menos afectadas por el acabado superficial, una gran ventaja al usar fabricación aditiva.

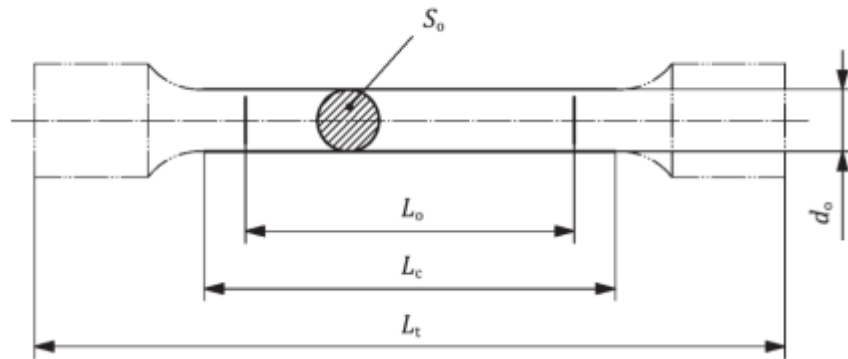


Figura 16: probeta de ensayo de tracción antes del ensayo («ISO 6892-1: Materiales metálicos ensayos de tracción Parte 1: método de ensayo a temperatura ambiente», 2020).

La probeta tiene las especificaciones del anexo D de la norma ISO, con la que se dibuja una sección en SOLIDWORKS3D (fig. 17) para revolucionarla y obtener un objeto tridimensional que a su vez se pasa a formato .STL para poder ser impreso.

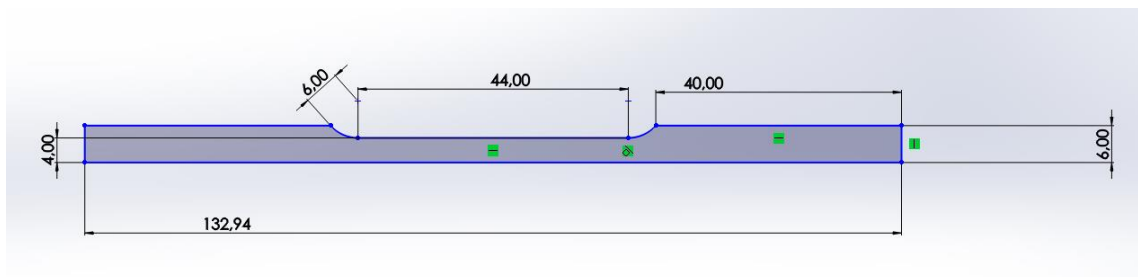


Figura 17: probeta de ensayo de tracción diseñada en SOLIDWORKS.

Una vez modelada la probeta se introduce en el software Eiger para el procesado del modelo previo a la impresión, donde se escala a un tamaño algo mayor, debido a la pérdida de volumen tras lavado y sinterizado de la pieza. En primera instancia se decidió imprimir la pieza sin raft (fig. 18 y 19), que luego se añadió (fig. 20 y 21) para obtener una mejor exactitud dimensional tras la sinterización.

Las probetas de tracción se han fabricado con la dirección de las capas paralela a la dirección de la fuerza del ensayo de tracción, que es la dirección óptima para el ensayo de las propiedades mecánicas. También habría sido de interés la impresión de la probeta con las capas en la dirección normal a la fuerza que se iba a aplicar en el ensayo de tracción para comprobar la anisotropía que resulta de la impresión 3D, sin embargo,

aunque la impresión era posible el horno de sinterizado no es capaz de alojar una pieza tan alta.

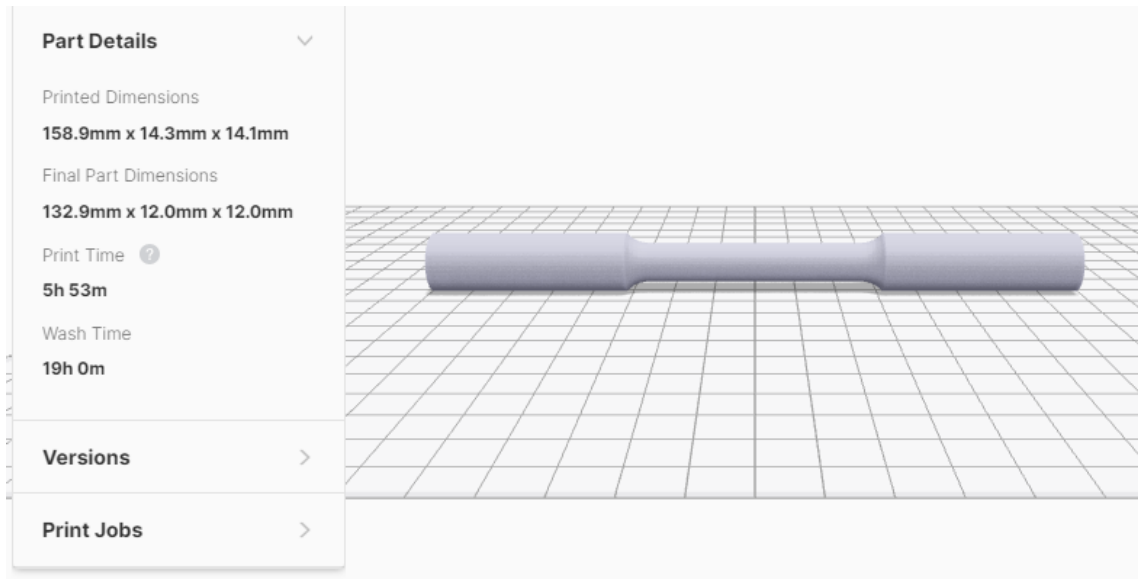


Figura 18: probeta de ensayo de tracción exportada al software Eiger, formato .STL.

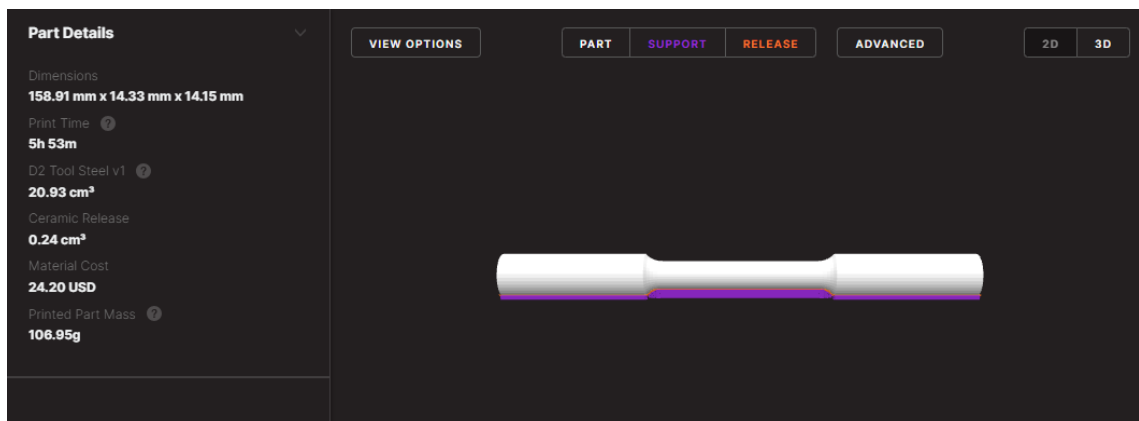


Figura 19: modelado de la impresión de la probeta de ensayo de tracción en el software Eiger.

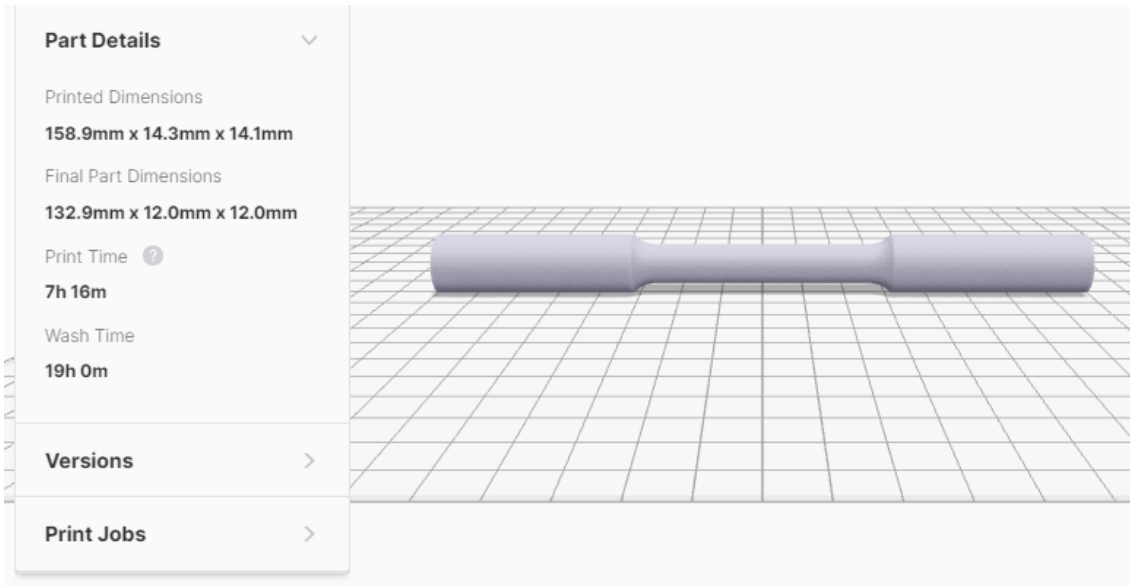


Figura 20: probeta de ensayo de tracción exportada al software Eiger, formato .STL, mayor tiempo de impresión debido al raft.

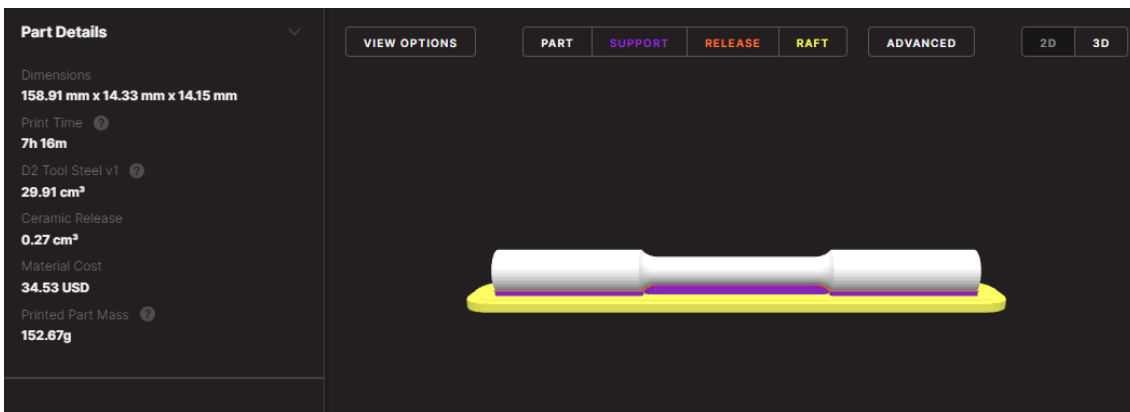


Figura 21: modelado de la impresión de la probeta de ensayo de tracción con un raft para apoyarse en el software Eiger.

Las cuatro probetas fabricadas (fig. 22) presentaban una curvatura visible a simple vista en la zona de menor radio a lo largo de toda su longitud, además de una marca de la zona de apoyo durante la impresión.

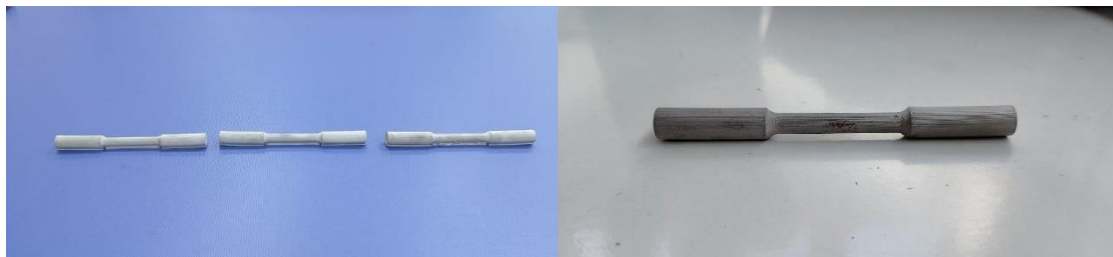


Figura 22: imágenes de las probetas de tracción previas al ensayo A) probetas A, B, D B) probeta D.

En el caso de las probetas de fatiga desde un inicio se decidió por el uso de una probeta CT, cuyas dimensiones se obtuvieron tanto de la norma ISO como ASTM (fig. 23), ya que son las mismas. En primera instancia se optó por el uso de probetas con el parámetro  $W=50$ , sin embargo, debido al tiempo de impresión, la cantidad de material usado y a la variación en la consistencia y medidas de la pieza se optó por el uso de probetas con  $W=25$  (fig. 24).

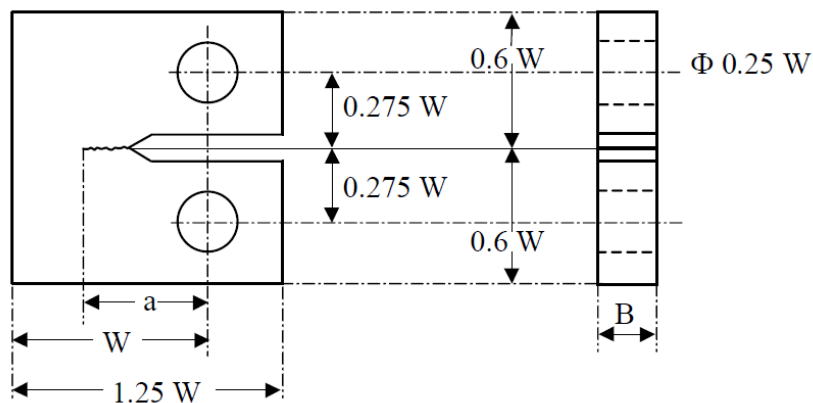


Figura 23: diseño de probeta CT según la norma ASTM E-647 («ASTM 647: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates», 2005).

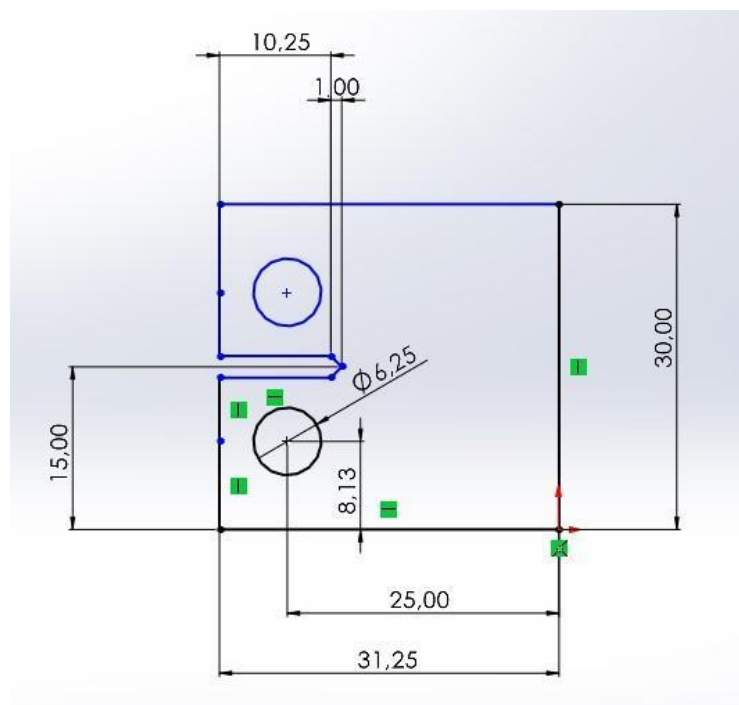


Figura 24: probeta CT diseñada en SOLIDWORKS.

