



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Ingeniería de los Procesos de Fabricación

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Caracterización de aleaciones metálicas dúctiles en probetas
de fabricación aditiva sometidas a flexión.**

Máster en Ingeniería Industrial

Autor: Carlos Martín Jiménez

Tutor: Francisco de Sales Martín Fernández

Cotutor: Óscar Rodríguez Alabanda

MÁLAGA, septiembre de 2025

RESUMEN

La fabricación aditiva de materiales metálicos se está empezando a consolidar como una alternativa prometedora con respecto a procesos de fabricación convencionales, permitiendo la producción de geometrías complejas evitando desperdicio de material, tiempo y dinero. En este trabajo se aborda la caracterización mecánica de probetas metálicas fabricadas mediante fabricación aditiva y expuestas a un ensayo de flexión en tres puntos siguiendo las directrices de la norma UNE-EN ISO 7438:2021.

Se fabricaron 27 probetas, a través del sistema de impresión Metal X con metodología ADAM, combinadas por tres materiales (acero para herramientas H13 recocido, inconel 625 y cobre), junto a tres patrones de relleno (sólido, triangular y *gyroid*) y distintos números de capas exteriores en la parte superior e inferior y lateral (4 arriba y abajo y 2 en los laterales, 6 - 4 y 8 - 6 respectivamente), realizando 9 combinaciones y 3 probetas por combinación. Se realizan las medidas de las dimensiones de las probetas y su rugosidad tras los procesos de impresión, lavado y sinterizado.

Posteriormente se realizan los ensayos de flexión en la máquina universal Servosis ME-402, registrando curvas carga-desplazamiento, carga máxima y resistencia a la rotura. Los resultados muestran que las probetas fabricadas de acero para herramientas H13 recocido presentan la mayor resistencia, seguidas de las fabricadas de inconel 625 y por último las de cobre. El patrón de relleno sólido se identifica como el más resistente, mientras que el patrón de relleno *gyroid* no resulta adecuado para materiales menos dúctiles como el acero para herramientas H13 e inconel 625. Con respecto al número de capas exteriores, cuanto más capas existen, mas resistente es la probeta.

La fabricación aditiva demuestra ser una alternativa competitiva para componentes sometidos a flexión empleando las configuraciones de material, relleno y número de capas exteriores adecuadas.

Palabras Clave: Fabricación Aditiva, Flexión, H13, Inconel, Cobre, Relleno, ADAM, Metal X

ABSTRACT

Additive manufacturing of metallic materials is beginning to consolidate as a promising alternative to conventional manufacturing processes, allowing the production of complex geometries without waste of material, time and money. This work deals with the mechanical characterization of metal specimens manufactured by additive manufacturing and exposed to a three-point bending test according to the guidelines of UNE-EN ISO 7438:2021.

A total of 27 specimens were manufactured, through the Metal X printing system with ADAM methodology, combined by three materials (annealed tool steel H13, inconel 625 and copper), along with three filling patterns (solid, triangular and gyroid) and different numbers of outer layers on the top, bottom and side (4 up and down and 2 on the sides, 6 - 4 and 8 - 6 respectively), performing 9 combinations and 3 test pieces per combination. Measurements of sample dimensions and roughness are made after the printing, washing and sintering processes.

The bending tests are then carried out on the universal machine Servosis ME-402, recording load-displacement curves, maximum load and breaking strength. The results show that specimens made of annealed H13 tool steel have the highest strength, followed by those made of inconel 625 and finally those made of copper. The solid fill pattern is identified as the strongest, while the gyroid fill pattern is not suitable for less ductile materials such as H13 tool steel and inconel 625. With regard to the number of outer layers, the more layers there are, the stronger the test piece.

Additive manufacturing proves to be a competitive alternative for flexed components by using the appropriate material, filler and number of outer layers configurations.

Keywords: Additive Manufacturing, Bending, H13, Inconel, Copper, Filling, ADAM, Metal X

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres por estar a mi lado en cada etapa de este camino, que gracias a su esfuerzo lo han hecho más a meno, apoyándose en todo lo que hacía y en cada una de mis decisiones.

A mi hermana Elena, persona que lleva conmigo toda mi vida , ayudándome en mis momentos más complicados, siendo siempre mi fiel consejera y confiando siempre en mí.

Agradecer también a mi compañera de vida, mi pareja, Elena de la Rosa, que me ha acompañado en todo este camino, siendo mi día a día y confiando en mí ni cuando yo mismo lo hacía, siendo mi apoyo incondicional.

También a ese grupo de amigos, que, entre broma y broma, a lo largo de todos estos años, siempre confiaron en mí y estaban seguros de que lo conseguiría.

Por último, agradecer a mis tutores por la confianza depositada en mí para poder realizar con ellos este trabajo.

ÍNDICE

1. OBJETIVO.....	19
2. ALCANCE.....	19
3. ANTECEDENTES.....	21
4. INTRODUCCIÓN.....	23
4.1 Fabricación Aditiva.....	23
4.1.1 Procesos.....	25
4.1.2 Materiales.....	30
4.1.3 Equipos.....	37
4.2 Propiedades Mecánicas/Ensayos.....	39
4.2.1 Comportamiento a Flexión.....	41
5. DESARROLLO DEL TRABAJO.....	43
5.1 Metodología de Fabricación.....	43
5.1.1 Diseño de las Probetas.....	43
5.1.2 Proceso de Fabricación.....	46
5.2 Metodología de Ensayo.....	54
5.2.1 Metodología de Ensayo.....	54
5.2.2 Equipo de Ensayo.....	54
5.2.3 Parámetros de Ensayo.....	55
5.2.4 Protocolo de Ensayo.....	57
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	61
6.1 Caracterización de las probetas.....	61
6.2 Ensayo de flexión.....	66
7. CONCLUSIONES.....	79
8. LÍNEAS FUTURAS.....	81
9. BIBLIOGRAFÍA.....	83

10. ANEXOS.....	87
10.1 Fichas Técnicas de los Materiales	87
10.2 Fichas Técnicas del Sistema de Impresión	90
10.3 Fichas Técnicas de la Máquina de Ensayo	93
10.4 Cálculos y Tablas	94
10.4.1 Dimensiones de las Probetas	94
10.4.2 Rugosidad de las Probetas	98
10.5 Ficha de las probetas.....	102

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Primera versión RepRap Darwin (2008). Fuente RepRap Darwin – RepRap.	24
Ilustración 2: Artículos de FA publicados. Fuente: Liu et al. (2021).....	24
Ilustración 3: Esquema de un equipo de Binder Jetting. Fuente:(Li et al., 2021).	25
Ilustración 4: Esquema Sistema DED. Fuente: (Pontes, 2021).	26
Ilustración 5: Esquema proceso SLS. Fuente: Kumar et al. (2023).	26
Ilustración 6: Esquema LOM. Fuente: Kumar et al. (2023).....	27
Ilustración 7: Esquema de técnica VPP. Fuente: Kumar et al. (2023).....	28
Ilustración 8: Esquema de la técnica PolyJet. Fuente: (Pandey et al., 2024).	28
Ilustración 9: Esquema proceso ME. Fuente: Golab et al. (2022).....	29
Ilustración 10: Esquema de FA mediante tecnología ADAM. Fuente: Galati & Minetola (2019)	30
Ilustración 11: Pieza Fabricada de Acero H13. Fuente: Markforged (s. f.).....	32
Ilustración 12: Pieza realizada de Cobre. Fuente: Markforged (s. f.).....	34
Ilustración 13: Pieza fabricada con Inconel 625. Fuente: Markforged (s. f.).....	35
Ilustración 14: Sistema de impresión Metal X. Fuente: Wurth Additive Group (s. f.)...	37
Ilustración 15: Acero para herramienta H13 preparado para ser introducido en el sistema de impresión Metal X. Fuente: Markforged (s. f.-a).	38
Ilustración 16: Esquema proceso ADAM mediante equipo Metal X. Fuente: Opoz et al. (2024).	39
Ilustración 17: Dimensiones de la probeta. Fuente: Propia.	44
Ilustración 18: Probeta modelada en el software SolidWorks. Fuente: Propia.....	46
Ilustración 19: Vistas de la probeta modelada. Fuente: Propia.....	46
Ilustración 20: Probeta importada en el programa Eiger. Fuente: Propia.....	47
Ilustración 21: Simulación de la impresión de la probeta HT6H4V. Fuente: Propia.	48
Ilustración 22: Simulación de la bandeja de la impresora Metal X. Fuente: Propia.	49

Ilustración 23: Probetas impresas en el interior de la impresora Metal X. Fuente: Propia.	49
Ilustración 24: Pesaje de la probeta. Fuente: Propia.....	50
Ilustración 25: Proceso de lavado. Fuente: Propia.	51
Ilustración 26: Carga de las probetas de cobre en el horno SINTER-1. Fuente: Propia.	52
Ilustración 27: Probetas una vez finalizadas todas las fases. De izquierda a derecha: Acero H13, Cobre, Inconel 625. Fuente: Propia.	53
Ilustración 28: Máquina universal de ensayos Servosis ME-402 con la configuración de ensayo de flexión en 3 puntos. Fuente: Propia.	55
Ilustración 29: Montaje de la máquina de ensayo a 3 puntos. Fuente: Propia.	56
Ilustración 30: Interfaz del software PDC2K. Fuente: Propia.....	57
Ilustración 31: Evolución del proceso de ensayo de flexión en diferentes instantes. Inicial (a), final (e). Fuente: Propia.....	58
Ilustración 32: Vista de la zona inferior de la probeta para la detección de grietas. Fuente: Propia.....	58
Ilustración 33: Rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ-210. Fuente: Propia.	63
Ilustración 34: Valores para el cálculo del ángulo de doblado. Fuente : UNE-EN ISO 7438 (2021).	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de la composición química del acero para herramientas H13 entre Markforged y Carpenter Additive.....	33
Tabla 2: Propiedades físicas acero para herramienta H13 según Markforged.....	33
Tabla 3: Comparación de la composición química del cobre entre Markforged y Carpenter Additive.	34
Tabla 4: Propiedades físicas del cobre según Markforged.	35
Tabla 5: Comparación de la composición química del inconel 625 entre Markforged y Carpenter Additive.....	36
Tabla 6: Propiedades físicas del inconel 625 según Markforged.	36

Tabla 7: Cuadrado Latino de Taguchi con las Diferentes Variables y su Codificación..	45
Tabla 8: Parámetros de impresión.	48
Tabla 9: Variación de la masa de las probetas tras l proceso de lavado.....	52
Tabla 10: Tiempo de Fabricación de cada probeta.	53
Tabla 11: Parámetros de ensayo en el software PCD2K.	56
Tabla 12: Medidas de las dimensiones de la probeta HS4H2V-1.....	62
Tabla 13: Dimensiones medias de las probetas.	63
Tabla 14: Medidas de la rugosidad para la probeta HS4H2V-1.	64
Tabla 15: Ra y Rz medias de todas las probetas.....	65
Tabla 16: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas HS4H2V.....	72
Tabla 17: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas HT6H4V.	72
Tabla 18: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas IS6H4V.	73
Tabla 19: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas IT8H6V.	73
Tabla 20: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas CS8H6V.....	73
Tabla 21: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas CT4H2V.....	74
Tabla 22: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas CG6H4V.	74
Tabla 23: Resultados fallidos de la carga máxima y grado de curvatura de las probetas HG8H2V.	74
Tabla 24: Resultados fallidos de la carga máxima y grado de curvatura de las probetas IG4H2V.....	75
Tabla 25: Resultados medios de la resistencia a la rotura de cada conjunto de probetas.	75
Tabla 26: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas de acero para herramienta H13 recocido.	76
Tabla 27: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas de inconel 625. ...	76
Tabla 28: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas de cobre.	76

Tabla 29: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas de patrón de relleno sólido.	77
Tabla 30: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas de patrón de relleno triangular.	77
Tabla 31: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas con capas exteriores 4H2V.	78
Tabla 32: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas con capas exteriores 6H4V.	78
Tabla 33: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas con capas exteriores 8H6V	78
Tabla 29: Medición de las dimensiones de la probeta HS4H2V-1.	94
Tabla 30: Medición de las dimensiones de la probeta HS4H2V-2.	94
Tabla 31: Medición de las dimensiones de la probeta HS4H2V-3.	94
Tabla 32: Medición de las dimensiones de la probeta HT6H4V-1.	94
Tabla 33: Medición de las dimensiones de la probeta HT6H4V-2.	94
Tabla 34: Medición de las dimensiones de la probeta HT6H4V-3.	94
Tabla 35: Medición de las dimensiones de la probeta HG8H6V-1.	95
Tabla 36: Medición de las dimensiones de la probeta HG8H6V-2.	95
Tabla 37: Medición de las dimensiones de la probeta HG8H6V-3.	95
Tabla 38: Medición de las dimensiones de la probeta IS6H4V-1.	95
Tabla 39: Medición de las dimensiones de la probeta IS6H4V-2.	95
Tabla 40: Medición de las dimensiones de la probeta IS6H4V-3.	95
Tabla 41: Medición de las dimensiones de la probeta IT8H6V-1.	95
Tabla 42: Medición de las dimensiones de la probeta IT8H6V-2.	95
Tabla 43: Medición de las dimensiones de la probeta IT8H6V-3.	96
Tabla 44: Medición de las dimensiones de la probeta IG4H2V-1.	96
Tabla 45: Medición de las dimensiones de la probeta IG4H2V-2.	96

Tabla 46: Medición de las dimensiones de la probeta IG4H2V-3.....	96
Tabla 47: Medición de las dimensiones de la probeta CS8H6V-1.	96
Tabla 48: Medición de las dimensiones de la probeta CS8H6V-2.	96
Tabla 49: Medición de las dimensiones de la probeta CS8H6V-3.	96
Tabla 50: Medición de las dimensiones de la probeta CT4H2V-1.	96
Tabla 51: Medición de las dimensiones de la probeta CT4H2V-2.	97
Tabla 52: Medición de las dimensiones de la probeta CT4H2V-3.	97
Tabla 53: Medición de las dimensiones de la probeta CG6H4V-1.....	97
Tabla 54: Medición de las dimensiones de la probeta CG6H4V-2.....	97
Tabla 55: Medición de las dimensiones de la probeta CG6H4V-1.....	97
Tabla 56: Medición de la rugosidad de la probeta HS4H2V-1.	98
Tabla 57: Medición de la rugosidad de la probeta HS4H2V-2.	98
Tabla 58: Medición de la rugosidad de la probeta HS4H2V-3.	98
Tabla 59: Medición de la rugosidad de la probeta HT6H4V-1.....	98
Tabla 60: Medición de la rugosidad de la probeta HT6H4V-2.....	98
Tabla 61: Medición de la rugosidad de la probeta HT6H4V-3.....	98
Tabla 62: Medición de la rugosidad de la probeta HG8H6V-1.	99
Tabla 63: Medición de la rugosidad de la probeta HG8H6V-2.	99
Tabla 64: Medición de la rugosidad de la probeta HG8H6V-3.	99
Tabla 65: Medición de la rugosidad de la probeta IS6H4V-1.....	99
Tabla 66: Medición de la rugosidad de la probeta IS6H4V-2.....	99
Tabla 67: Medición de la rugosidad de la probeta IS6H4V-3.....	99
Tabla 68: Medición de la rugosidad de la probeta IT8H6V-1.	99
Tabla 69: Medición de la rugosidad de la probeta IT8H6V-2.	99
Tabla 70: Medición de la rugosidad de la probeta IT8H6V-3.	100
Tabla 71: Medición de la rugosidad de la probeta IG4H2V-1.....	100

Tabla 72: Medición de la rugosidad de la probeta IG4H2V-2.....	100
Tabla 73: Medición de la rugosidad de la probeta IG4H2V-3.....	100
Tabla 74: Medición de la rugosidad de la probeta CS8H6V-1.....	100
Tabla 75: Medición de la rugosidad de la probeta CS8H6V-2.....	100
Tabla 76: Medición de la rugosidad de la probeta CS8H6V-3.....	100
Tabla 77: Medición de la rugosidad de la probeta CT4H2V-2.....	100
Tabla 78: Medición de la rugosidad de la probeta CT4H2V-2.....	101
Tabla 79: Medición de la rugosidad de la probeta CT4H2V-3.....	101
Tabla 80: Medición de la rugosidad de la probeta CG6H4V-1.....	101
Tabla 81: Medición de la rugosidad de la probeta CG6H4V-2.....	101
Tabla 82: Medición de la rugosidad de la probeta CG6H4V-3.....	101

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Curva fuerza desplazamiento de las probetas HS4H2V.....	67
Gráfica 2: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas HT6H4V.....	67
Gráfica 3: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas HG86V.....	67
Gráfica 4: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas IS6H4V.....	68
Gráfica 5: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas IT8H6V.....	68
Gráfica 6: Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas IG4H2V.....	69
Gráfica 7: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas CS8H6V.....	69
Gráfica 8: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas CT4H2V.....	70
Gráfica 9: Curva fuerza- desplazamiento de las probetas CG6H4V.....	70

1. OBJETIVO

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster (TFM) es la caracterización del comportamiento mecánico a flexión de aleaciones metálicas dúctiles mediante probetas fabricadas mediante fabricación aditiva.

Para ello, se fabricarán probetas normalizadas que serán sometidas a ensayos de flexión según la norma ISO 7438. El análisis de estos resultados permitirá establecer una caracterización mecánica de los materiales, así como valorar la fiabilidad del proceso de fabricación aditiva.

Con este estudio se pretende identificar las posibles ventajas que ofrece la fabricación aditiva metálica, especialmente donde el comportamiento mecánico bajo flexión es un factor determinante.

2. ALCANCE

El presente TFM se enmarca en el creciente interés por la fabricación aditiva metálica como alternativa viable a los métodos convencionales de fabricación.

Este enfoque tecnológico está transformando la forma en que se diseñan y producen componentes, gracias a su capacidad para reducir tiempos de fabricación, disminuir el desperdicio de material y permitir una mayor libertad geométrica. Además, representa una solución más asequible, directa y adaptable a las necesidades específicas de cada aplicación.

Frente a procesos tradicionales como el mecanizado, la forja o la fundición, la fabricación aditiva abre la puerta a nuevas posibilidades de diseño y rendimiento, permitiendo alcanzar comportamientos mecánicos difíciles de obtener por medios convencionales. En especial, en este contexto, resulta de especial interés entender cómo se comportan los materiales metálicos dúctiles, fabricados con fabricación aditiva, bajo cargas de flexión.

Así el trabajo se posiciona dentro de una línea de investigación que busca validar la fabricación aditiva como una opción sólida y competitiva para la producción de componentes metálicos funcionales.

3. ANTECEDENTES

La fabricación aditiva (FA) ha supuesto un avance significativo en el desarrollo de nuevos procesos productivos, especialmente en el ámbito de materiales metálicos. Su aplicación ha permitido optimizar el diseño de piezas, reducir tiempos de fabricación y minimizar el desperdicio de material en comparación con los métodos de fabricación convencionales. Estas ventajas han impulsado su adopción en sectores como la automoción, la aeronáutica y la biomedicina (DebRoy et al., 2018)

En los últimos años, numerosos estudios han abordado la caracterización de piezas metálicas obtenidas mediante FA. En el caso de aleaciones metálicas dúctiles, los ensayos de tracción han sido los más frecuentes, permitiendo evaluar propiedades como el límite elástico, o el alargamiento a la rotura (Rodríguez et al., 2023).