Una vez definidas las medidas de la probeta se extruye el plano hasta un grosor de 6mm para obtener el objeto 3D y se pasa a formato .STL y se importa al software Eiger. Para asegurar que en los ensayos se probaría la anisotropía intrínseca a la fabricación aditiva, se imprimieron las diferentes probetas con diferentes ángulos, denominados como  $\alpha$ , de  $90^\circ$  (fig. 25a),  $90^\circ\text{alt}$  (fig. 25b) y  $0^\circ$  (fig. 25c). En el caso de las piezas a  $0^\circ$  y  $90^\circ$  sí son necesarios raft y soportes para la impresión de los taladros y el notch para el inicio de grieta, por eso requieren de 1 hora más de tiempo de impresión.

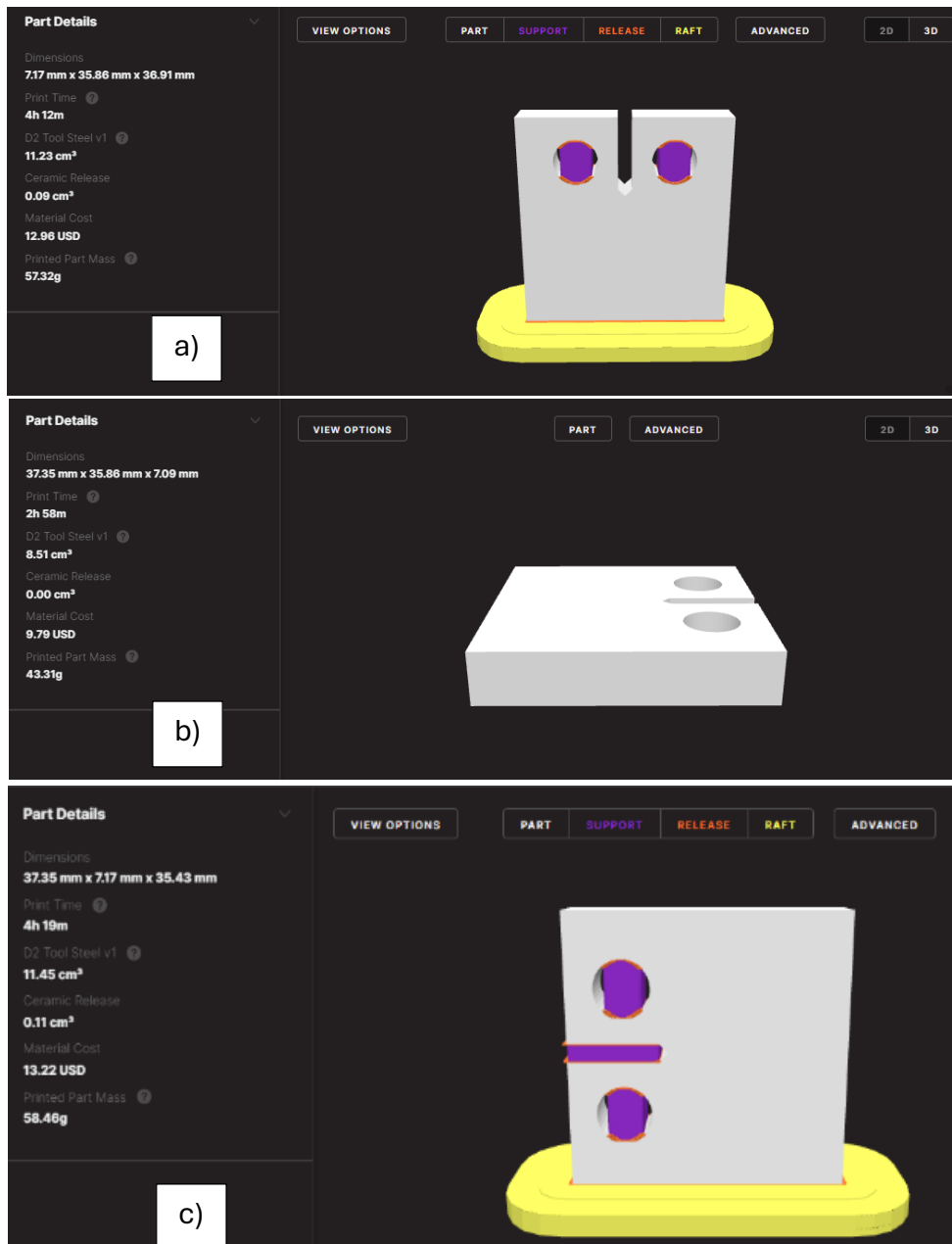


Figura 25: probeta CT exportadas a Eiger y simulación de impresión de la probeta: a)  $\alpha=90^\circ$  con raft y soportes, b)  $\alpha=90^\circ\text{alt}$ , c)  $\alpha=0^\circ$  con raft y soportes.

Una vez diseñadas las probetas de cada ensayo se pasó a su impresión, en el software eiger.io es posible elegir algunas de las características del proceso, las seleccionadas se muestran en la siguiente tabla:

General	
Material	Acero para herramientas D2
Horno	Sinter-1
Impresora	Metal X
Ajustes	
Altura de capa postsinterizada	0,125
Unidades	Métrica
Escala	1
Estabilidad del sinterizado	Sí
Uso de cama	No
Relleno	
Patrón de relleno	Sólido
Capas de pared	4

Tabla 6: propiedades de la impresión de las piezas de eiger.io.

Una vez fabricadas las probetas se procedió a medirlas con un pie de rey, se tomaron medidas a lo largo ancho y alto de las piezas.

El estudio “Characterization of D2 Tool Steel fabricated thru Fused Filament Fabrication Process” (Johnsson, Tufvesson, y Costa, 2023) revela problemáticas idénticas en sus probetas a las que se observaron en las nuestras, desviaciones en las dimensiones y defectos de fabricación debido a la propia impresión, haciendo que las propiedades del acero no sean las dadas por la ficha del material.

Una vez ensayadas las probetas se fabricaron también probetas para microscopía, en las que se quería ver las diferencias estructurales con un material macizo y procesado de manera tradicional.

La embutición de una probeta metalográfica es un proceso para la preparación de muestras y el análisis microscópico. Este procedimiento protege y facilita el manejo y montaje de la muestra durante el proceso de pulido y observación. Consiste en encapsular la probeta en un material de soporte que la estabilice y permita su manipulación. En este

caso se utilizó la embutición en caliente, la muestra se coloca en una prensa y se encapsula en baquelita en este caso, bajo alta temperatura y presión. Este proceso además ayuda a realizar el pulido de una manera más uniforme y a poder observar la probeta con mejor resultado.

Para poder ver bajo el microscopio la probeta de fatiga se cortó en varios trozos, cada uno con una cara en un eje distinto para poder ver en detalle la estructura de la pieza. Primero fue cortada (fig. 28a) con la laboton-3 (fig. 26a), a continuación, una de las caras de cada futura probeta fue desbastada en la labpol-21 (fig. 27a).



Figura 26: imágenes de a) Laboton-3, b)Citopress-1.



Figura 27: imágenes de a) Labpol-21, b) Tegrapol-11.

Una vez obtenidas las muestras se encapsularon (fig. 28b) con la citopress-1 (fig. 26b) y por último antes de observar las probetas se les volvió a hacer un desbastado y se pulieron con una lija de 800 y con un disco de terciopelo para pulido con la tegrapol-11 (fig. 27b). se hicieron un total de 5 probetas en las que las no se hizo ningún tratamiento para observar el grano del metal, sin embargo, en todas ellas se podía observar las marcas de la impresión, cavidades a intervalos regulares, separación entre capas con la misma distancia y el grosor del hilo de la impresión.



Figura 28: imágenes de a) probeta CT cortada para ser preparada, b) probetas encapsuladas.

## 4. Metodología experimental de los ensayos

### 4.1. Probeta cilíndrica de tracción

La norma ISO 6892 establece los parámetros de realización de estos ensayos, para maximizar repetibilidad y comparabilidad en los resultados.

Una vez fabricadas las 4 probetas de tracción se procedió a medirlas con un pie de rey, comparando con las medidas de la figura 17. Se tomaron las medidas mínimas y máximas en el largo de la pieza (fig. 29), los diámetros de las zonas de agarre ( $D_a$ ) de la probeta y tres puntos de medida a lo largo de la zona de medición de la probeta ( $1D_c$ ),  $L$  es el largo total de la probeta y  $L_2$  el largo de la zona de medida de la probeta sin contar con las zonas de agarre ni la transición de una parte a otra de la pieza.

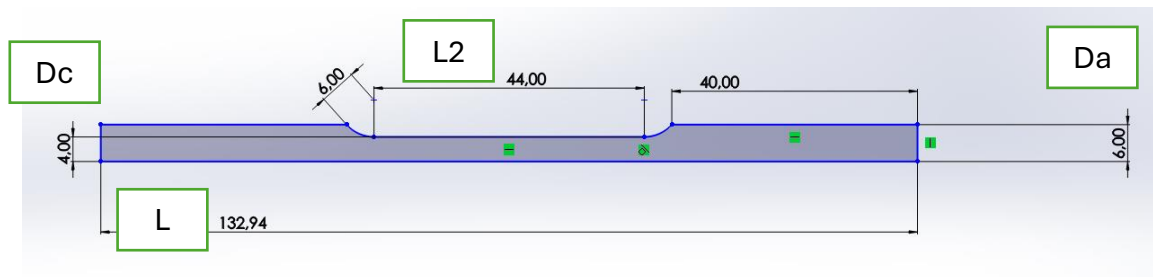


Figura 29: nomenclatura de las medidas de la probeta

Probeta	Diámetro agarre 1 (mm)	Diámetro central 1 (mm)	Diámetro central 2 (mm)	Diámetro central 3 (mm)	Diámetro agarre 2 (mm)	L (mm)	L2 (mm)
A	12,27	8,1	8,14	8,15	12	136,16	48
A'	12,4	8,2	8,25	8,32	12,42	137,46	48
B	12,1	8,08	8,15	8,06	12,25	136,13	48
B'	12,5	8,43	8,24	8,22	12,75	137,38	48
C	12,25	8,11	8,13	8,13	12,13	135,99	47,68
C'	12,45	8,25	8,4	8,22	12,45	137,59	47,68
D	12	8,1	8	8	12,2	135,9	48
D'	12,3	8,2	8,2	8,2	12,4	135,9	48

Tabla 7: mediciones tomadas con pie de rey de las probetas de tracción.

Para realizar un ensayo de tracción uniaxial en una probeta cilíndrica de 4 mm de radio a temperatura ambiente, de acuerdo con la ISO 6892-1:

Antes del ensayo se marca la longitud calibrada en este caso 40mm. Además, la pieza se ensaya tal y como sale del proceso de fabricación.

Se utiliza una máquina de ensayo de tracción calibrada (fig. 30), capaz de aplicar una carga uniaxial controlada. La máquina está equipada con mordazas adecuadas para sujetar la probeta cilíndrica sin dañarla.

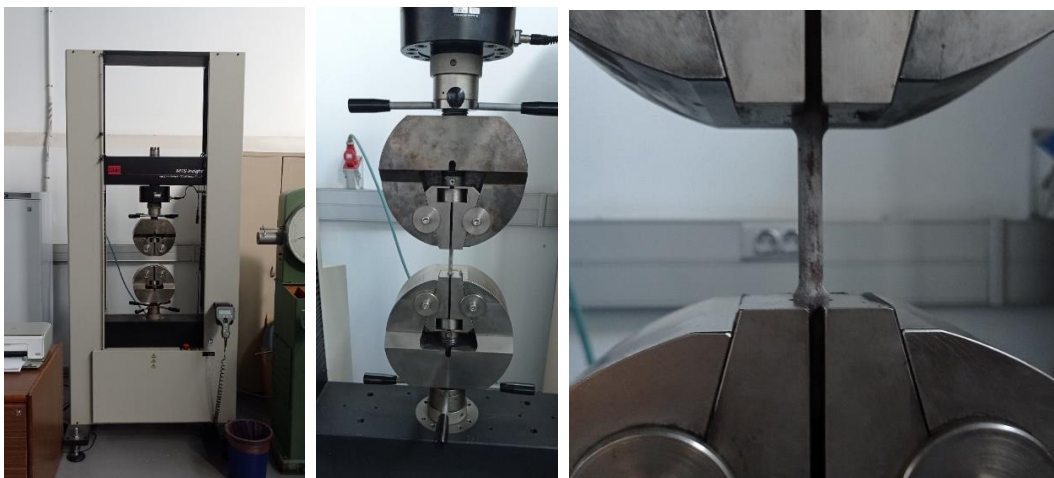


Figura 30: imágenes de máquina de ensayo de tracción uniaxial MTS Insight 300KN Standard Length.

La máquina cuenta con un extensómetro para medir la distancia recorrida por las mordazas. Este dispositivo medirá la deformación axial a lo largo de la longitud calibrada durante el ensayo.

El ensayo debe realizarse a temperatura ambiente, que según la norma ISO 6892-1 se define como una temperatura entre 10 y 35 °C, en este caso se realizó a 17°C.

La norma ISO 6892-1 especifica dos métodos para controlar la velocidad de deformación, uno por tensión y en el caso de esta máquina control por deformación, la tasa de deformación debe ser constante, en este caso se controla mediante la velocidad de separación de las mordazas, hasta que se alcance el límite de elasticidad o hasta la rotura.

Una vez sujeta la probeta en las mordazas de la máquina de tracción de manera que quede perfectamente centrada y alineada con la dirección de la carga, se inicia el ensayo aplicando la carga. La máquina debe aumentar la carga progresivamente, y el

extensómetro registrará las deformaciones a medida que se alargue la probeta. Durante el ensayo, el sistema de adquisición de datos registrará la carga aplicada y la elongación correspondiente. Estos datos se utilizarán para trazar la curva tensión-deformación. El ensayo continúa hasta la rotura.

## 4.2. Probetas de fatiga

Una vez completados los preparativos para el ensayo en lo que se refiere a probeta, se procede a medir con un pie de rey las 8 probetas CT fabricadas, las medidas de la alturas de la pieza eran consistentes, sin embargo, en el largo y ancho, después de tomar varias medidas a lo largo de las piezas se han tomado la mínima y máxima obtenida. El código de las probetas es: D2 por el acero, la dirección del plano de carga con respecto al plano de construcción ( $\parallel$  ( $0^\circ$ ),  $\perp$  ( $90^\circ$ ) y  $90^\circ$  ( $90^\circ\text{alt}$ )) y el número de pieza con una letra griega ( $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ ), la m del final es de mini debido a que en la segunda tanda de piezas las dimensiones son la mitad.