Sin embargo, el comportamiento a flexión ha sido menos explorado a pesar de su importancia en aplicaciones reales donde los componentes pueden estar sometidos a esfuerzos flectores. Recientemente, Schultheiß et al. (2024) llevaron a cabo un estudio sobre el comportamiento a fatiga por flexión de estructuras tipo *gyroid* fabricadas mediante fusión por lecho de polvo con láser. A través de ensayos de flexión rotacional, demostraron cómo orientación de la impresión, la porosidad y la rugosidad superficial influyen significativamente en la resistencia a flexión (Schultheiß et al., 2024).

Por otra parte Darsin et al. (2023) evaluaron el comportamiento a flexión de piezas fabricadas mediante un filamento compuesto de PLA y acero inoxidable utilizando la tecnología de extrusión. Asimismo, Kaleli et al. (2022) estudiaron el efecto del espesor de capa en estructuras metálicas, realizando tres grupos mediante sinterizado láser directo (DMLS), además de realizar un grupo fabricado mediante fundición, concluyendo que el grosor de las capas de los grupos de DMLS no tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a flexión, pero presentando una resistencia a flexión mayor que el grupo de fundición (Darsin et al., 2023; Kaleli et al., 2022).

Estos estudios reflejan un creciente interés en caracterizar el comportamiento a flexión de piezas metálicas obtenidas mediante FA, siendo un área todavía en expansión. El presente trabajo se alinea con esta línea de investigación de flexión, centrándose específicamente en aleaciones dúctiles.

4. INTRODUCCIÓN

En este apartado se abordarán los aspectos técnicos que sirven de base para el desarrollo del trabajo, como son la fabricación aditiva y las propiedades mecánicas de los materiales metálicos. Se explicarán los principales procesos de fabricación aditiva utilizados, así como los principales materiales y equipos empleados.

4.1 Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva, de acuerdo con la norma UNE-EN ISO/ASTM 52900:2021, consiste en el proceso de unión de materiales para crear piezas u objetos directamente a partir de un modelo 3D, habitualmente mediante la disposición sucesiva de capas, todo lo contrario, a los métodos convencionales basadas en la eliminación de material o en la deformación de un volumen inicial.

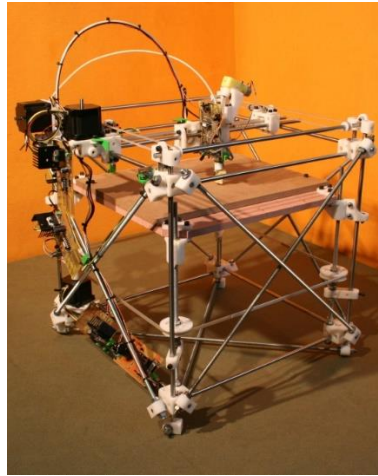
La fabricación aditiva ha experimentado una evolución significativa desde sus orígenes conceptuales en los años 60 hasta convertirse en una tecnología clave en la industria moderna. El comienzo de ésta surge en 1980 a través de Dr. Hideo Kodama, perteneciente al Instituto de Investigación Industrial Municipal de Nagoya (Japón), donde propuso un sistema pionero de prototipado rápido basado en fotopolimerización con luz ultravioleta, aunque su patente expiró al no cumplir con un requisito del proceso de solicitud de patentes (Batista Ponce, s. f.; Wohlers et al., 2016).

No fue hasta 1987 que se comercializó con la estereolitografía (SLA) desarrollado por 3D Systems, cuyo fundador fue Charles Hull, basado precisamente en esa técnica mencionada anteriormente.

Durante la década de los 90, surgieron otras tecnologías fundamentales como modelado por deposición de filamento fundido (FDM) introducido por Stratasys en 1991 o la sinterización selectiva por láser (SLS) de DTM Corporation (Ahora, parte de 3D Systems) en 1992. Estas innovaciones permitieron el procesamiento de una mayor variedad de materiales, como termoplásticos.

A partir del año 2000, la FA pasó a de ser una herramienta de prototipado rápido a un método viable para la producción de piezas finales. Se incrementó la precisión, la gama de materiales y la fiabilidad de los sistemas. En este periodo también comenzaron

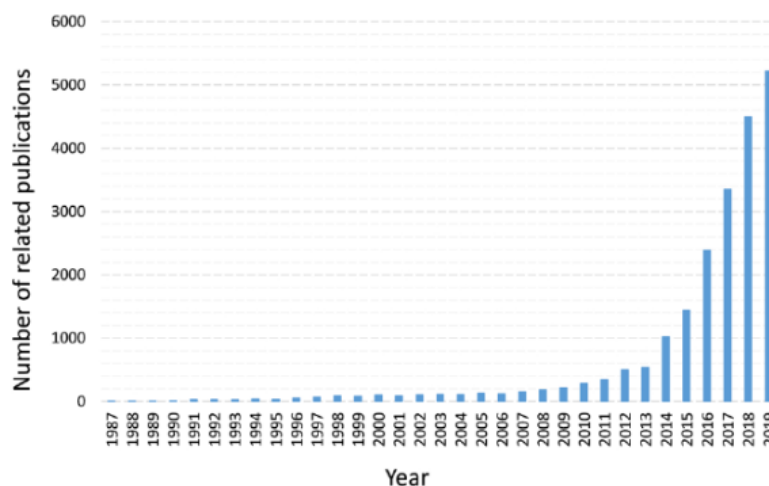
a emerger impresoras de bajo coste y surgieron movimientos como RepRap (Ilustración 1), que facilitaron el acceso mediante modelos de código abierto (Wohlers et al., 2016).



*Ilustración 1: Primera versión RepRap Darwin (2008).
Fuente RepRap Darwin – RepRap.*

En la década del 2010, la FA se posicionó con fuerza en sectores como la aeronáutica, automoción o medicina, gracias a su capacidad para fabricar geometrías complejas, personalizar productos y reducir tiempos de desarrollo (Wohlers et al., 2016).

A día de hoy, la FA ha experimentado una evolución significativa, consolidándose como una tecnología clave en diversos ámbitos industriales (Belda Rodríguez, 2023). Con la llegada de las nuevas tecnologías y el desarrollo de las impresoras 3D de bajo coste y fácil acceso, han ido incrementando los artículos relacionados con esta tecnología como se observa en la Ilustración 2, una tecnología que aún sigue en evolución (Rouf et al., 2022).



*Ilustración 2: Artículos de FA publicados.
Fuente: Liu et al. (2021).*

4.1.1 Procesos

Existen diferentes procesos de fabricación aditiva, que comparten el principio común de crear objetos mediante la adición de material capa a capa. Cada tecnología emplea tanto distintos mecanismos físicos como materiales. A continuación, se describen los principales procesos de fabricación aditiva, los cuales se pueden clasificar en siete familias según la norma (UNE-EN ISO/ASTM 52900:2021 Fabricación aditiva. Principios generales. Fundamentos y vocabulario., 2022).

Proyección de Aglutinante (BJT)

Proyección de Aglutinante o más conocida como '*Binder Jetting*' (BJT) es una tecnología de fabricación aditiva en la que se deposita selectivamente un polímero líquido sobre una capa de polvo. Las gotas de aglutinante penetran en la superficie de polvo, generando una unión localizada de material. Las piezas obtenidas tras la impresión están compuestas por polvo aglomerado, por lo que requieren procesos postratamiento. Esta técnica fue desarrollada en el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) y posteriormente comercializada por Z Corporation y ExOne. Una de sus principales ventajas es su versatilidad, ya que permite trabajar con una amplia variedad de materiales en forma de polvo, incluyendo materiales cerámicos, metálicos, poliméricos o arena de fundición. Un proceso de esta familia es el 3DP (Three Dimensional Printing) (Gao et al., 2015; Wong & Hernandez, 2012). Se puede observar un esquema del Sistema BJT en la Ilustración 3.

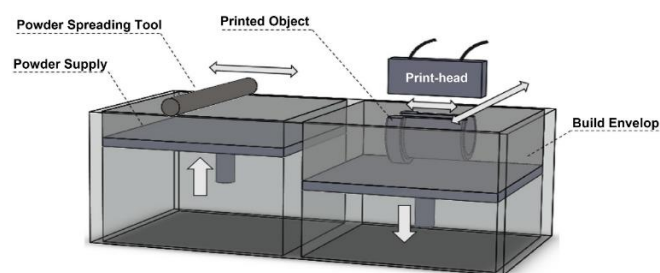


Ilustración 3: Esquema de un equipo de Binder Jetting.
Fuente: (Li et al., 2021).

Deposición de Energía Focalizada (DED)

Deposición de Energía Focalizada o '*Directed Energy Deposition*' (DED) es una tecnología en la que se alimenta material metálico en forma de polvo o alambre directamente sobre la pieza mientras se funde con una fuente de energía concentrada, como un láser o un haz de electrones. Funciona de manera similar a una soldadura de

recargue y se lleva a cabo mediante el movimiento controlado de un cabezal sobre múltiples ejes. Fue desarrollado en 1995 en los Laboratorios Nacionales Sandia, ubicado en Estados Unidos. Uno de los sistemas más conocidos es *Laser Engineered Net Shaping* (LENS). Este método permite fabricar piezas con microestructuras complejas, reparar componentes dañados, aplicar recubrimientos funcionales y obtener densidades de hasta 99,9% con propiedades mecánicas superiores a las obtenidas por fundición (Gao et al., 2015). Se puede observar un esquema de éste en la Ilustración 4.

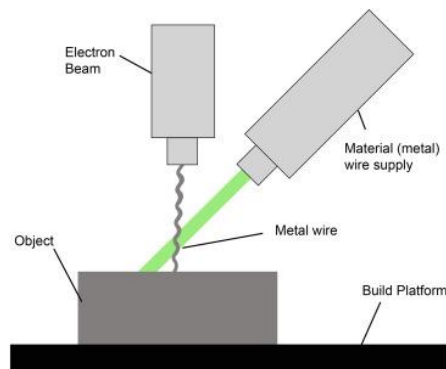


Ilustración 4: Esquema Sistema DED.
Fuente: (Pontes, 2021).