Probeta	Alto (mm)	Largo mínimo (mm)	Largo máximo (mm)	Ancho mínimo (mm)	Ancho máximo (mm)
D2CD $\parallel$ BD $\alpha$ m	30,6	32,1	32,1	6,08	6,3
D2CD90BD $\alpha$ m	30,8	32	32	6,22	6,54
D2CD90BD $\beta$ m	30,64	31,9	31,9	6,28	6,6
D2CD $\parallel$ BD $\beta$ m	30,58	32,16	31,92	6,1	6,22
D2CD $\parallel$ BD $\gamma$ m	30,6	31,52	32,3	6,16	6,4
D2CD $\perp$ BD $\alpha$ m	30,58	31,92	32,02	6,16	6,5
D2CD $\perp$ BD $\beta$ m	30,52	31,9	31,98	6,18	6,48
D2CD $\perp$ BD $\gamma$ m	30,58	31,92	31,96	6,16	6,48

Tabla 8: mediciones tomadas con pie de rey de las probetas de fatiga.

Para este ensayo de fatiga se utilizan los parámetro de la norma ASTM-649. Los primeros ajustes y parámetros el siguiente paso era la recopilación de datos de las imágenes sin el uso del software de correlación de imágenes, previo al ensayo se marca la probeta con medidas de 1mm para poder identificar en las imágenes el aumento del tamaño de la grieta.

La creación del programa PyCapS (Python Captura Secuenciada) viene dada por la necesidad de recopilar datos del ensayo de fatiga, teniendo disponibles los datos de la máquina, ciclos, desplazamiento, etc., y las imágenes de la cámara Pointgrey Gazelle (fig.

31), faltaba una manera de recopilar las imágenes de la cámara. Debido a la falta de disponibilidad del software comercial designado para ello se optó por hacer uno propio.

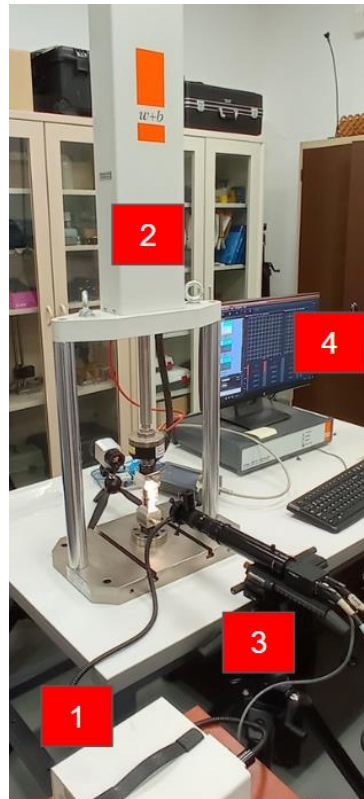


Figura 31: 1 fuente de luz, 2 máquina de ensayos de fatiga, 3 cámara, 4 ordenador con tarjeta de adquisición de datos de la máquina de ensayos.

### Parámetros del primer ensayo

Se inician los ensayos de fatiga con la probeta  $90^{\circ}$ alt  $\beta$ , en esta prueba la probeta se movía debido a que al introducir el parámetro de la amplitud del ciclo el punto de inicio de la máquina es el punto medio, entonces la distancia era el doble de la prevista.

La amplitud de la carga por ciclo era 0,2-2 KN, inicialmente 300 ciclos a 2 Hz y 3000 a 4 Hz, a continuación, se hicieron 41812 ciclos a la pieza.

Una vez formada la grieta se cambia la cámara y se le pone un zoom x2 y se prueba el ensayo a 15 Hz, pero a esa velocidad la probeta vibra demasiado como para poder hacer el seguimiento de la grieta, por lo que se establecen como parámetros una amplitud de carga de 0,4 a 4 KN y una velocidad de 10 Hz, aunque a esta velocidad la grieta puede verse borrosa en muchas ocasiones en las fotografías. Al llegar el final del ensayo se hace un último cambio para observar la grieta, los parámetros de cada ciclo son los mismos

pero cada 500 ciclos la máquina introduce una rampa hasta los 4 KN con  $R=0.1$  donde se detiene y a continuación introduce otra rampa hasta los 0,4 KN para repetir los 500 ciclos hasta la rotura (fig. 32), la introducción de esta rampa se debe tanto a la búsqueda de estabilidad de la probeta a la hora de tomar fotos como tener la certeza de que se están tomando datos de la grieta con su máxima apertura.

Estos cambios de parámetros durante el ensayo se debieron a que se debían encontrar las constantes adecuadas para que la probeta no se moviese en exceso durante el ensayo y se pudiese ver la grieta de manera adecuada, pero realizando el ensayo de la manera más rápida posible.

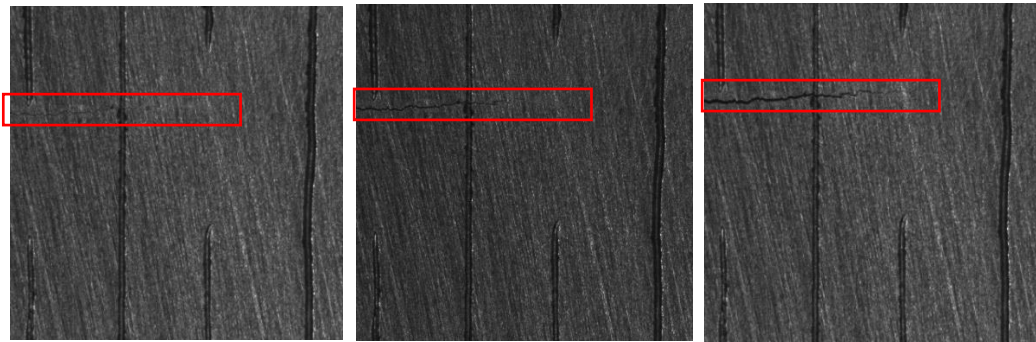


Figura 32: proceso de apertura de grieta durante el ensayo de fatiga.

La obtención de datos del primer ensayo se hizo con el software gratis de ShareX (fig. 33), Microsoft store. Fue una buena forma de tener un punto de partida para saber las características que requería el programa, ya que contaba con una forma de guardar los archivos en la carpeta que se quisiese elegir, añadir fecha y hora a los nombres de las capturas de pantalla y la modificación del periodo con el que se hacían las capturas. Este programa contaba también con dos grandes limitaciones, la primera es que el periodo de captura no podía ser inferior a un segundo y que al realizar más de 1.500 el programa fallaba y había que reiniciarlo para poder continuar con la toma de datos. Esto implicaba que, aunque no hubiese que hacer un seguimiento continuo del ensayo hubiese que reiniciar la aplicación cada cierto tiempo para seguir obteniendo imágenes.



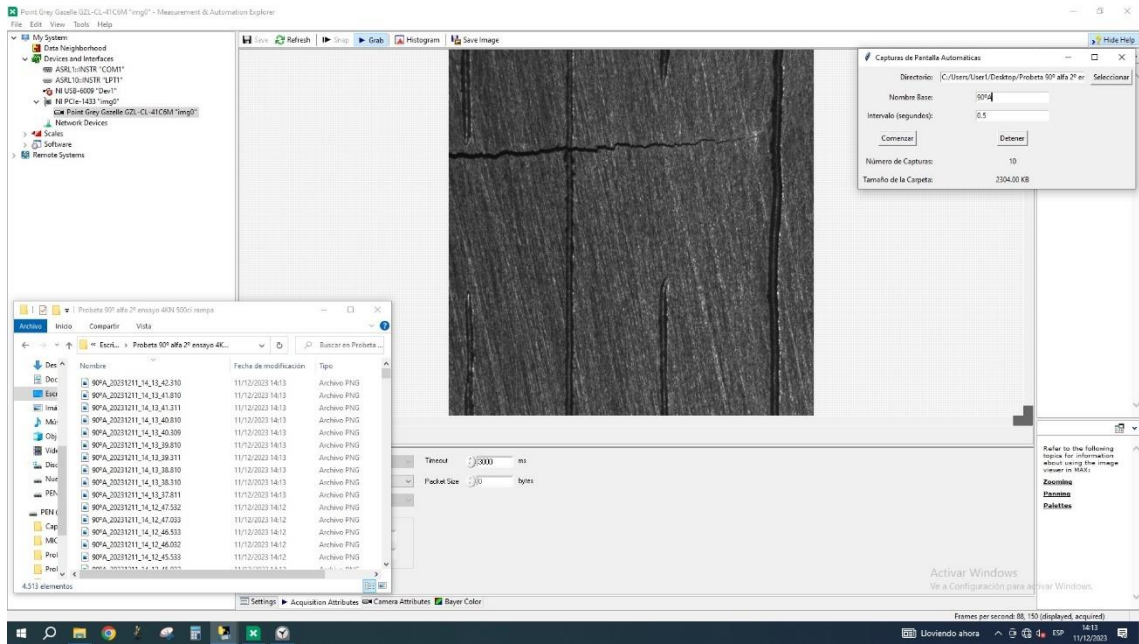


Figura 34: captura de pantalla del ensayo de fatiga tomada con la aplicación desarrollada.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## 5. Resultados obtenidos del programa

La creación del programa de toma de capturas de pantalla viene dada por la necesidad de recopilar datos del ensayo de fatiga, teniendo disponibles los datos de la máquina, ciclos, desplazamiento, etc., y las imágenes de la cámara Pointgrey Gazelle, faltaba una manera de recopilar las imágenes de la cámara. Debido a la falta de disponibilidad del software comercial designado para ello se optó por hacer uno propio.

Una vez completados los preparativos para el primer ensayo en lo que se refiere a probeta, primeros ajustes y parámetros, el siguiente paso era la recopilación de datos de las imágenes sin el uso del software de correlación de imágenes.

En el primer ensayo, con el programa ShareX se tuvo una buena referencia de las funciones necesarias y a mejorar de la aplicación, principalmente el periodo de toma de capturas y la robustez del programa, porque este tenía que ser interrumpido y reiniciado cada cierto tiempo debido al uso de memoria cada vez que llegaba a las 1.500 capturas.

Después de este ensayo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se optó por intentar hacer una aplicación codificando en algún lenguaje compatible con el procesamiento de imágenes. Inicialmente se barajó la posibilidad de utilizar Matlab, pero finalmente se optó por Python debido a la facilidad con la que se podían crear interfaces, y debido a que podía comportar menos riesgos de incompatibilidad a la hora de crear un ejecutable y exportarlo a otro ordenador.

A la hora de programar se optó por la compartimentalización del programa, inicialmente se hizo un script sencillo, probando todas las funcionalidades necesarias para el ensayo, una captura de pantalla con un periodo determinado, una ruta a una carpeta para el guardado y el guardado de las capturas con el tiempo de toma; todo esto para poder tener bien organizadas las capturas tomadas, tanto por el tiempo como el lugar donde estén situadas. Esta primera versión solo contiene una subrutina que sirve para capturar.

Una vez probado, viendo que los tiempos de toma de capturas tenían una buena tolerancia con respecto al periodo introducido, de 0.5 segundos, entre 1 y 2 milésimas de segundo de diferencia entre capturas.

En este primer intento las funciones estuvieron desarrolladas y unidas en un solo programa en el que se pueden modificar los parámetros dentro de la consola de Python se pasó a hacer una interfaz para el programa, por comodidad de uso del programa. En esta interfaz una vez iniciado el programa se pueden modificar los parámetros, iniciar y detener la toma de capturas. A diferencia del código inicial la interfaz requiere de varias subrutinas sujetas a interruptores, esta interfaz gráfica se obtiene de la librería tkinter.

Además de esta librería tkinter para la creación e interacción con la interfaz se ha usado os para poder interactuar con el sistema operativo, date y datetime para manejar tiempos y fechas dentro del código, PILLOW es la biblioteca que permite la manipulación de imágenes, en este caso captura y por último threading para poder usar la interfaz al mismo tiempo que se hacen las capturas.

Teniendo definidas las tareas, se pueden hacer las subrutinas:

- `choose_folder(self)`: muestra un cuadro de diálogo para que el usuario seleccione el directorio donde se almacenarán las capturas de pantalla.
- `capture_loop(self)`: es el bucle principal que captura y guarda las pantallas. Utiliza la función `ImageGrab.grab` para realizar capturas de pantalla, las guarda en el directorio seleccionado con un nombre basado en el timestamp y actualiza el contador de capturas y el tamaño de la carpeta en la interfaz. La captura se realiza en intervalos definidos por el usuario en la interfaz, calculados con el tiempo transcurrido y el intervalo deseado.
- `start_stop_capture(self)`: esta función alterna entre iniciar y detener las capturas. Si las capturas están activas, llama a `stop_capture`, y si no lo están, inicia un nuevo hilo que ejecuta la función `capture_loop` en segundo plano.
- `stop_capture(self)`: detiene la captura de pantallas y finaliza el bucle.
- `__init__(self, root)`: Constructor del programa. Inicializa la aplicación, configurando el título de la ventana y las variables de la interfaz gráfica. También llama a la función `create_widgets` para construir la GUI.

- `create_widgets(self)`: Crea los componentes de la interfaz gráfica (etiquetas, campos de texto, botones). Asigna a cada botón una función específica, como seleccionar el directorio donde se guardarán las imágenes o iniciar/detener las capturas.

El último paso una vez completado el programa fue crear un ejecutable para poder capturar las imágenes en el ordenador que tiene la tarjeta de adquisición de la cámara.

El ejecutable creado con Python tiene un tamaño muy reducido (1.1 MB) y tiene la ventaja de poder ser utilizado en cualquier ordenador, sin necesidad de tener un lugar donde ejecutar el código de Python o descargar los archivos necesarios para ejecutarlo.

El programa tiene una interfaz muy sencilla (fig. 35a y 35b), donde se pueden poner los parámetros de las capturas (fig. 36a): un nombre que se pone a las capturas para poder identificar el ensayo; el tiempo de toma de las capturas con respecto al tiempo del ordenador, llegando a los milisegundos; el periodo de toma de las capturas, que se puede modificar. Además de esto la función de elegir la carpeta de guardado también está en el ejecutable y un medidor del tamaño de la carpeta donde se guardan las capturas en la última versión del ejecutable (fig. 36b).

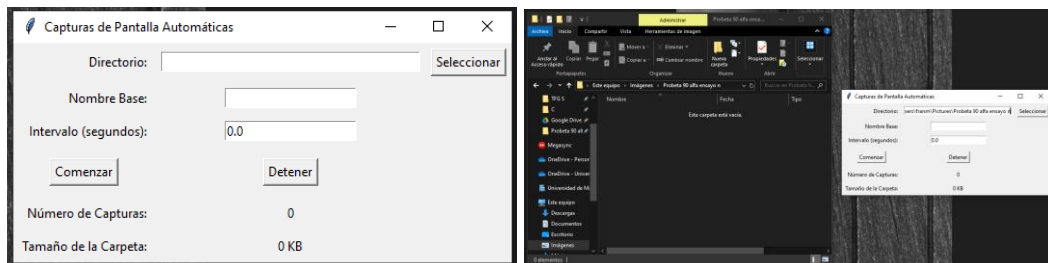


Figura 35: a) interfaz inicial al ejecutar el programa, b) se introduce la ruta de la carpeta directamente en la interfaz o se puede navegar hasta el lugar donde se vayan a almacenar.

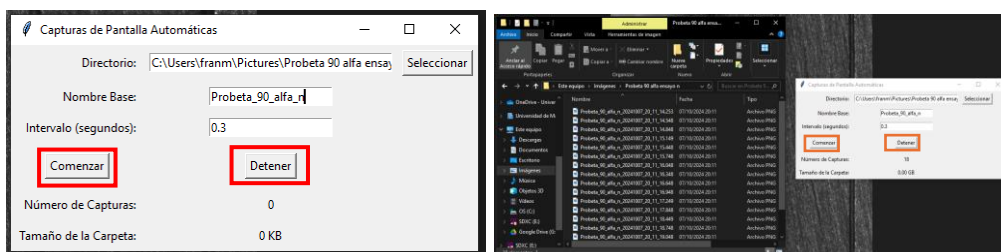


Figura 36: a) interfaz del programa con todos los parámetros introducidos, b) una vez puestos los parámetros al pulsar comenzar se realizarán las capturas y al pulsar detener se detendrán y se reiniciarán los recuentos.

Después del primer ensayo con ShareX y haber obtenido los primeros resultados, se usó el ejecutable de python, en este caso se puso el periodo de las capturas a 0.5s y se dejó a la máquina hacer ciclos hasta que hubo una grieta visible de 0.3 mm. En este caso se tomaron 24.000 capturas, sin fallo en el periodo de toma (fig. 37), de las cuales 20.000 se sacaron durante la iniciación de grieta de manera continua, para comprobar que el programa funcionaba correctamente.

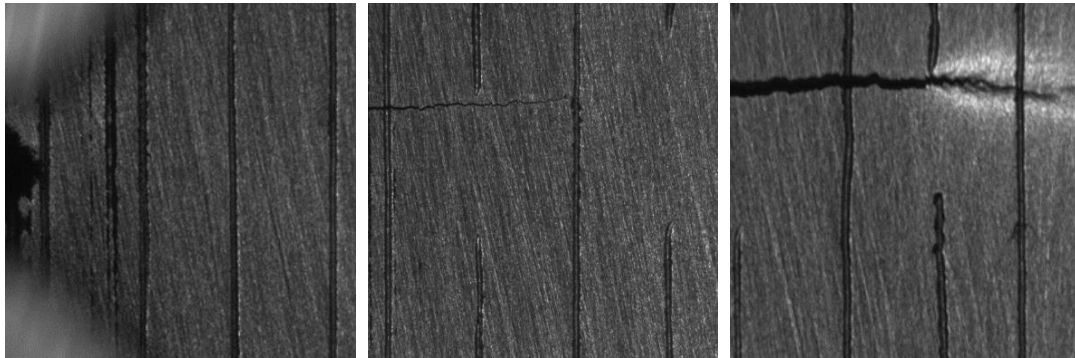


Figura 37: imágenes del crecimiento de grieta a lo largo del ensayo , a) inicio de grieta ,b) crecimiento estable y c) inicio de la inestabilidad.

## 5.1. Tratamiento de datos

Los resultados de crecimiento de grieta obtenidos de este segundo ensayo fueron 4.000 fotografías a lo largo de 4 horas, siempre tomadas durante la rampa de apertura de la grieta para asegurar mejores imágenes. Una vez recopiladas primero se recortó la imagen de la cámara de cada captura hasta dejar una imagen de 617 x 617 (fig. 38), eliminando el resto de la captura de pantalla y reduciendo el tamaño de las capturas para que así fuese más rápido el manejo de todas las fotografías.

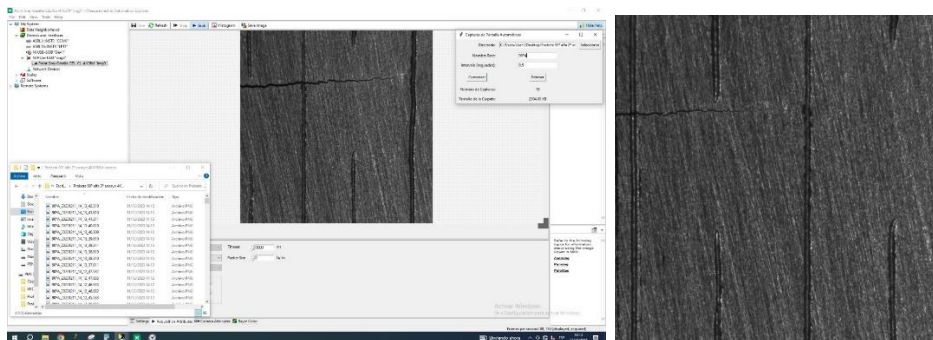


Figura 38: captura de pantalla antes y después del recorte.

Una vez recortadas se clasificaron una primera vez mediante un script para separar las capturas en carpetas según el tiempo de separación entre las tomas, para poder dividir las fotos según el número de ciclos en los que se tomaron las capturas, cada toma de capturas de pantalla es solo en las rampas, por lo que están separadas por más de 50 segundos.

Una vez hecha esta primera clasificación, de cada una de estas carpetas se toma una sola fotografía, estas fotografías se han elegido por estar en la máxima apertura de la grieta y tener una mayor nitidez en la imagen, para poder determinar la medida de la grieta. En total 168 capturas con una diferencia de 500 ciclos entre cada una de ellas. Con estas 168 fotografías se procede a hacer las mediciones de la grieta.

En este caso las mediciones de distancia se han realizado con correlación de imágenes, más concretamente con medición de píxeles en las propias imágenes. La herramienta utilizada para esta tarea ha sido ImageJ, una herramienta de medida de fotografía científica que posee un zoom para las imágenes suficiente para poder seguir el crecimiento de la grieta y cuenta con herramientas de medida para utilizar sobre las propias imágenes. Previo a esto se intentó tratar las imágenes para resaltar en mayor medida la grieta mediante Matlab y Python sin embargo debido a las imperfecciones de la superficie de la probeta, había demasiado ruido en la imagen y no había mejora alguna a la hora de medir la grieta, se obtuvieron resultados del binarizado (fig. 39a) de la imagen, sin embargo, resultan demasiados puntos en los alrededores (fig. 39 y 40) y en la grieta de forma discontinua como para medir de manera exacta, este es un camino por el que se puede continuar la investigación, Python es una herramienta muy versátil y potente a la hora de procesar imágenes y la facilidad para la creación y búsqueda de bibliotecas para este entorno de trabajo ofrece muchas posibilidades (PILLOW, NumPy, skimage y matplotlib fueron las utilizadas para estas imágenes), por ejemplo al subdividir la imagen se puede obtener una mayor precisión a la hora de medir los contornos (fig. 40).

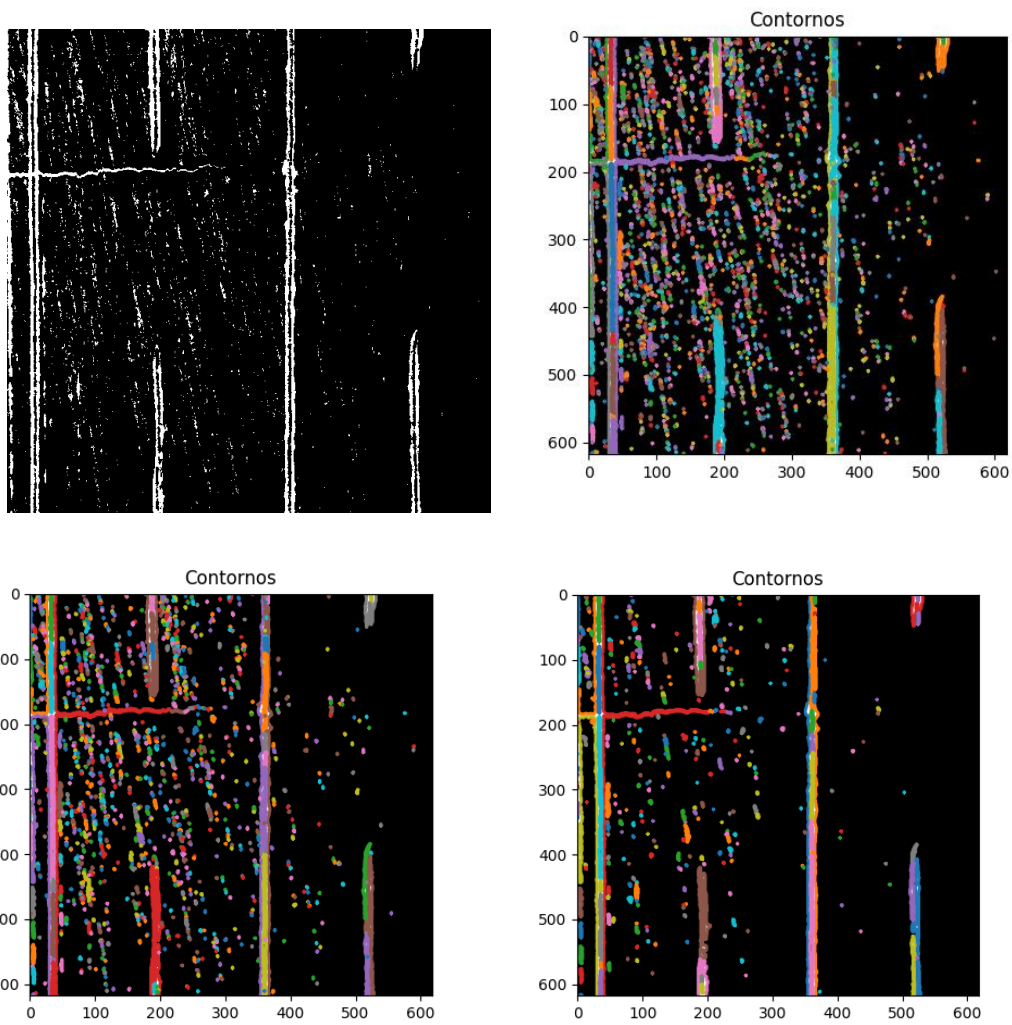


Figura 39: a) imagen del ensayo de fatiga binarizada, b) imagen binarizada medida a través de python, c) imagen binarizada eliminando elementos de 1 píxel y d) imagen binarizada y procesada con un filtro gaussiano con  $\sigma=1$ .

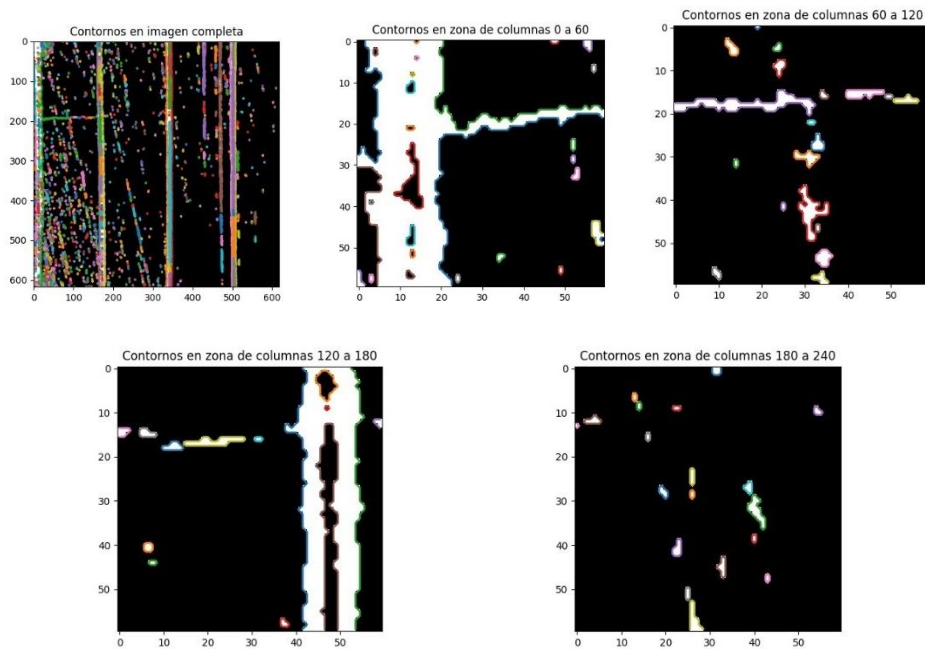


Figura 40: a) representación de todos los contornos medidos en una de las imágenes; b, c, d y e) seguimiento de la grieta a través de la división de la grieta en un mosaico.

Finalmente se optó por la utilización de puntos clave y reconocibles de una captura a otra y el seguimiento de la deformación producida por la grieta, que genera un destello en la imagen para poder seguir el crecimiento de la grieta. Esta tarea resulta mucho más difícil inicialmente, ya que la grieta no tiene una anchura suficiente como para ver de manera clara el crecimiento de una imagen a otra sin comparar con la imagen anterior y posterior. Debido a la necesidad de detalle en cada medida y a que requiere de comprobación y comparación con el resto de las medidas, ya que en cada captura la grieta sólo puede crecer, esta tarea requiere de mucho tiempo.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## 6. Análisis de resultados

### 6.1. Resultados ensayos de tracción

Aquí se muestran los resultados extraídos de la máquina de tracción, se han realizado 4 ensayos con probetas cilíndricas fabricadas con los parámetros de la norma UNE-EN ISO 6892-1, el ensayo se realizó a temperatura ambiente, 17°C, y con velocidad de deformación constante:

A continuación, se muestran todas las gráficas y datos resultantes de los ensayos de tracción en una misma gráfica para poder comparar los resultados, que tienen unos valores bastantes similares.

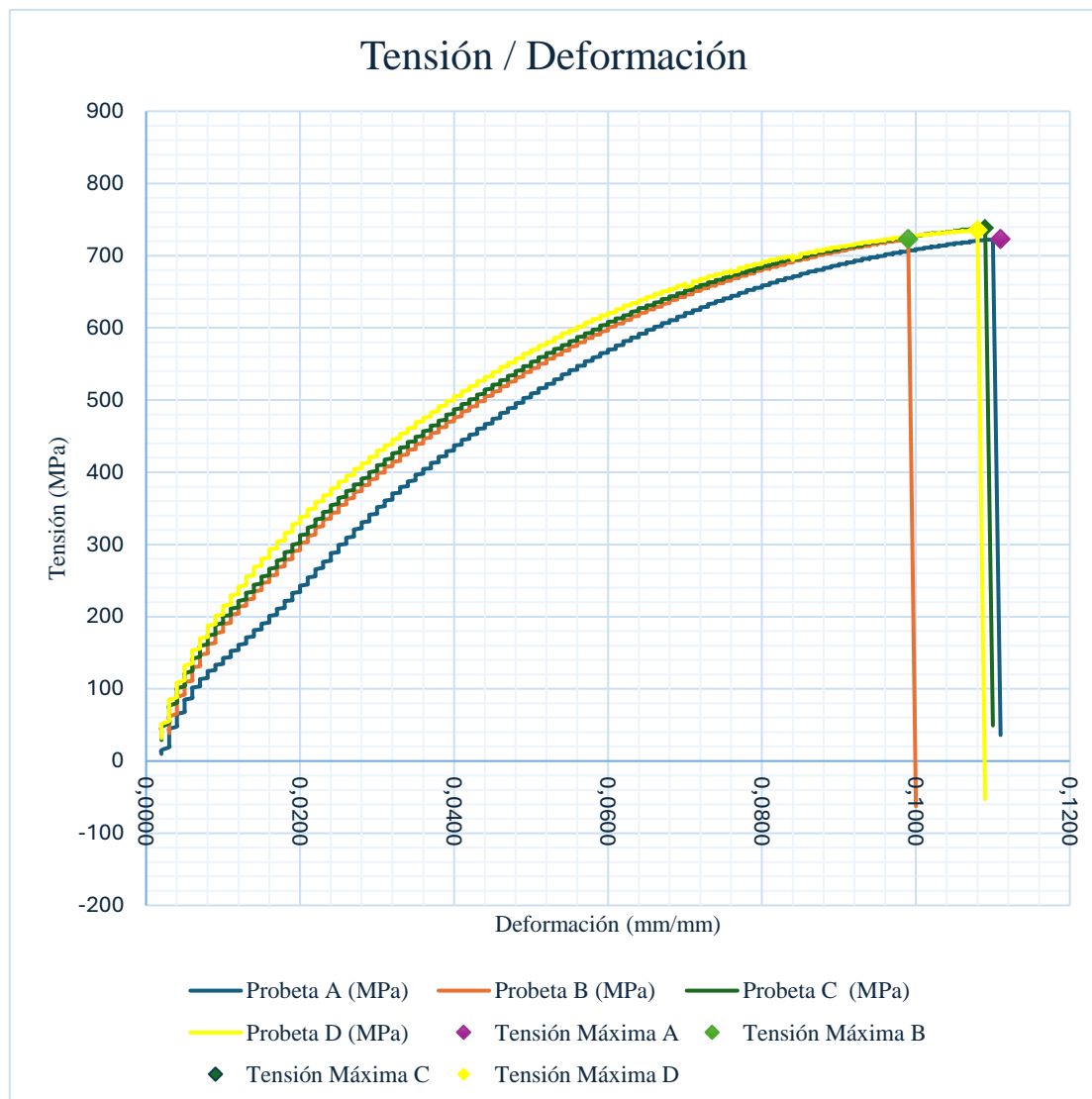


Figura 41: comparativa de los resultados de los ensayos de tracción de las probetas A, B, C y D.