Fusión de Lecho de Polvo (PBF)

Fusión de Lecho en Polvo o *'Powder Bed Fusion'* (PBF) utiliza un haz de energía, ya sea láser o haz de electrones para fundir selectivamente el material en forma de polvo que se distribuye capa a capa sobre una superficie. Una vez que se ha escaneado y fundido una capa, se extiende una nueva mediante mecanismo de rodillo, repitiéndose hasta completar la pieza (Gao et al., 2015). Utiliza dos técnicas principalmente, Sinterización Selectiva por Láser (SLS) y Fusión por haz de Electrones (EBM). En la Ilustración 5 se puede observar un esquema de SLS (Kumar et al., 2023).

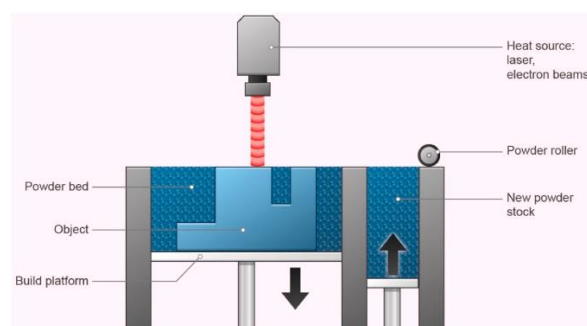


Ilustración 5: Esquema proceso SLS.
Fuente: Kumar et al. (2023).

Laminado de Hojas (SHL)

El proceso de Laminado de Hojas o *'Sheet Lamination'* (SHL) consiste en la FA mediante la unión de láminas para la construcción de una pieza capa a capa (Ilustración 6). Incluye técnicas como la Fabricación por corte y laminado (LOM), que permite producir piezas de geometría compleja con tiempos de operación reducidos y bajos costes de fabricación. Otra variante destacada es la Fabricación Aditiva Ultrasónica (UAM) la cual emplea vibraciones ultrasónicas para unir láminas metálicas delgadas (Kumar et al., 2023).

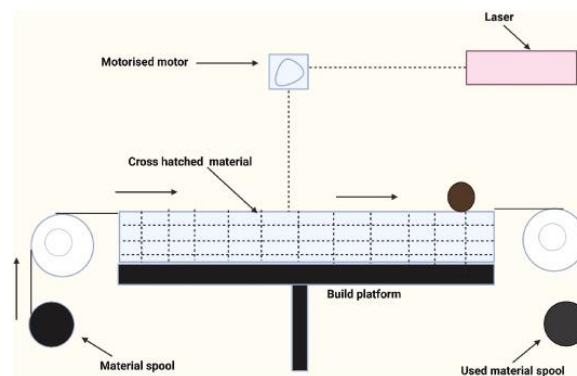


Ilustración 6: Esquema LOM.

Fuente: Kumar et al. (2023).

Fotopolimerización (VPP)

El proceso de Fotopolimerización o *'Vat Polymerization'* (VPP) se basa en la solidificación selectiva de una resina fotosensible contenida en una cubeta mediante una fuente de luz, generalmente ultravioleta (Ilustración 7). Este método destaca por su alta precisión, especialmente en variantes como la polimerización mediante fotones (Kumar et al., 2023). El proceso originario de VP fue la estereolitografía (SLA), el proceso de FA más antiguo, desarrollado por 3D Systems, como se comentó al principio de este epígrafe. Las limitaciones que este método presenta son los errores asociados al exceso de curado, la forma no uniforme de las trayectorias escaneadas y el elevado precio de los materiales (Gao et al., 2015).

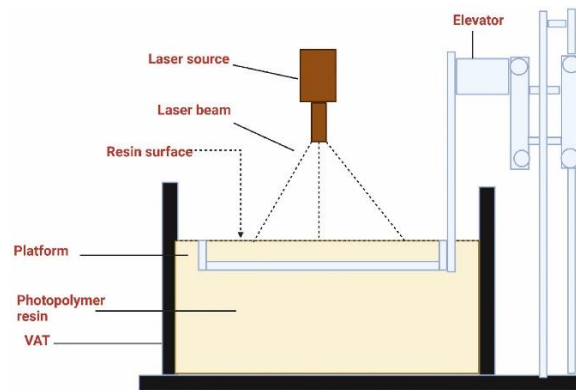


Ilustración 7: Esquema de técnica VPP.
Fuente: Kumar et al. (2023).

Proyección de Material (MJT)

La proyección de material o ‘Material Jetting’ (MJT) es un proceso en el que se depositan directamente gotas de cera o fotopolímero sobre un sustrato utilizando una técnica de inyección. La solidificación del material se produce por cambio de fase, ya sea mediante enfriamiento o curado fotopolimérico (Gao et al., 2015). Dentro de MJT destaca la tecnología PolyJet (Ilustración 8), la cual utiliza cabezales de inyección para depositar fotopolímero en las direcciones X e Y, y curado capa a capa mediante lámparas de luz ultravioleta (Wong & Hernández, 2012).

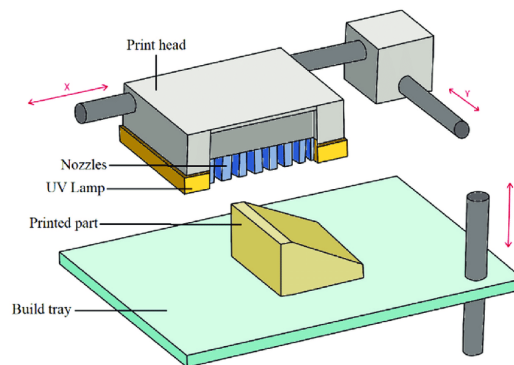


Ilustración 8: Esquema de la técnica PolyJet.
Fuente: (Pandey et al., 2024).

Extrusión de Material (MEX)

El proceso de extrusión de material o ‘Material Extrusion’ consiste en la extrusión, a través de una boquilla, mediante filamento de un material determinado. Constituye una familia de procesos de las más empleadas debido a su bajo coste y simplicidad operativa. El ejemplo más representativo es el Modelado por Deposición fundida (FDM/FFF), desarrollado en la década de 1990, el cual emplea un filamento termoplástico que se funde

y extruye para formar el objeto final (Kumar et al., 2023). En la Ilustración 9 se puede observar un esquema de este proceso.

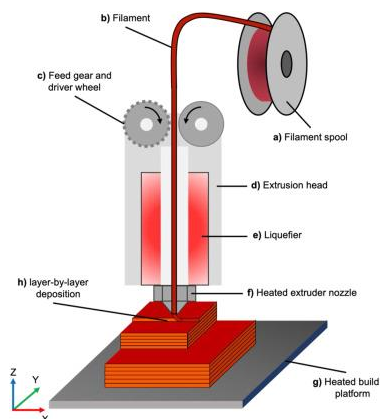
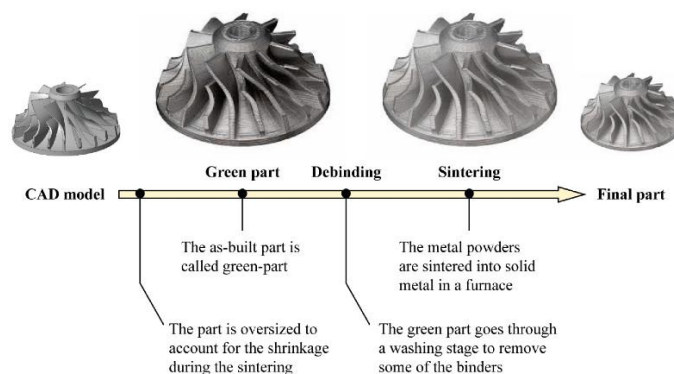


Ilustración 9: Esquema proceso ME.
Fuente: Golab et al. (2022).

Una evolución de MEX es la tecnología ADAM (*Atomic Difussion Additive Manufacturing*) desarrollada por la empresa Markforged y empleada en el presente proyecto. ADAM permite la producción de piezas metálicas mediante la extrusión de un filamento compuesto con polvo metálico ligado con aglutinantes poliméricos y ceras. Tras la impresión, las piezas pasan por un proceso de lavado químico y posterior sinterizado en donde se elimina el aglutinante plástico y se produce la difusión del material, en la Ilustración 10 se puede observar un esquema de este proceso. Este método permite fabricar componentes con geometrías complejas y buena precisión adimensional (Markforged, s. f.-e).

Estudios como el de Galati & Minetola (2019) acerca del acero inoxidable 17-4 PH muestran cómo parámetros como el espesor de capa y el tamaño de la muestra influyen en la densidad, rugosidad y precisión dimensional de las piezas, siendo la densidad inferior a la obtenida en procesos basados en lecho de polvo, y el acabado superficial más rugoso debido a la naturaleza de la deposición del filamento metálico (Galati & Minetola, 2019).



*Ilustración 10: Esquema de FA mediante tecnología ADAM.
Fuente: Galati & Minetola (2019)*

4.1.2 Materiales

Una parte fundamental de la FA es la elección de material, la cual determina tanto la viabilidad del proceso como las propiedades finales de las piezas fabricadas. Gracias a la evolución de esta tecnología, hoy en día es posible emplear una amplia variedad de materiales, actualmente existen materiales emergentes como son los compuestos, vidrios o biomateriales entre otros, siendo los materiales que más destacan los polímeros, metales y cerámicos.

A continuación, se abordarán las principales características fundamentales de estas tres categorías.

Polímeros

Los polímeros son los materiales más utilizados en FA debido a su bajo coste, fácil disponibilidad, buenas propiedades mecánicas y amplia compatibilidad con diversas tecnologías de impresión 3D. Entre los más comunes se encuentran el Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS) y el Ácido Poliláctico (PLA) (Bhatia & Sehgal, 2023).