Una vez vistos los resultados de los ensayos y comparándolos se puede observar que las trayectorias de las curvas son muy similares y son consistentes siendo 4 ensayos, con variaciones, como es de esperar con probetas fabricadas con un proceso que puede tener diferencias en la microestructura de un espécimen a otro. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos directamente de la máquina que realiza el ensayo de tracción.

Probeta A				
Carga máxima	Tensión máxima	Deformación en la ruptura	Módulo	Carga de ruptura
N	MPa	mm/mm	MPa	N
37.701,44	722,70	0,110	14.228,97	37.701,44
Probeta B				
Carga máxima	Tensión máxima	Deformación en la ruptura	Módulo	Carga de ruptura
N	MPa	mm/mm	MPa	N
37.727,24	723,20	0,099	19.278,37	37.727,24
Probeta C				
Carga máxima	Tensión máxima	Deformación en la ruptura	Módulo	Carga de ruptura
N	MPa	mm/mm	MPa	N
38.512,49	738,20	0,109	21.613,37	38.512,49
Probeta D				
Carga máxima	Tensión máxima	Deformación en la ruptura	Módulo	Carga de ruptura
N	MPa	mm/mm	MPa	N
38.369,26	735,50	0,108	23.558,77	38.369,26

Tabla 9: tabla de resultados obtenidos de la máquina de ensayos de tracción.

Un dato que destacar es que el módulo elástico del acero D2 es de 210 GPa y según el fabricante es 187 GPa y los valores máximos dados por la máquina son de 23 GPa, este valor también se ha obtenido a través de la sección de 8.15mm de diámetro y da valores similares. Esta variación también se ve en el estudio mencionado anteriormente “Characterization of D2 Tool Steel fabricated thru Fused Filament Fabrication Process” (Johnsson, Tufvesson, y Costa, 2023).

Para averiguar el módulo elástico de las probetas se obtiene la regresión lineal del rango de valores de la curva de tensión-deformación con una linealidad mayor al 99%, de la máquina se han obtenido los resultados tanto de deformación como la medida de la extensión de la pieza, esta primera línea se le realiza un segundo ajuste para eliminar la deformación del 2% y así obtener el límite elástico, la pendiente de esta recta es el módulo elástico. Finalmente, los módulos elásticos resultan en 10.5, 10.5, 9.9 y 10.8 GPa

respectivamente y 478MPa de límite elástico, estos resultados resultan tan bajos sugieren algún problema durante el proceso de fabricación de estas piezas o una porosidad extrema, esta porosidad puede llevar a fallos críticos.

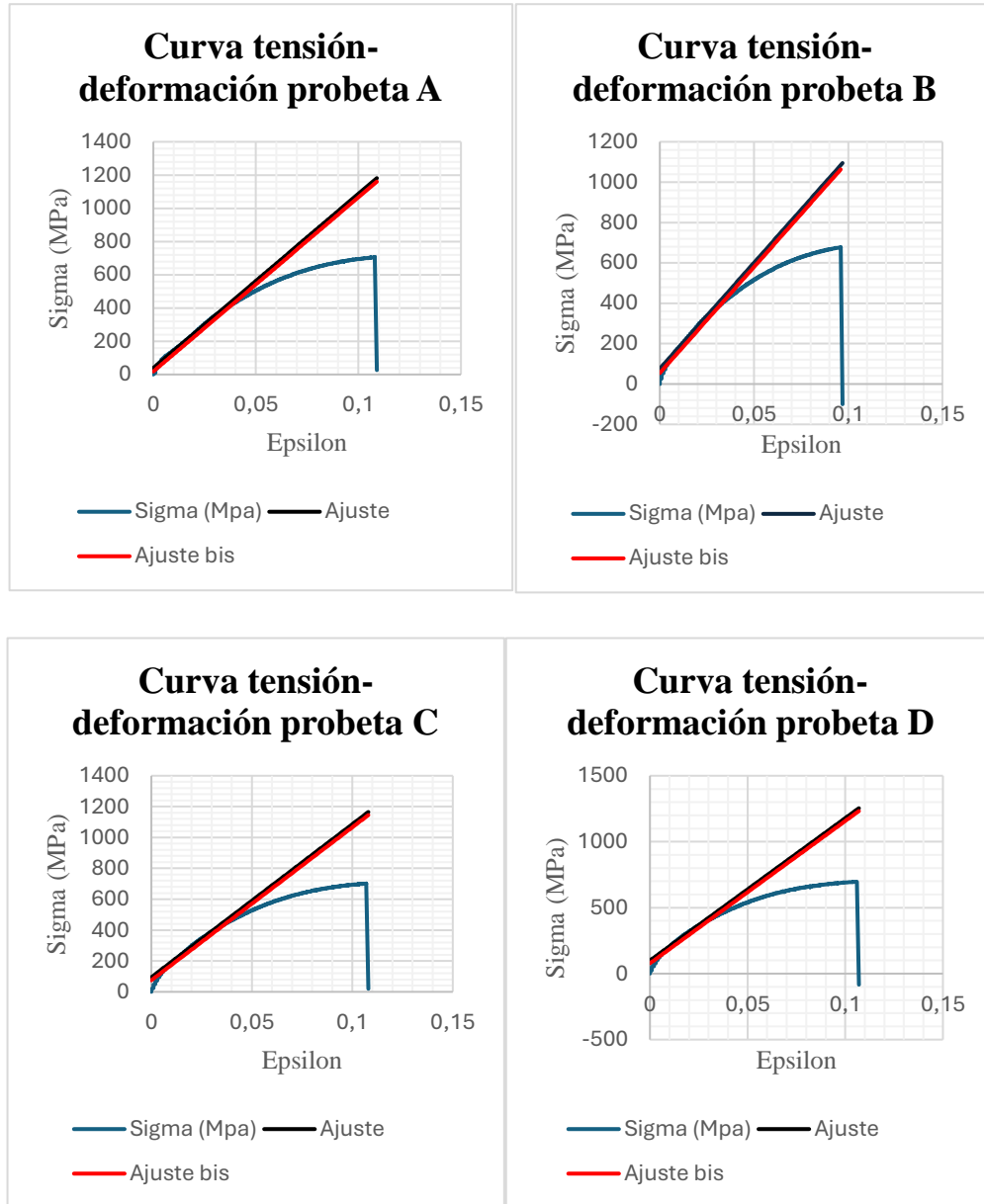


Figura 42: representación de los cálculos del módulo y límite elástico de las probetas A, B, C y D.

Se trata de una variación enorme con respecto a los valores esperados, esto puede estar producido por la microestructura y estructura de la propia pieza, que producen huecos e imperfecciones; las propiedades mecánicas podrían haberse visto afectadas por un defecto durante alguno de los pasos de la fabricación, por la deformación durante algún proceso o por la presencia de tensiones internas en la pieza.

## 6.2. Análisis de las probetas de tracción ensayadas

Una vez ensayadas las probetas de tracción se obtuvieron las siguientes imágenes después de la fractura.

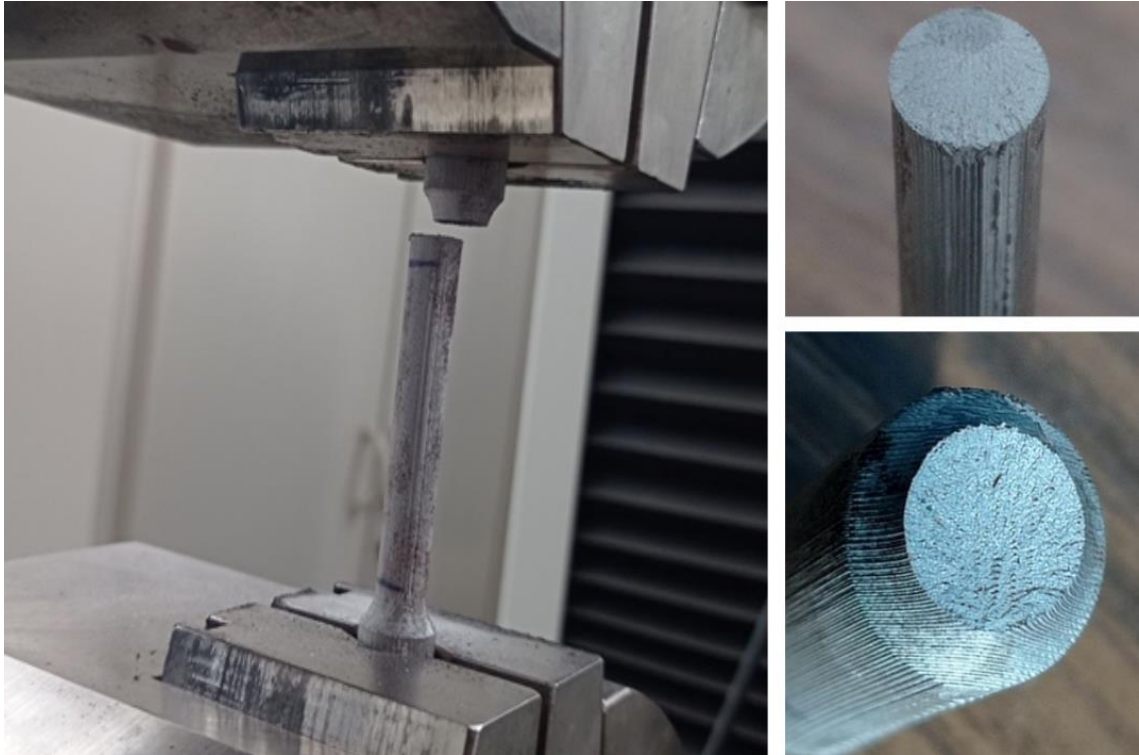


Figura 43: resultados del ensayo de tracción a) probeta en la máquina de ensayo tras la prueba, b) y c) detalle de las superficies de la zona de rotura.

Tras el ensayo se puede observar una fractura frágil, no se aprecian grandes deformaciones ni estrangulación en la zona de rotura, aunque las probetas sí han tenido algo de deformación. La superficie de la ruptura es brillante e irregular y perpendicular al eje de aplicación de la fuerza, pero no totalmente plana, tiene algo de curvatura en ambos lados de la fractura. Cabe destacar que una zona de la superficie tiene menor brillo, indicando que ha habido algo más de deformación, todas las fracturas tienen los mismos resultados. Parece que la deformación de la probeta ha ocasionado una concentración de tensiones en una zona de la probeta que hace que se deforme ligeramente más durante la ruptura, esto no era distinguible al microscopio (fig. 43).

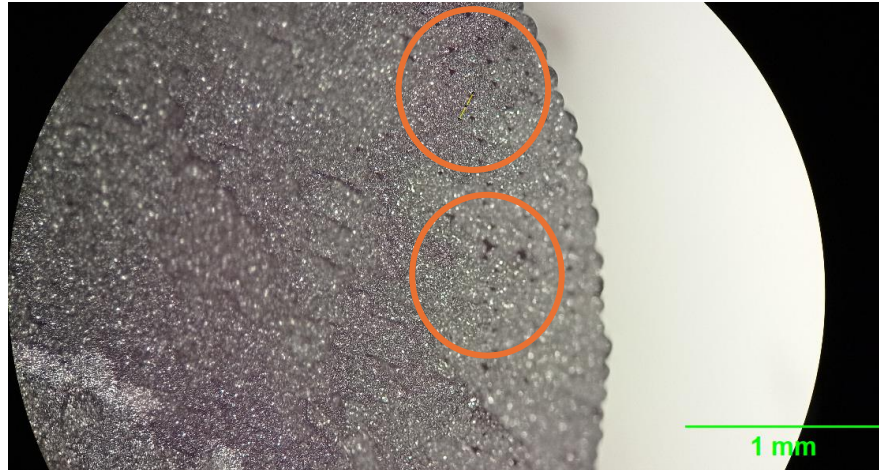


Figura 44: imagen de la probeta de tracción a través del microscopio, 50 aumentos.

No es visible a simple vista, pero con el microscopio (fig. 44) es posible distinguir el patrón de deposición de la impresión, en este caso el espacio entre capas.

### 6.3. Análisis de las probetas de fatiga ensayadas

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de fatiga, realizado con una probeta CT de acero D2 fabricada y ensayada según la norma ASTM E-647, esta probeta se ha denominado como a 90°, debido a que el patrón de deposición del material es perpendicular al plano donde se aplica la fuerza. Debido a la cantidad de fotografías tomadas no se pondrán en este escrito, a continuación, está la gráfica que representa el número de píxeles que mide cada grieta, cada salto en la gráfica se debe a haber movido la cámara de posición para seguir la grieta.

El primer ensayo con la probeta denominada 90°alt, no se incluye en estos resultados debido a que se utilizaron diferentes cargas y frecuencias durante el ensayo para comprobar los parámetros óptimos y a que al no haber introducido la no es posible medir la grieta de forma precisa, sin embargo, este ensayo sirvió como prueba de la estabilidad del programa durante un ensayo de larga duración. Aunque había 8 probetas de fatiga tras el segundo ensayo el bulón que sostenía en su lugar la pieza se rompió y hubo que detener los ensayos ya que no había un reemplazo.

Una vez obtenidas las medidas de las fotografías, se toman como punto de partida para la medida de la grieta las fotografías tomadas al cambiar de posición la cámara para

poder medir en milímetros. En cada salto se miden los píxeles que hay entre las marcas para poder interpolar la medida en cada fotograma.