El ABS es un terpolímero formado por acrilonitrilo, butadieno y estireno. Se caracteriza por su resistencia, durabilidad y buena estabilidad térmica. Aunque no tiene un punto de fusión definido, su temperatura de transición vítrea es de aproximadamente 105 °C (Bhatia & Sehgal, 2023).

Por otro lado, el PLA es un polímero biodegradable de origen natural (como el maíz o la caña de azúcar), lo que lo convierte en una opción más sostenible. Posee buenas propiedades mecánicas, es fácil de imprimir y su uso está muy extendido en aplicaciones domésticas, educativas y médicas. Presenta una temperatura de transición vítrea de 55 °C y un punto de fusión en torno a los 180 °C (Bhatia & Sehgal, 2023).

Entre los procesos más empleados se encuentran la fotopolimerización, la extrusión de material y la proyección de material (Srivastava et al., 2022).

Cerámicos

Los materiales cerámicos en FA se caracterizan por ser duros, frágiles, resistentes al calor y a la corrosión., lo que los convierte altamente valiosos en sectores como la aeronáutica, la automoción y la biomedicina. En particular, materiales como el fosfato tricálcico (TCP) y la hidroxiapatita (HA) son ampliamente empleados para la impresión de andamiajes óseos y dentales debido a su biocompatibilidad (Bhatia & Sehgal, 2023).

Sin embargo, la FA de materiales cerámicos presenta varios desafíos técnicos. A diferencia de los polímeros y metales, los cerámicos no pueden fundirse fácilmente debido a su alto punto de fusión y a que sus partículas no se integran de forma continua mediante la aplicación de calor. (Srivastava et al., 2022).

Aunque técnicas como PBF han demostrados ser eficaces y económicas para fabricar piezas cerámicas, su aplicación sigue limitada por la disponibilidad de materiales base adecuados. No obstante, PBF, junto con otras técnicas como SLA, extrusión de pastas y LOM, ha sido empleada con éxito para fabricar componentes electrónicos o microchips (Srivastava et al., 2022).

Metales

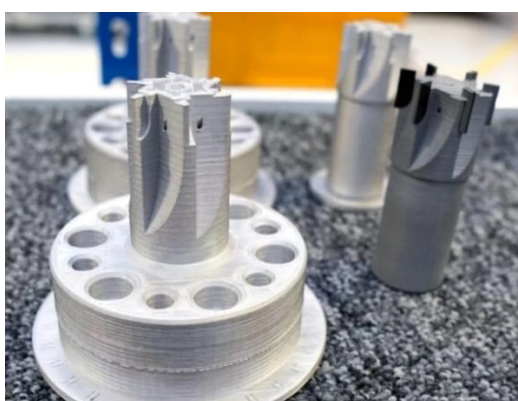
Los metales y sus aleaciones constituyen una de las categorías clave en la FA debido a su capacidad para producir piezas con geometrías complejas y propiedades mecánicas avanzadas. Aunque el coste del proceso es elevado y la velocidad de fabricación suele ser reducida, su aplicación se ha expandido notablemente en sectores como la aeronáutica, automoción, defensa, electrónica y biomedicina (Bhatia & Sehgal, 2023).

Entre los materiales metálicos utilizados en FA se encuentran el titanio y sus aleaciones, aceros inoxidable, aleaciones de aluminio, cobre, latón, bronce, etc. Estos materiales pueden encontrarse en el mercado en forma de polvo o hilo (Bhatia & Sehgal, 2023).

Algunas de las tecnologías más empleadas en FA metálica son PBF, DED y FFF, donde utilizan material en forma de aleación metálica (Srivastava et al., 2022).

Este estudio empleará tres materiales metálicos, acero para herramienta H-13 recocido, Cobre e Inconel 625.

El acero para herramienta H13 presenta una mayor dureza que el acero inoxidable 17-4 PH y es capaz de mantener sus propiedades mecánicas a altas temperaturas. El acero para herramienta H13 de Markforged puede someterse a tratamiento térmico hasta alcanzar una dureza de 45 HRC y una resistencia a la tracción (UTS) de 1680 MPa. Este material se utiliza habitualmente en componentes como cuerpos de herramienta, dispositivos de soldadura fuerte y otras piezas que requieren de una alta dureza o resistencia térmica (Markforged, s. f.)



*Ilustración 11: Pieza Fabricada de Acero H13.
Fuente: Markforged (s. f.)*

A continuación, en las tablas Tabla 1 y Tabla 2 se recoge la composición química del acero para herramientas H13 del fabricante Markforged respecto a otro fabricante, en este caso Carpenter Additive, en forma de polvo metálico y las propiedades mecánicas del material de acuerdo con los datos suministrados por el fabricante Markforged respectivamente.

Markforged		Carpenter Additive	
Composición	Peso (%)	Composición	Peso (%)
Cromo	4,7 – 5,5	Cromo	4,80 - 5,50
Molibdeno	1,3 – 1,7	Molibdeno	1,10 – 1.50
Silicio	0,8 – 1,2	Silicio	0,80 – 1,20
Vanadio	0,8 – 1,2	Vanadio	0,80 – 1.15

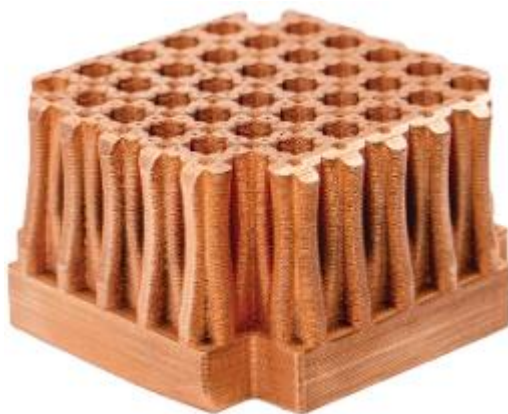
Carbono	0,3 – 0,45	Carbono	0,35 – 0,42
Manganeso	0,2 – 0,5	Manganeso	0,25 – 0,50
Fósforo	0,03 máx.	Fósforo	0,03
Azufre	0,03 máx.	Azufre	0,02
Hierro	bal.	Hierro	bal.
		Nitrógeno	0,10
		Oxígeno	0,10

Tabla 1: Comparación de la composición química del acero para herramientas H13 entre Markforged y Carpenter Additive.

Propiedades Físicas	Prueba	Markforged Sinterizado	Markforged tratado térmicamente	Forjado Tratado térmicamente
Resistencia a la tracción óptima (MPa)	ASTM E8	1420	1500	1580
Límite de fluencia (MPa) de 0,2 %	ASTM E8	800	1250	1360
Alargamiento de rotura (%)	ASTM E8	5	5	14
Dureza (HRC)	ASTM E18	40	45	46
Densidad relativa (%)	ASTM B923	94,5	94,5	100

Tabla 2: Propiedades físicas acero para herramienta H13 según Markforged.

Por otra parte, el cobre es un metal conductor y dúctil, optimizado para aplicaciones térmicas y eléctricas. El cobre puro presenta una conductividad térmica y eléctrica significativamente superior a la de metales tradicionales (Markforged, s. f.).



*Ilustración 12: Pieza realizada de Cobre.
Fuente: Markforged (s. f).*

A continuación, en las tablas Tabla 3 y Tabla 4 se recoge la composición química del cobre suministrada por parte de Markforged en comparación con la suministrada por Carpenter Additive y las propiedades mecánicas del material de acuerdo con los datos suministrados por el fabricante Markforged respectivamente.

Markforged		Carpenter Additive	
Composición	Peso (%)	Composición	Peso (%)
Cobre	99,8 mín.	Cobre	bal.
Oxígeno	0,05 máx.	Oxígeno	0,04
Hierro	0,05 máx.	Hierro	0,025
Otros	Bal.	Aluminio	0,06
		Cromo	3,1 – 3,4
		Silicio	0,035
		Niobio	2,7 – 3,0

Tabla 3: Comparación de la composición química del cobre entre Markforged y Carpenter Additive.

Propiedades Físicas	Prueba	Markforged Sinterizado	Markforged tratado térmicamente	Forjado Tratado térmicamente
Resistencia a la tracción óptima (MPa)	ASTM E8	1420	1500	1580
Límite de fluencia (MPa) de 0,2 %	ASTM E8	800	1250	1360
Alargamiento de rotura (%)	ASTM E8	5	5	14
Densidad relativa (%)	ASTM B923	94,5	94,5	100

Tabla 4: Propiedades físicas del cobre según Markforged.

El Inconel 625 es una superaleación a base de níquel-cromo, reconocida por su excelente resistencia mecánica y a la corrosión, incluso en condiciones de alta temperatura. Esta aleación es especialmente adecuada para la fabricación de prototipos funcionales y componentes finales destinados a entornos extremos (Markforged, s. f.).



Ilustración 13: Pieza fabricada con Inconel 625.
Fuente: Markforged (s. f.).

A continuación, en las tablas Tabla 5 y Tabla 6 se recoge la composición química del Inconel 625 de Markforged con respecto a Carpenter Additive y las propiedades mecánicas del material de acuerdo con los datos suministrados por el fabricante Markforged respectivamente.

Markforged		Carpenter Additive	
Composición	Peso (%)	Composición	Peso (%)
Cromo	20 – 23 %	Cromo	20,00 – 23,00
Molibdeno	8 – 10 %	Molibdeno	8,00 – 10,00

Hierro	5 % máx.	Hierro	5,00
Niobio	3,15 – 4,15 %	Niobio	3,15 – 4,15
Cobalto	1 % máx.	Cobalto	1,00
Manganeso	0,5 % máx.	Manganeso	0,50
Silicio	0,5 % máx.	Silicio	0,50
Aluminio	0,5 % máx.	Aluminio	0,40
Titanio	0,4 % máx.	Titanio	0,40
Carbono	0,1 % máx.	Carbono	0,10
Fósforo	0,015 % máx.	Fósforo	0,015
Azufre	0,015 % máx.	Azufre	0,015
Níquel	bal.	Níquel	bal.
		Nitrógeno	0,020
		Oxígeno	0,030

Tabla 5: Comparación de la composición química del inconel 625 entre Markforged y Carpenter Additive.

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

Tabla 6: Propiedades físicas del inconel 625 según Markforged.

4.1.3 Equipos

Para la realización de este trabajo se utilizará el equipo de impresión, Sistema Metal X, de la empresa Markforged, un equipo diseñado para la fabricación de piezas metálicas mediante la tecnología ADAM, explicada anteriormente.

El sistema de impresión Metal X está compuesto por la impresora, un equipo de lavado químico (WASH-1) y un equipo de sinterizado (SINTER-1), en la Ilustración 14 se puede apreciar dicho sistema.



*Ilustración 14: Sistema de impresión Metal X.
Fuente: Wurth Additive Group (s. f.)*

La fase de impresión comienza con la preparación del archivo a través del software propio de Markforged llamado Eiger, el cual controla todo el proceso de fabricación, desde la generación del archivo hasta la fase del sinterizado.

Antes de iniciar cada proceso de impresión, es necesario realizar la carga de material correspondiente, o en su defecto comprobar que es el adecuado, en la impresora Metal X. Esta operación consiste en la inserción del filamento específico en el extrusor del equipo. Este paso, aunque sea sencillo, resulta esencial para evitar fallos. En la Ilustración 15 se observa el aspecto del filamento metálico, suministrado en forma de bobina. Cada bobina de filamento está perfectamente identificada, en el caso de la Ilustración 15 acero para herramienta H13, y son suministrados por la propia empresa Markforged, siendo cada material de diferente precio y cantidad.



*Ilustración 15: Acero para herramienta H13 preparado para ser introducido en el sistema de impresión Metal X.
Fuente: Markforged (s. f.-a).*

Durante la impresión, el material metálico en forma de filamento se calienta y extruye sobre la plataforma de construcción mediante un sistema de doble boquilla de 0,4 mm de diámetro. La primera boquilla deposita el filamento metálico, encargado de formar tanto la pieza como las estructuras de soporte y el *raft*. El *raft* es una balsa de separación entre la pieza y placa que ayuda a minimizar deformaciones y sujetar firmemente las piezas impresas. La segunda boquilla, extruye material cerámico que actúa como separador entre las estructuras, facilitando la eliminación de soportes en el postprocesado (Opoz et al., 2024).

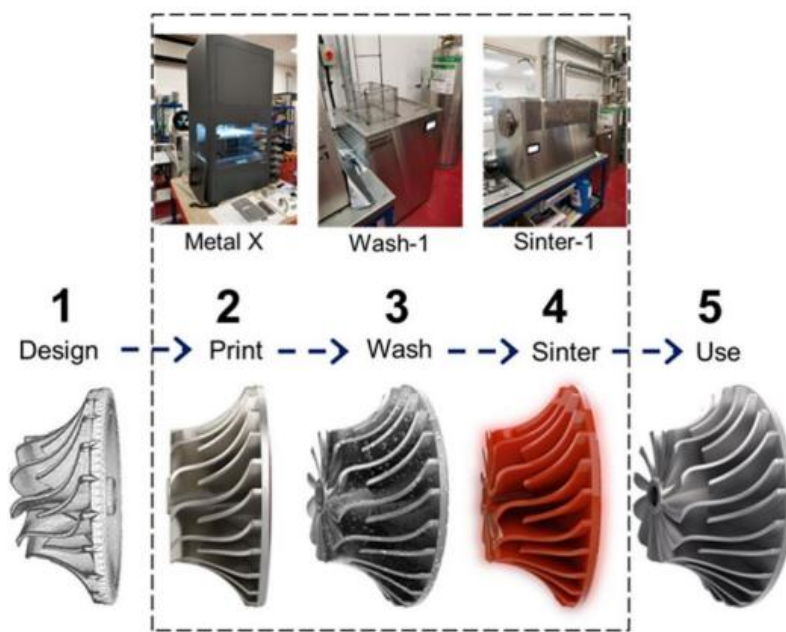
Una vez finalizada la impresión, las piezas pasan a la fase de lavado, la cual se realiza mediante el equipo WASH-1. En esta etapa, las piezas impresas, aún en estado “verde”, se introducen en una solución de disolvente (Opteon) para efectuar un desaglomerado (*debinding*), con el objetivo de disolver el aglutinante polimérico presente en el filamento metálico. Tras este proceso, la pieza se encuentra en lo que se denomina estado “marrón”, ya libre de la mayor parte del material de unión (Opoz et al., 2024).

El equipo de lavado está dividido en dos compartimentos independientes. En el primero de ellos las piezas se introducen en el baño de disolvente. Posteriormente, en el segundo compartimento, las piezas se dejan reposar para completar el secado, asegurando que las piezas queden preparadas para el proceso de sinterizado.

La etapa final del proceso consiste en la sinterización mediante el horno SINTER-1, donde las piezas se someten a un tratamiento térmico en una atmósfera inerte de argón con un 3% de hidrógeno. Esta atmósfera inerte evita la oxidación de material durante la sinterización. El ciclo térmico comienza con una fase de desaglomerado térmico, en la

que se eliminan los restos de aglutinante polimérico, seguida de una segunda fase en la que la temperatura aumenta significativamente para densificar el material y consolidar la pieza (Opoz et al., 2024).

A continuación, se muestran las fases del procesamiento de la tecnología ADAM adaptado al sistema de impresión del equipo Metal X.



*Ilustración 16: Esquema proceso ADAM mediante equipo Metal X.
Fuente: Opoz et al. (2024).*

En el apartado de anexos se podrá observar de forma más completa las características esenciales de este equipo.

4.2 Propiedades Mecánicas/Ensayos

Una parte fundamental es el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales en condiciones de servicio, ya que sin esa información sobre su comportamiento bajo carga no sería posible predecir su vida útil ni garantizar su seguridad. Evaluar como responden los materiales obtenidos mediante fabricación aditiva metálica permite optimizar diseños, asegurar la integridad estructural y evaluar la presencia de defectos como poros o microgrietas (Lewandowski & Seifi, 2016).

Además, debido a la naturaleza de la fabricación capa a capa de la FA, las propiedades mecánicas, en esencia por su carácter anisotrópico, pueden ser diferentes respecto a los materiales fabricados por métodos convencionales. Por tanto, es esencial

realizar diferentes ensayos para evaluar su comportamiento. A continuación, se describen brevemente los ensayos más utilizados.

Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción es una prueba destructiva fundamental para caracterizar materiales metálicos, ya que permite determinar propiedades clave como la resistencia a la tracción, el límite elástico y la ductilidad. Durante el ensayo, se aplica sobre una probeta una carga axial creciente hasta su rotura, midiendo tanto la fuerza necesaria para fracturarla como la deformación que experimenta el material antes de romperse. Este procedimiento resulta esencial para conocer el comportamiento estructural de los materiales bajo esfuerzos de tracción, especialmente en aplicaciones donde se requiere garantizar la resistencia mecánica y la seguridad en servicio (Saba et al., 2019).

Ensayo de Compresión

El ensayo de compresión es una técnica fundamental para evaluar el comportamiento mecánico de materiales diseñados para soportar cargas de compresión, como pueden ser pilares y vigas en una estructura o cartílagos en las rodillas. En el ensayo se aplica la carga axialmente, pero a diferencia del ensayo de tracción, la fuerza actúa comprimiendo la muestra. La configuración del equipo es muy similar a la utilizada en tracción, con la diferencia principal del uso de placas planas en lugar de mordazas (Abramowitch & Easley, 2016).

Ensayo de Fatiga

El ensayo de fatiga permite evaluar la resistencia de un material frente a cargas cíclicas aplicadas a lo largo del tiempo, simulando condiciones reales de servicio en las que los componentes están sometidos a esfuerzos repetitivos. A diferencia de los ensayos estáticos, la fatiga implica la aplicación de una carga variable, en magnitud, dirección o ambas, con el objetivo de determinar el número de ciclos que puede soportar el material antes de fallar (Mahieux, 2006).

Ensayo de Flexión

El ensayo de flexión es una técnica que, al igual que los ensayos de tracción, compresión y fatiga, permite obtener información relevante sobre el comportamiento mecánico de un material. Sin embargo, a diferencia de las pruebas anteriores, el ensayo

de flexión presenta la particularidad de que el material es sometido simultáneamente a esfuerzos de tracción y compresión a la vez. Esta combinación de esfuerzos lo convierte en una herramienta especialmente útil para evaluar la respuesta integral del material frente a la deformación, proporcionando una visión más completa de su comportamiento estructural. En particular, el ensayo de flexión en tres puntos es una de las metodologías más utilizadas debido a su simplicidad y sensibilidad para detectar fallos, deformaciones localizadas y defectos internos (Biesiekierski et al., 2020).

4.2.1 Comportamiento a Flexión

En este trabajo se lleva a cabo ensayos de flexión aplicado a materiales metálicos dúctiles, con el objetivo de evaluar su comportamiento frente a deformaciones plásticas bajo carga. Para ello, se sigue lo establecido en la norma ISO 7438, la cual define el procedimiento estandarizado para determinar la ductilidad de un material mediante el doblado controlado de una probeta hasta un ángulo especificado, sin que se produzca fractura.

Normativa aplicable a materiales dúctiles

La norma UNE-EN ISO 7438:2021 establece un método estandarizado para realizar ensayos de doblado en materiales metálicos dúctiles, con el fin de evaluar su aptitud a la deformación plástica sin que se produzca fractura. Este ensayo no busca cuantificar la resistencia del material, sino verificar su capacidad de doblado bajo condiciones específicas. La norma es de aplicación general a productos metálicos, salvo algunos casos específicos como los tubos que están regulados por otras normas.