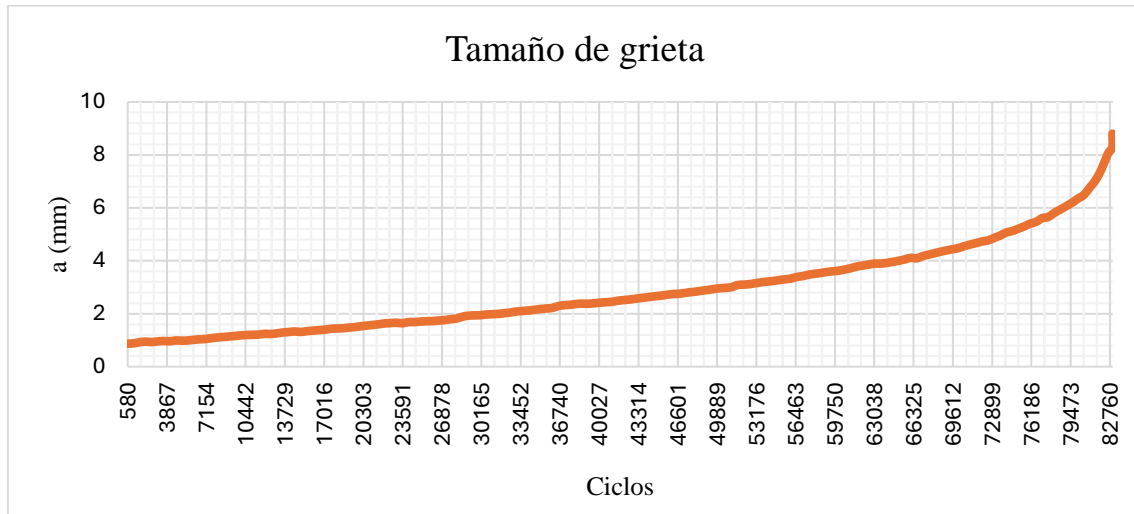


Figura 45: representación del tamaño de grieta en milímetros.

Una vez obtenidas las medidas también se puede obtener el ratio de crecimiento por ciclo de medición de la grieta. Los datos obtenidos del segundo ensayo son coherentes con lo que se observa visualmente y con el comportamiento habitual de una probeta CT, aunque con alguna pequeña desviación, seguramente debida a que las medidas se toman de forma visual.

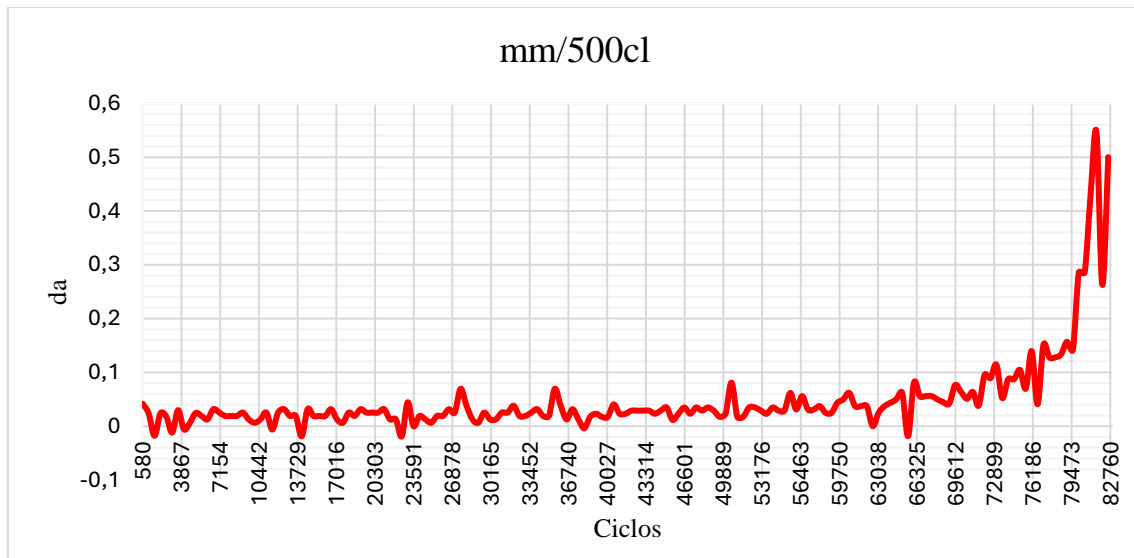


Figura 46: representación de la velocidad del tamaño de grieta da.

Una vez obtenidos los resultados de la medición de la grieta se puede calcular la curva  $da/dN$ . A continuación, los datos obtenidos se pasan a través de la ecuación de Paris, resultando en la siguiente gráfica.

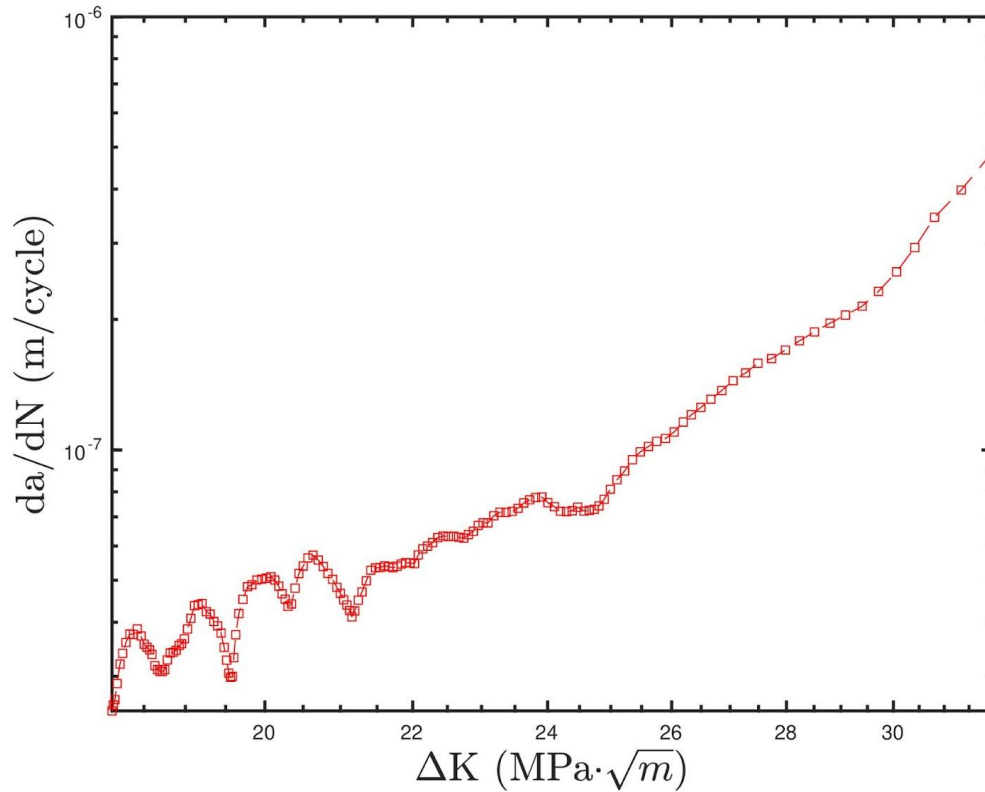


Figura 47: curva  $da/dN$ .

Aunque la primera parte de la gráfica tenga variaciones corresponde a la región 2, la falta de estabilidad de la gráfica se debe a que con  $\Delta K$  pequeños se tiene un crecimiento que se ve afectado por las fronteras de grano, es decir, cada vez que la grieta llega a una frontera el crecimiento se reduce ya que la energía necesaria para avanzar es mucho mayor en este punto, lo que también puede verse amplificado por la propia estructura resultante del proceso de fabricación y aumentar las variaciones en la velocidad de crecimiento de grieta. La última zona de la gráfica corresponde a la Región III, donde el ritmo de crecimiento aumenta considerablemente, y finalmente el crecimiento pasa a ser inestable.

## 6.4. Análisis de las probetas de microscopía

A continuación, las micrografías obtenidas con las probetas fabricadas a partir de la probeta de fatiga ensayada, este fue el resultado nada más acabar el ensayo:

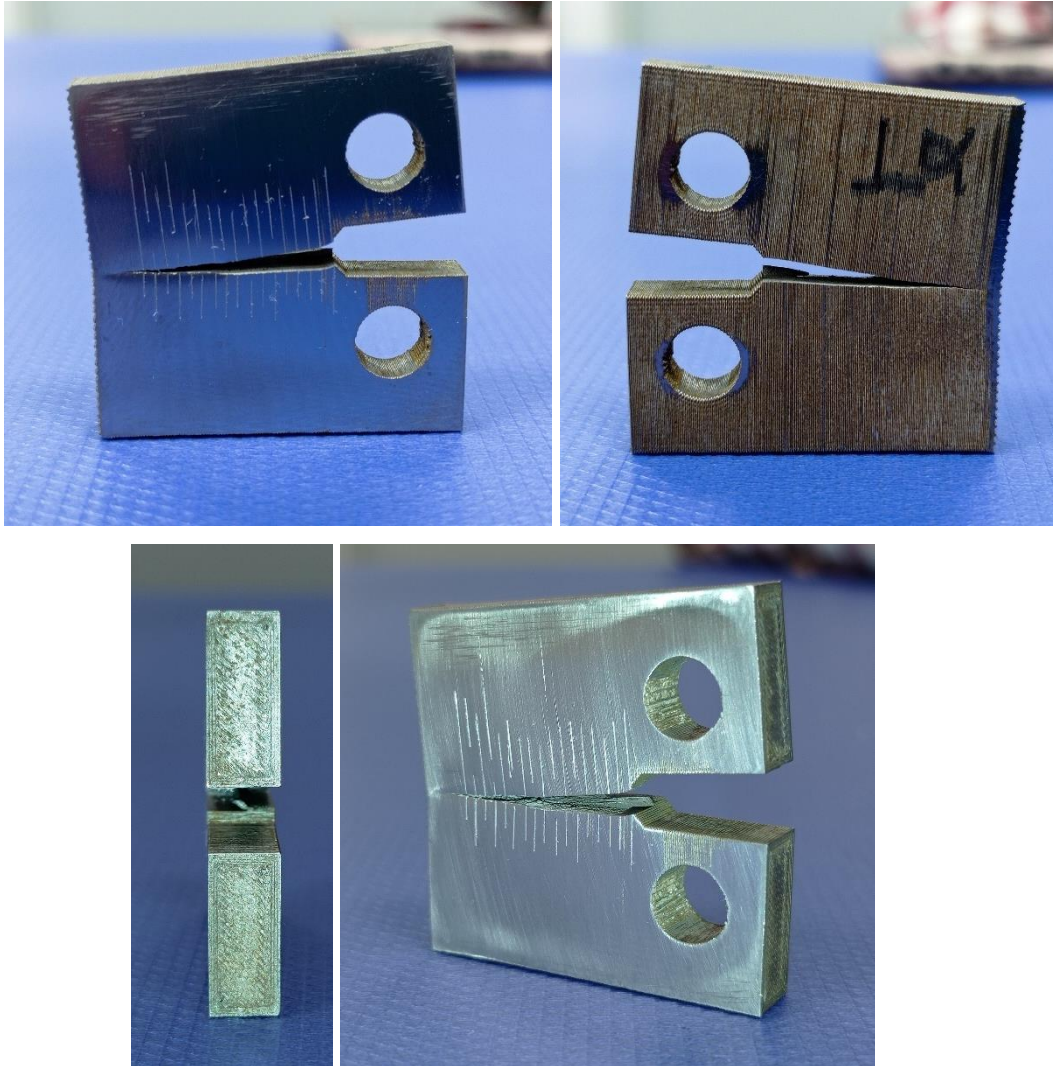


Figura 48: fotografías del resultado final del ensayo de fatiga, probeta con ángulo de 90°.

Aunque el ensayo acabó con el fallo de la pieza, la grieta no llegó a extenderse a lo largo de toda la pieza, en la cara pulida se puede apreciar a simple vista la deformación alrededor de la grieta.

En las siguientes figuras se muestran las micrografías obtenidas de las probetas embutidas; no se les realizó ningún tratamiento posterior al embutido, por lo que no se puede apreciar el grano, pero se pueden observar los defectos entre las capas de material depositadas durante la fabricación.

En la figura 49 el corte de la probeta es paralelo a las capas de la pieza, por lo que se pueden ver mayores defectos entre las capas de material, en las esquinas se puede ver también el patrón de deposición concéntrico. Debido a este patrón se forman grietas y huecos en los que se acumula el aire entre los hilos de filamento depositado durante a fabricación.



Figura 49: micrografía de la probeta de fatiga, aquí se pueden ver claramente las capas formadas por el filamento metálico y hay algo de separación entre ellas.

En la figura 50 el corte de la probeta es perpendicular a las capas de la pieza, en la imagen se puede ver que el grosor de capa resultante en la probeta es de aproximadamente 0.15 mm y deja un patrón muy característico como el ya visto en la figura 44. Este patrón en la pieza también indica que la pieza no tiene una densidad del 100%, esta debería ser de un 97% según lo indicado por la ficha del fabricante

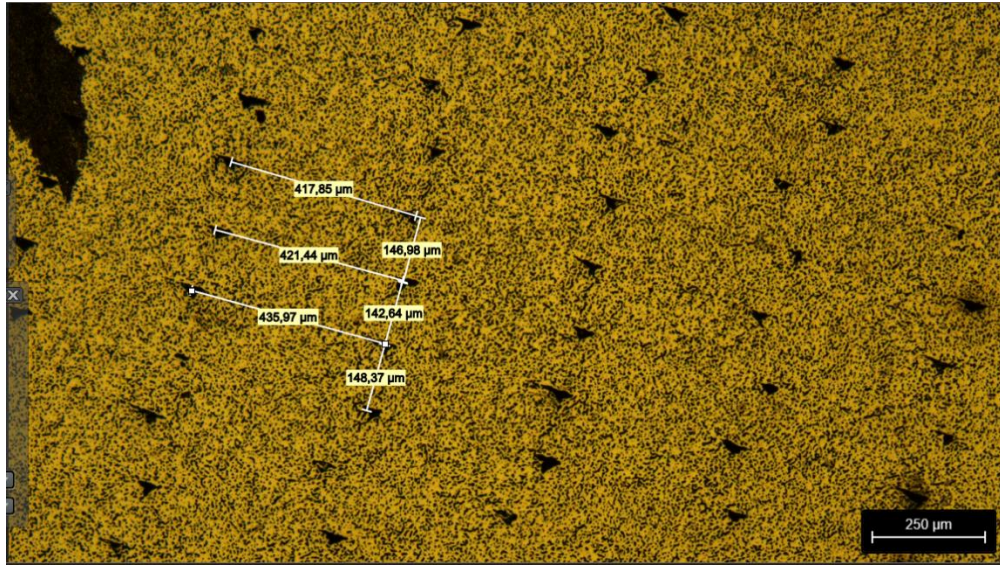


Figura 50: micrografía de la probeta de fatiga, se puede ver la distribución, bastante uniforme, de defectos sobre la superficie preparada.

Con estas observaciones en la estructura del material podemos ver el porqué de la anisotropía resultante de ensayar materiales depositados con distinto ángulo con respecto al eje de carga de la probeta.

Por último, en la siguiente figura podemos observar la porosidad de las probetas de tracción, lo que es determinante en las características mecánicas de las piezas fabricadas y por lo que se puede ver la densidad de la pieza no es del 97%.

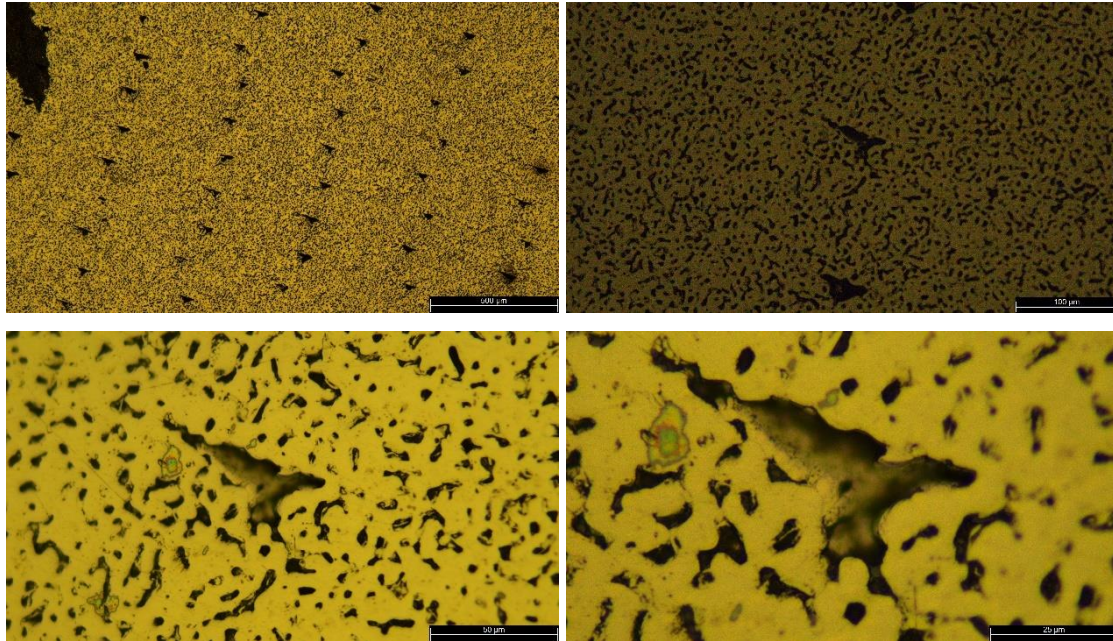


Figura 51: vistas de la porosidad del centro de la probeta de tracción con aumentos de x5, x20, x50 y x100.

Por último, aunque no suponga un análisis riguroso de la porosidad del material debido a que esto no se contempló para el análisis se ha hecho un cálculo aproximado de la porosidad de estas micrografías, binarizando las imágenes y viendo el porcentaje de cada una que queda resaltada para aproximar la superficie que queda vacía.

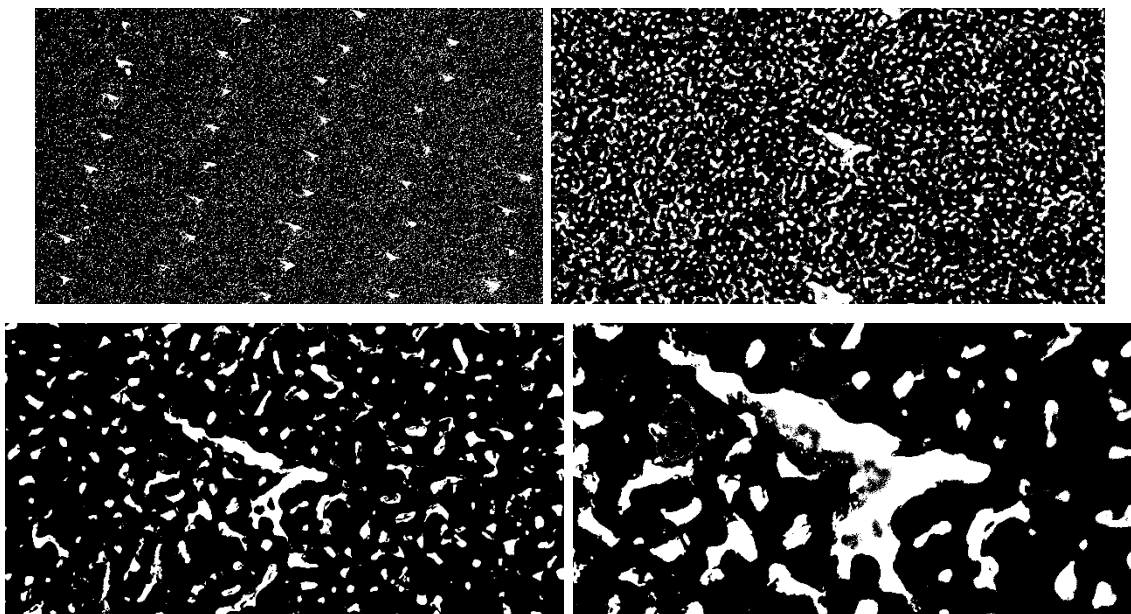


Figura 52: micrografías binarizadas con aumentos de x5, x20, x50 y x100.



Los porcentajes de superficie blanca en cada micrografía son: 12.49%, 19.31%, 13.38% y 20.87%. Estos porcentajes de porosidad son altos, pero no serían la única razón para las propiedades mecánicas de la probeta, esta porosidad se encuentra principalmente en el interior de la pieza, las paredes no son tan porosas.

## 7. Conclusiones

El desarrollo del programa para la captura de imágenes durante los ensayos ha mostrado un gran potencial en la automatización y flexibilidad en el análisis de fatiga, destacándose como una solución práctica y económica. Aunque inicialmente el proceso de captura de imágenes es semiautomático, ha demostrado ser robusto y adaptable a distintos hardware, con un rendimiento notablemente estable en ensayos de larga duración y con un consumo de recursos reducido. En un sistema con almacenamiento SSD, el tiempo de captura tiene una variación mínima (menos de 0.002 s para un intervalo de 0.2 s), lo cual resulta en una precisión alta. Además, gracias a que el software está basado en Python, cuenta con la ventaja de ser un proyecto de código abierto, lo que facilita futuras modificaciones y el acceso a una extensa comunidad de desarrolladores y recursos para su mejora continua.

Una evolución natural del programa podría incluir la automatización total de las capturas, eliminando la intervención manual al sincronizarse directamente con parámetros específicos del ensayo, como el número de ciclos, frecuencia y duración de las rampas de carga. Esta mejora llevaría el software a un nivel comparable con opciones comerciales, pero a un coste significativamente inferior, y con el beneficio de una personalización completa adaptada a las necesidades específicas de los ensayos.

Respecto a la medición, aunque el proceso actual requiere del uso de software de análisis de imágenes (ImageJ), parte del software desarrollado permite trabajar con la detección de contornos y medición automática, logrando resultados que con algunas mejoras podría obtener resultados comparables en precisión a soluciones comerciales. El mayor reto a la hora de la medición, tanto automatizada como visual, ha sido el ruido generado por el acabado superficial de las probetas; este es un aspecto que podría mejorarse mediante ajustes en las condiciones de grabación, mejorando el acabado de las probetas o la resolución del equipo. Así, el potencial del programa para la automatización de la medida es prometedor, lo que abriría la posibilidad de usarlo en un sistema completo de análisis de grieta sin necesidad de un software comercial, permitiendo alcanzar un alto grado de precisión y flexibilidad.



Todos lo resultante de este proyecto puede ser utilizado también en el desarrollo de un modelo de aprendizaje automatizado que, con una base de datos lo suficientemente grande, en el entorno de Python se podría entrenar un modelo para medir las capturas, aunque esto estaría sujeto a la obtención de datos fiables para el entrenamiento del modelo.

Los resultados de las pruebas de tracción han proporcionado información valiosa sobre la estructura y propiedades mecánicas de las probetas impresas. Aunque se han observado variaciones en el módulo elástico y en la resistencia comparadas con las propiedades especificadas por el fabricante, esto podría estar relacionado con el proceso de fabricación aditiva y su sinterización. A pesar de estas variaciones, las probetas mostraron un comportamiento de rotura frágil, esperado para este tipo de material, y los resultados sugieren que, con mejoras en el proceso de sinterizado, se podría obtener una mayor densidad estructural sin comprometer la precisión geométrica.

En los ensayos de fatiga, aunque la cantidad de datos obtenidos fue limitada, se ha logrado recolectar información precisa sobre el crecimiento de grieta en una de las probetas, lo que evidencia el potencial de estas técnicas para su uso en futuros ensayos e investigaciones. El comportamiento observado en las probetas fue similar al de un acero D2 fabricado de manera tradicional, aunque el ritmo de crecimiento de grieta ha sido algo más inestable en las fases iniciales, debido tanto a fenómenos como el atravesar fronteras de grano, que se da en probetas fabricadas por métodos tradicionales, como posiblemente a la estructura interna y acabado de la pieza, algo menos densa que un bloque de acero mecanizado y con más imperfecciones de tamaño significativo.

Respecto a la anisotropía, al haber probado únicamente probetas impresas en la misma dirección con respecto a las fuerzas a las que se sometían en los ensayos, no se pueden extraer conclusiones sobre el comportamiento del material. Sin embargo, las diferencias observadas en las primeras probetas impresas resaltan la importancia del control en el proceso de sinterizado para minimizar defectos estructurales y microestructurales que afecten al comportamiento del material.

En conclusión, la implementación del software desarrollado ha sido exitosa, logrando automatizar y realizar el proceso de captura y análisis en los ensayos de fatiga. Los



resultados obtenidos muestran un avance significativo en el análisis automatizado, permitiendo una recolección de datos confiable y adaptable a diferentes condiciones de ensayo. Con el potencial de futuras mejoras, como la automatización completa de la captura y el refinamiento en la detección de contornos, este software tiene el potencial de alcanzar una precisión comparable a soluciones comerciales, a un coste notablemente inferior. Así, se abre un camino hacia desarrollos aún más precisos y eficaces en el campo del análisis de fatiga, con un enfoque en la flexibilidad y personalización que facilita su uso en diversas aplicaciones industriales.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## 8. Bibliografía

- «ASTM 647: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates». (2005).
- «ASTM E399 - 12: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials». (2012).
- «ASTM E1820 - 20: Test Method for Measurement of Fracture Toughness». (2020).
- «ASTM F2792 – 12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies». (2012).
- Crump, S. Scott. (1989). «United States Patent US5121329A: Apparatus And Method For Creating Three-Dimensional Objects».
- Arndt, Eric, Lyon, Gayla, y Zguris, Zachary. (2017). «United States Patent 10316213B1: Dual-Cure Resins And Related Methods».
- Feygin, Michael, Shkolnik, Alexandr, Diamond, Michael N. y Dvorskiy, Emmanuil. (1992). «United States Patent US005730817A: Laminated Object Manufacturing System».
- «Hoja informativa de materiales metálicos: D2 Acero para herramientas». <<https://markforged.com/es/materials/metals/a2-d2-tool-steel>>. [Consulta: 25/11/2024]
- Hull, Charles W. (1984). «United States Patent US4575330B1: Apparatus For Production Of Three-Dimensional Objects By Stereo Photography».
- «ISO 6892-1: Materiales metálicos ensayos de tracción Parte 1: método de ensayo a temperatura ambiente». (2020).
- Johnsson, Johanna, Tufvesson, Therese y Costa, José. (2023). «Characterization of D2 Tool Steel fabricated thru Fused Filament Fabrication Process». *Universidade do Porto Journal of Engineering*. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia: 181-93. doi:10.24840/2183-6493\_009-003\_001844.
- Moreno Morales, M<sup>a</sup> Belén. (2002). «Variabilidad en el crecimiento de grietas por fatiga bajo cargas aleatorias». Málaga: Universidad de Málaga.
- Richard, Hans Albert, y Sander, Manuela. (2012). «Solid Mechanics and Its Applications Fatigue Crack Growth Detect-Assess-Avoid». <<http://www.springer.com/series/6557>>. [Consulta: 25/11/2024].
- Schlitz, Walter. (1996). «A HISTORY OF FATIGUE». En ~ *Pergamon Engineering Fracture Mechanics*, 54:263-300. Pergamon.
- Silva Ribeiro, Alfredo, Correia, José A.F.O., y de Jesus, Abílio M P. (2010). «Evolution Of Fatigue History».



<<https://www.researchgate.net/publication/299397997>>. [Consulta: 25/11/2024].

Singh, Amritbir, y Harpreet Singh. (2022). «Metal Additive Manufacturing: From History to Applications». En , 3-32. doi:10.1007/978-3-030-89401-6\_1.

«Sistema Metal X». <<https://markforged.com/es/3d-printers/metal-x>>. [Consulta: 25/11/2024].

Wohlers, Terry et al. 2016. «Wohlers Report: History of additive manufacturing». En *Wohlers Report 2016*. Wohlers Associates. <<https://wohlersassociates.com/wp-content/uploads/2022/08/history2015.pdf>>. [Consulta: 25/11/2024].

## 9. Anexos



### Anexo I

Hoja de datos	
---------------	--

<b>Probeta</b>	Probeta cilíndrica de tracción A
----------------	----------------------------------

<b>Material</b>	Acero de herramienta D2
-----------------	-------------------------

<b>Dirección de impresión</b>	Paralela a la fuerza de tracción
-------------------------------	----------------------------------

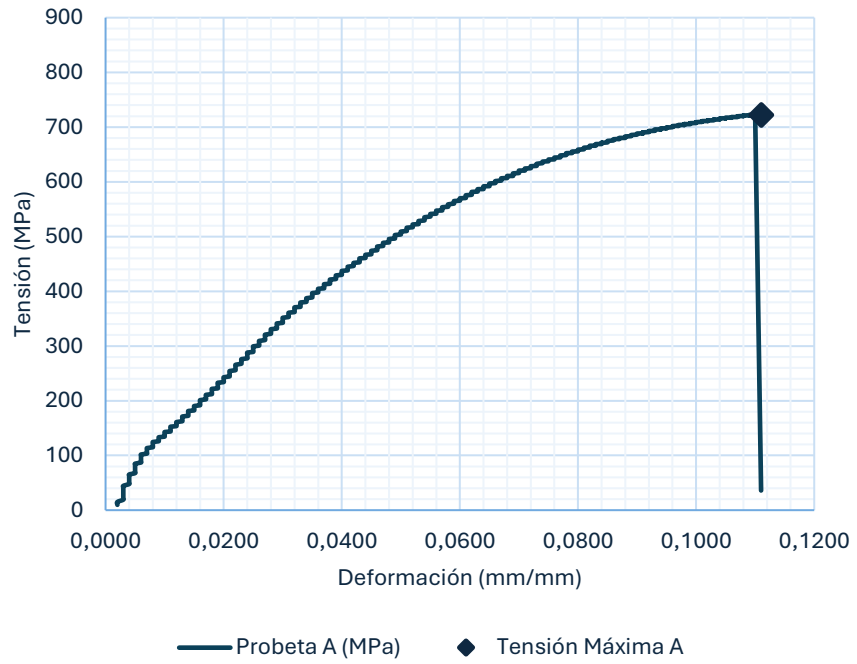
<b>Imágenes</b>	Antes del ensayo	
	Después del ensayo	

<b>Medidas</b>	Diámetro agarre 1 (mm)	Diámetro central 1 (mm)	Diámetro central 2 (mm)	Diámetro central 3 (mm)	Diámetro agarre 2 (mm)	L (mm)	L2 (mm)
	12,27	8,1	8,14	8,15	12	137,46	48
	12,4	8,2	8,25	8,32	12,42	136,16	48

<b>Datos de la máquina de tracción</b>	Diámetro	Carga máxima	Tensión máxima	Deformación en la ruptura	Módulo	Carga de ruptura
	mm	N	MPa	mm/mm	MPa	N
	8,15	37701,441	722,7	0,11	14228,97	37701,441

Representación de  
los datos  
obtenidos

### Tensión / Deformación





**Hoja de datos**

<b>Probeta</b>	Probeta cilíndrica de tracción B
----------------	----------------------------------