El principio del ensayo consiste en aplicar una carga de flexión a una probeta metálica, de sección circular, rectangular, cuadrada o poligonal, sin modificar la dirección de la fuerza, hasta alcanzar un ángulo de doblado especificado. La deformación debe mantenerse en un plano perpendicular al eje de doblado, y en los casos de doblado de 180°, las caras laterales pueden llegar a tocarse o mantenerse paralelas.

La norma contempla tres equipos de ensayo con dispositivos diferentes para realizar el ensayo de doblado:

- Dispositivo con dos apoyos y un mandril.
- Dispositivo con matriz en V y mandril.
- Dispositivo con una mordaza fija y mandril móvil.

En todos los casos el mandril debe ser más ancho que la probeta y de dureza suficiente. La fórmula para calcular la distancia entre apoyos está definida y depende del diámetro del mandril y el espesor de la probeta.

Una vez definido el ensayo, la norma establece una serie de requisitos sobre la geometría de las probetas. Entre ellas se encuentra:

- Geometría: Se permite sección circular, rectangular, cuadrada o poligonal.
- Tratamiento de los bordes en probetas rectangulares: bordes redondeados.
- Dimensiones de la probeta: anchura, espesor y longitud.

Una vez seleccionadas las probetas la norma detalla el procedimiento a seguir para llevar a cabo el ensayo de doblado, el cual se puede realizar de tres formas diferentes:

- Doblado hasta un ángulo especificado: la probeta se sitúa sobre los apoyos o matriz en V, y la carga se aplica de forma controlada en el centro de la probeta.
- Doblado hasta obtener ramas paralelas separadas por una distancia definida: la probeta se ubica entre los platos paralelos de la prensa, donde se realiza el proceso de doblado hasta que ambas ramas queden paralelas entre sí.
- Doblado hasta contacto total de las ramas: igual que el anterior hasta que las ramas en contacto entre sí.

En todos los casos, la fuerza debe aplicarse de forma continua y controlada, para el primer caso la velocidad del mandril debe ser de $1 \pm 0,2$ mm/s, para el resto de los casos la norma no especifica una velocidad.

Con ello, se llegaría a la interpretación de los resultados donde la ausencia de grietas visibles a simple vista indicaría que el ensayo es satisfactorio.

Toda esta información ha sido sacada de la norma UNE-EN ISO 7438:2021, la cual se encuentra en los anexos de este trabajo.

5. DESARROLLO DEL TRABAJO

En este apartado se va a describir de manera más detallada las distintas fases llevadas a cabo para la realización del trabajo experimental. Se explicará la metodología de fabricación empleada, incluyéndose el diseño de las probetas, materiales seleccionados, equipos utilizados y parámetros de impresión. Seguidamente, se abordará la metodología seguida en la fase de ensayo

5.1 Metodología de Fabricación

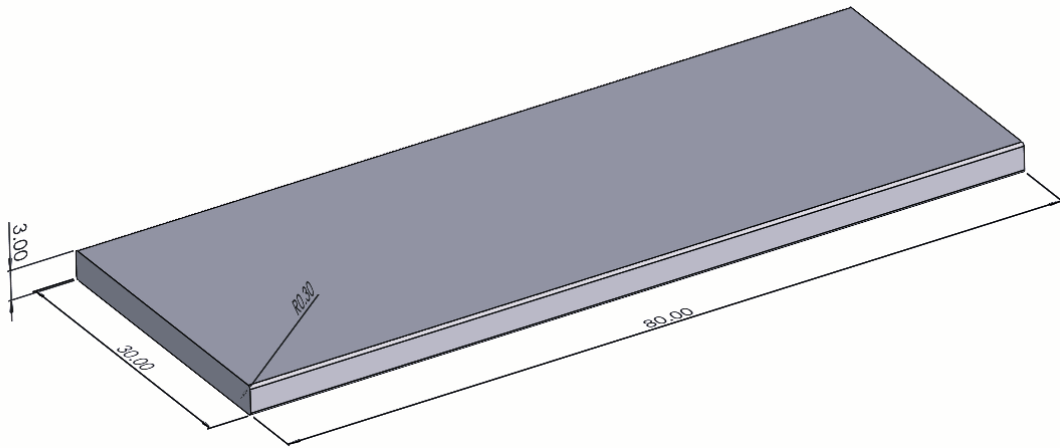
5.1.1 Diseño de las Probetas

Para el diseño de las probetas se tendrán en cuenta dos factores fundamentales. Por un lado, se encuentran las capacidades y limitaciones propias del equipo de fabricación aditiva utilizado, en este caso el sistema Metal X y, por otro lado, se han considerado las especificaciones recogidas en la norma ISO 7438 que, como se comentó anteriormente, regula el procedimiento para ensayos de flexión en materiales metálicos dúctiles.

Teniendo en cuenta las restricciones de espacio durante la fase de sinterizado, se decide escoger una probeta con una anchura de 30 mm y una longitud de 80 mm. La norma establece que, para alcanzar condiciones de deformación plana, la relación anchura/espesor de la probeta debe ser mayor o igual a 10. Además, especifica que, para anchos comprendidos entre 20 mm y 50 mm, el espesor de la probeta debe ser mayor o igual a 3 mm. Por tanto, se ha seleccionado un espesor de 3 mm, cumpliendo así ambos requisitos. Las dimensiones finales de la probeta son **80 x 30 x 3 mm** (longitud/ancho/espesor).

Asimismo, la norma indica que, para espesores de inferiores a 10 mm, los bordes de las probetas de sección rectangular no deben presentar un redondeo superior a 1 mm. En este caso se decide escoger un redondeo de 0,3 mm en los bordes.

En la Ilustración 17 se representa de una manera más detallada las dimensiones finales de la probeta diseñada.



*Ilustración 17: Dimensiones de la probeta.
Fuente: Propia.*

Una vez definidas las dimensiones de la probeta, se procede a la selección de las diferentes variables que contengan una notable influencia en el proceso de fabricación aditiva. Estas variables serán:

- Material
 - Acero H13.
 - Cobre.
 - Inconel 625.
- Patrón de Relleno
 - Sólido.
 - Triangular.
 - *Gyroid*.
- Número de capas finales en paredes superior, inferior y lateral de la probeta.
 - 4 capas pared superior e inferior y 2 capas pared lateral (4H2V).
 - 6 capas pared superior e inferior y 4 capas pared lateral (6H4V).
 - 8 capas pared superior e inferior y 6 capas pared lateral (8H6V).

Determinadas estas variables, se realizará una metodología basada en el cuadrado latino (Taguchi), con el objetivo de analizar y optimizar la combinación de estos parámetros para maximizar el rendimiento mecánico de las probetas frente a esfuerzos de flexión. Este método consiste en una disposición sistemática que permite estudiar simultáneamente las tres variables. El cuadrado latino garantiza que cada nivel de cada variable se combine una única vez con los niveles de las demás, evitando redundancias y

facilitando una comparación de los efectos de cada variable. De esta forma, se optimizan los recursos disponibles manteniendo la validez estadística del estudio.

A continuación, se presenta una tabla con el cuadrado latino de Taguchi, así como la codificación asignada a cada combinación de parámetros utilizada en las probetas (Tabla 7).

MATERIAL	RELLENO	CAPAS	CODIFICACIÓN
ACERO H13	SÓLIDO	4H2V	HS4H2V
ACERO H13	TRIANGULAR	6H4V	HT6H4V
ACERO H13	GYROID	8H6V	HG8H6V
INCONEL 625	SÓLIDO	6H4V	IS6H4V
INCONEL 625	TRIANGULAR	8H6V	IT8H6V
INCONEL 625	GYROID	4H2V	IG4H2V
COBRE	SÓLIDO	8H6V	CS8H6V
COBRE	TRIANGULAR	4H2V	CT4H2V
COBRE	GYROID	6H2V	CG6H4V

Tabla 7: Cuadrado Latino de Taguchi con las Diferentes Variables y su Codificación.

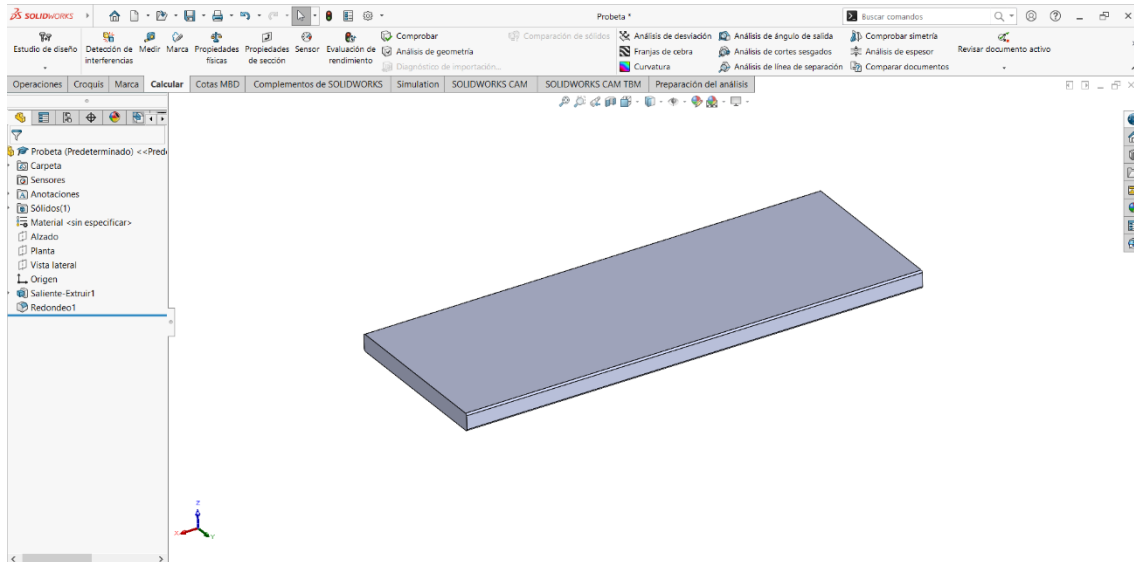
En total se han definido 9 combinaciones experimentales resultantes de las tres variables seleccionadas con sus respectivos niveles. Para asegurar la repetibilidad y fiabilidad de los resultados, se fabricarán tres probetas por cada combinación, lo que da lugar a un total de 27 probetas a fabricar. Se decide fabricar tres probetas por cada combinación de parámetros para que, de esta manera, en la fase de sinterización, sea posible realizar una sola carga de un mismo material agrupando nueve probetas aprovechando al máximo la capacidad del equipo.