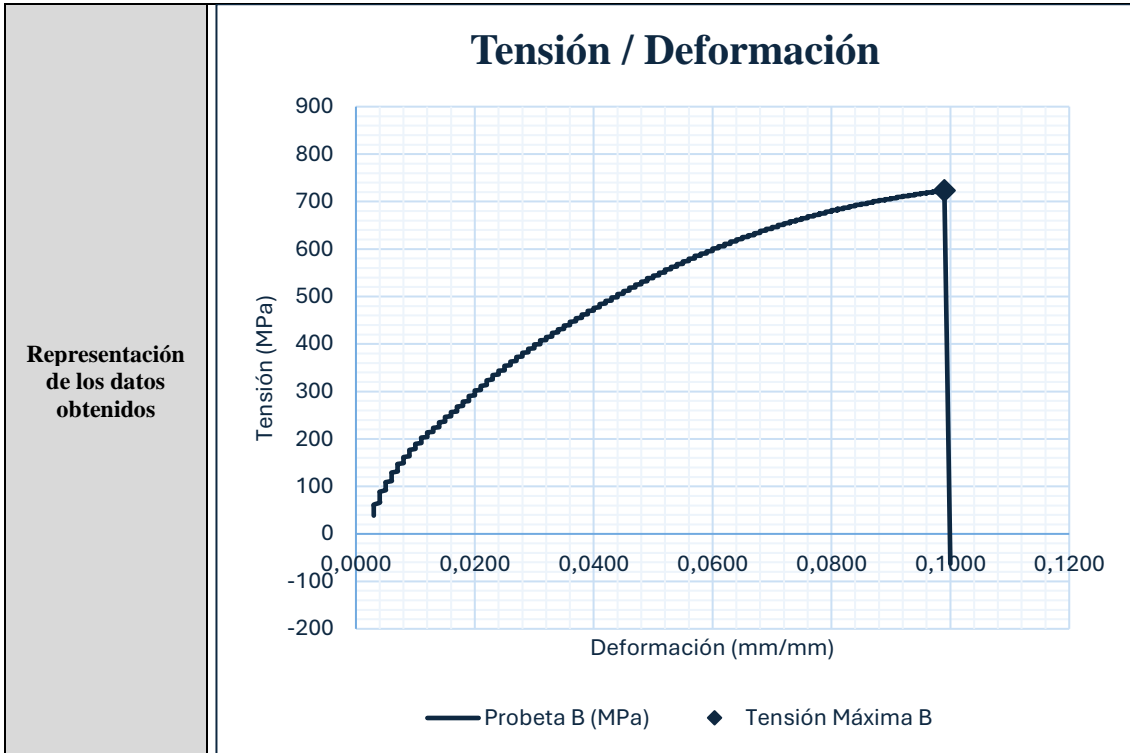
<b>Material</b>	Acero de herramienta D2
-----------------	-------------------------

<b>Dirección de impresión</b>	Paralela a la fuerza de tracción
-------------------------------	----------------------------------

<b>Imágenes</b>	Antes del ensayo		
	Después del ensayo		

<b>Medidas</b>	Diámetro agarre 1 (mm)	Diámetro central 1 (mm)	Diámetro central 2 (mm)	Diámetro central 3 (mm)	Diámetro agarre 2 (mm)	L (mm)	L2 (mm)	
		12,1	8,08	8,15	8,06	12,25	136,13	48
		12,5	8,43	8,24	8,22	12,75	137,38	48

<b>Datos de la máquina de tracción</b>	Diámetro	Carga máxima	Tensión máxima	Deformación en la ruptura	Módulo	Carga de ruptura
	mm	N	MPa	mm/mm	MPa	N
	8,15	37727,239	723,2	0,099	19278,37	37727,239





**Hoja de datos**

<b>Probeta</b>	Probeta cilíndrica de tracción C
----------------	----------------------------------

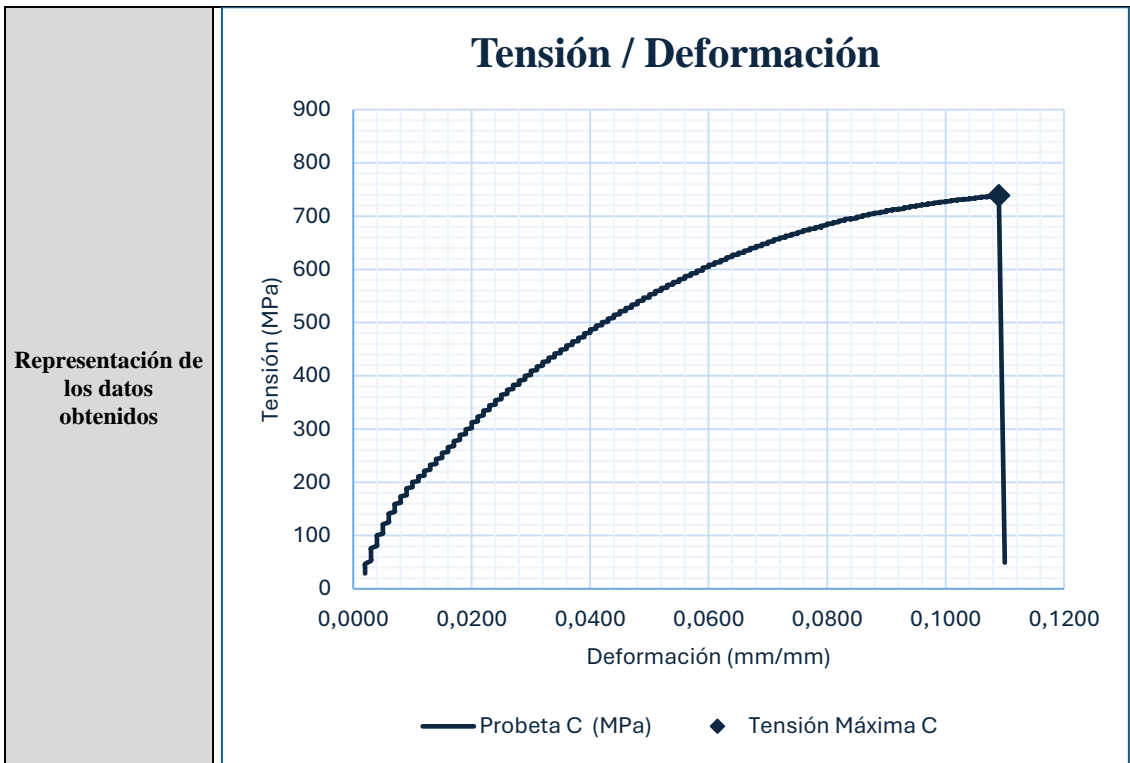
<b>Material</b>	Acero de herramienta D2
-----------------	-------------------------

<b>Dirección de impresión</b>	Paralela a la fuerza de tracción
-------------------------------	----------------------------------

<b>Imágenes</b>	Antes del ensayo	
	Después del ensayo	

Medidas	Diámetro agarre 1 (mm)	Diámetro central 1 (mm)	Diámetro central 2 (mm)	Diámetro central 3 (mm)	Diámetro agarre 2 (mm)	L (mm)	L2 (mm)
	12,25	8,11	8,4	8,13	12,13	137,59	47,68
	12,45	8,25	8,13	8,22	12,45	135,99	47,68

Datos de la máquina de tracción	Diámetro	Carga máxima	Tensión máxima	Deformación en la ruptura	Módulo	Carga de ruptura
	mm	N	MPa	mm/mm	MPa	N
	8,15	38512,494	738,2	0,109	21613,371	38512,494



**Hoja de datos**

<b>Probeta</b>	Probeta cilíndrica de tracción D
----------------	----------------------------------

<b>Material</b>	Acero de herramienta D2
-----------------	-------------------------

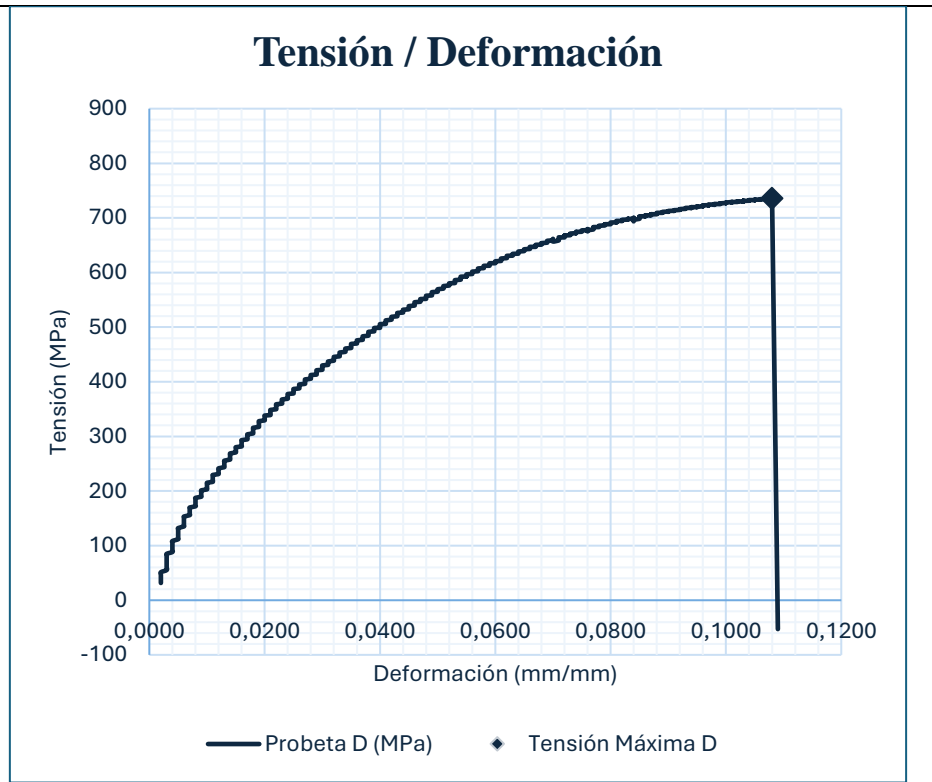
<b>Dirección de impresión</b>	Paralela a la fuerza de tracción
-------------------------------	----------------------------------

<b>Imágenes</b>	Antes del ensayo		
	Después del ensayo		

Medidas	Diámetro agarre 1 (mm)	Diámetro central 1 (mm)	Diámetro central 2 (mm)	Diámetro central 3 (mm)	Diámetro agarre 2 (mm)	L (mm)	L2 (mm)
	12	8,1	8	8	12,2	135,9	48
	12,3	8,2	8,2	8,2	12,4	135,9	48

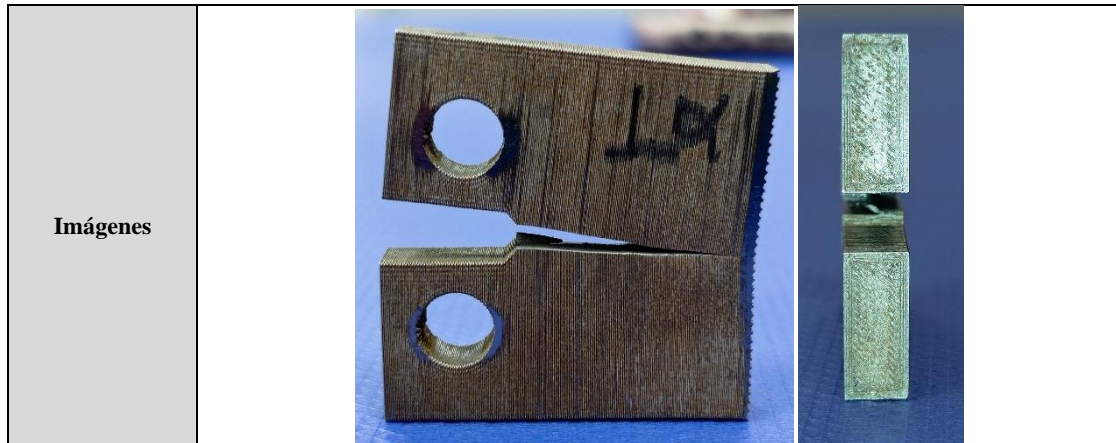
Datos de la máquina de tracción	Diámetro	Carga máxima	Tensión máxima	Deformación en la ruptura	Módulo	Carga de ruptura
	mm	N	MPa	mm/mm	MPa	N
	8,15	38369,26	735,5	0,108	23558,767	38369,26

Representación  
de los datos  
obtenidos



**Hoja de datos**

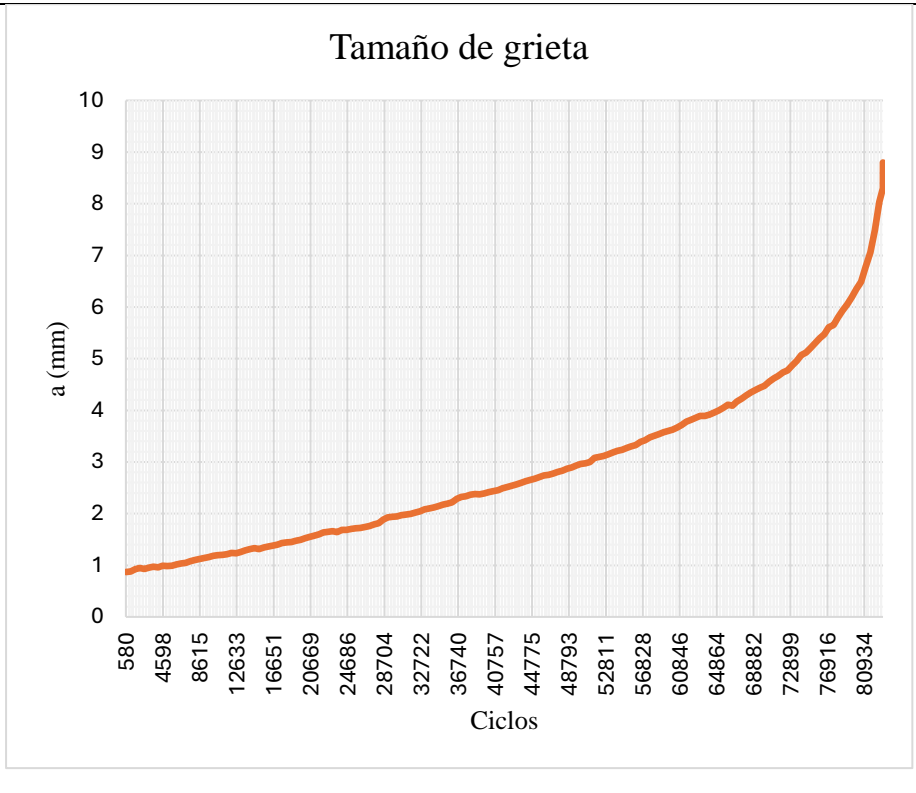
<b>Probeta</b>	Probeta de fatiga CT: <b>D2CD 1BDam</b>
<b>Material</b>	Acero de herramienta D2
<b>Dirección de impresión</b>	Paralela a la fuerza de tracción



Medidas	Alto (mm)	Largo mínimo (mm)	Largo máximo (mm)	Ancho mínimo (mm)	Ancho máximo (mm)
	30,6	32,1	32,1	6,3	3,08

<b>Características del ensayo</b>	Una vez completada la iniciación de grieta se procede a cada 500 ciclos hacer una rampa para poder observar la grieta con precisión. Durante esta parte del ensayo se pueden a recopilar datos, sobre el crecimiento de grieta con la aplicación desarrollada para el proyecto. Amplitud de carga desde los 0,4 a 4 kN a 10Hz. A los 151.442 ciclos se finaliza esta parte del ensayo, con una grieta de unos 6 mm contando con el notch de iniciación de grieta de la pieza.
-----------------------------------	---

Representación  
de los datos  
obtenidos





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