Una vez definidas las dimensiones y características geométricas de las probetas, se procede a su modelado en un entorno CAD, utilizando en este caso el software SolidWorks.

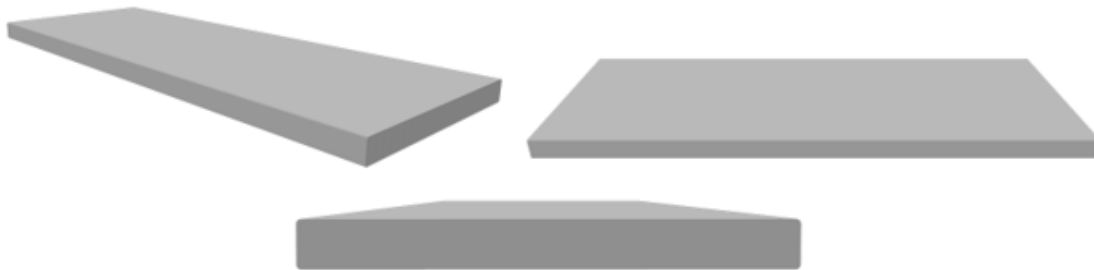
Mediante este software primero se realiza un croquis en 2D de las dimensiones de anchura y longitud de la probeta, para más tarde extruirla con el valor del espesor de la probeta. Por último, se realizará el redondeo de los bordes de sección rectangular. En la

Ilustración 18 se puede observar el entorno del software de SolidWorks con la pieza final ya modelada.

Para completar la fase de diseño, se generará un archivo en extensión .STL, compatible con el software Eiger en donde se continuará el proceso de fabricación. En la Ilustración 19 se pueden observar diferentes vistas de la probeta ya modelada.



*Ilustración 18: Probeta modelada en el software SolidWorks.
Fuente: Propia.*



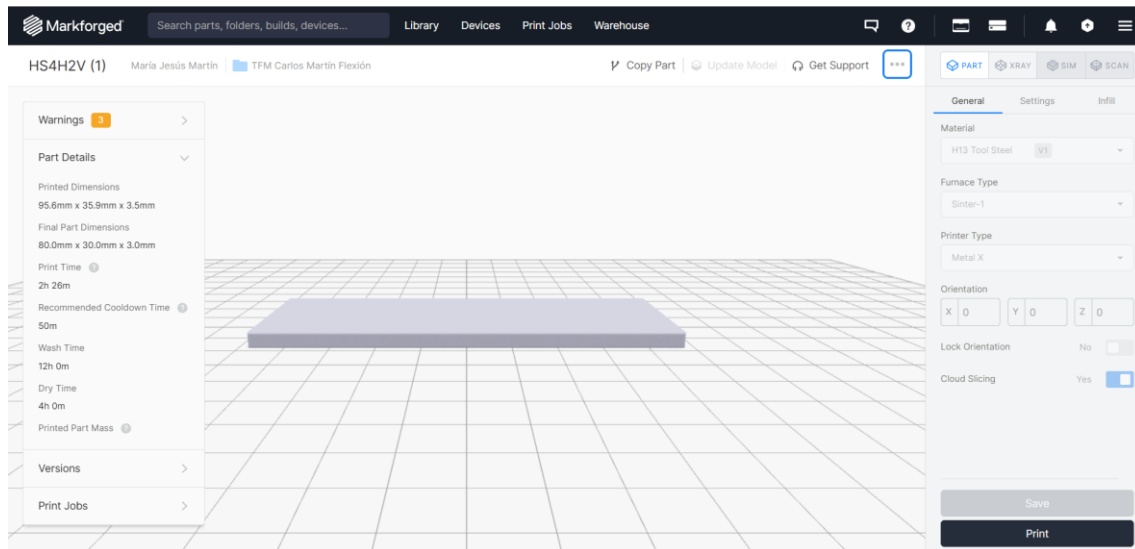
*Ilustración 19: Vistas de la probeta modelada.
Fuente: Propia.*

5.1.2 Proceso de Fabricación

Una vez definido el diseño y modelado de las probetas, y establecidas las combinaciones experimentales, se procede a la fabricación de las mismas mediante el uso de la tecnología ADAM, implementada en la máquina Metal X, de la marca Markforged.

Para ello el primer paso será importar el modelo de la probeta de extensión .STL en el software Eiger (Ilustración 20). En este programa será donde se definan las diferentes combinaciones de los parámetros mencionados anteriormente.

Una vez importado el modelo, Eiger permite seleccionar el material con el que se va a fabricar cada probeta, así como definir el patrón de relleno y el número de capas en las paredes superior, inferior y lateral. Estos parámetros se asignarán de acuerdo con lo establecido en el cuadrado latino de Taguchi (Tabla 7).



*Ilustración 20: Probeta importada en el programa Eiger.
Fuente: Propia.*

Además, el propio software aplica automáticamente un factor de escala, aproximadamente del 20%, para compensar la contracción a la que será sometida la pieza en los procesos de lavado y sinterizado, garantizando que las dimensiones finales se ajusten al diseño original.

Eiger crea un propio archivo, una vez establecidos los parámetros de impresión, el cual contiene toda la información relativa al movimiento de los cabezales, la velocidad de impresión, temperaturas de extrusión y las configuraciones de soporte y *raft*, elementos esenciales para asegurar la correcta fabricación de la fase de impresión.

A continuación, se muestra una tabla donde se recogen los parámetros de diferentes combinaciones establecidas.

Material	Acero H13			Cobre			Inconel 625		
Codificación	HS4H2V	HT6H4V	HG8H6V	CS8H6V	CT4H2V	CG6H4V	IS6H4	IT8H6V	IG4H2
Altura de Capa	0,127	0,127	0,127	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126
Estabilidad de Sinterizado	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Uso de raft	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Patrón de Relleno	Sólido	Triangular	Gyroid	Sólido	Triangular	Gyroid	Sólido	Triangular	Gyroid
Capas Pared Superior en Inferior	4	6	8	8	4	6	6	8	4
Capas de Pared Lateral	2	4	6	6	2	4	4	6	2

Tabla 8: Parámetros de impresión.

Cabe destacar que, en las probetas con patrón de relleno sólido, la variable correspondiente al número de capas de la pared superior e inferior es irrelevante ya que, al tratarse de un relleno completamente sólido, la probeta se imprime de forma continua y uniforme, siendo esta sólida en toda su fabricación. Por tanto, aunque se mantenga la codificación para tener coherencia con el resto de probetas, esta variable no influirá.

En la Ilustración 21 se muestra una vista previa del proceso de impresión generada por el propio software, donde se puede observar los parámetros definidos. En este caso se muestra la probeta HT6H4V a mitad de proceso, en donde se puede apreciar el relleno triangular además de las 4 capas de la pared lateral.

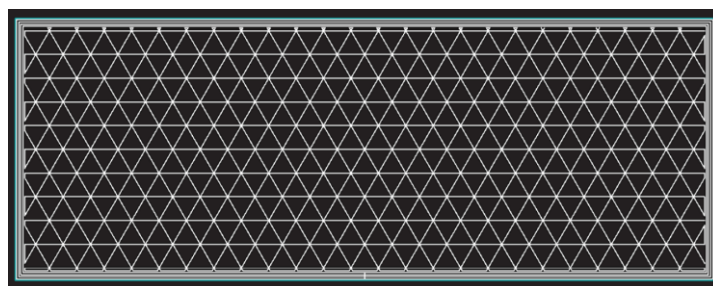
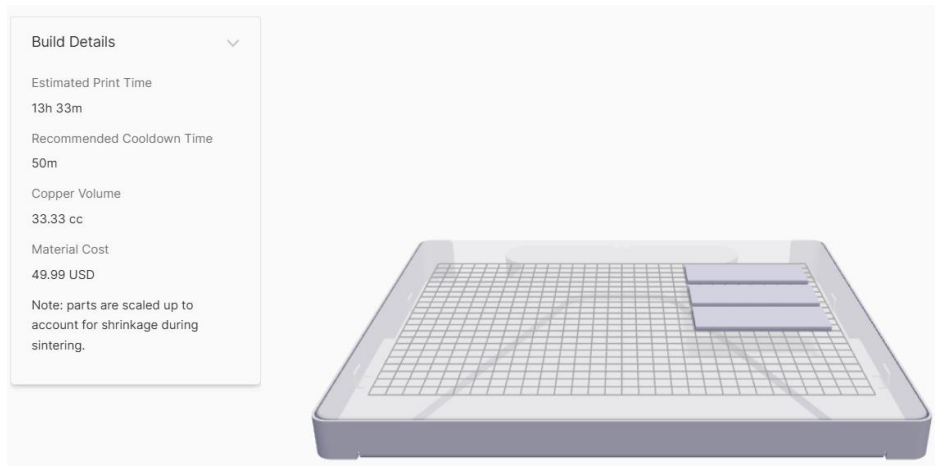


Ilustración 21: Simulación de la impresión de la probeta HT6H4V.
Fuente: Propia.

Una vez definidos los parámetros en Eiger, el siguiente paso consiste en enviarlo a imprimir a la impresora Metal X. Para ello, se debe cargar el material correspondiente a cada configuración. Tal como se definió anteriormente, de cada combinación de probetas se fabrican 3 probetas de manera simultánea (Ilustración 22).

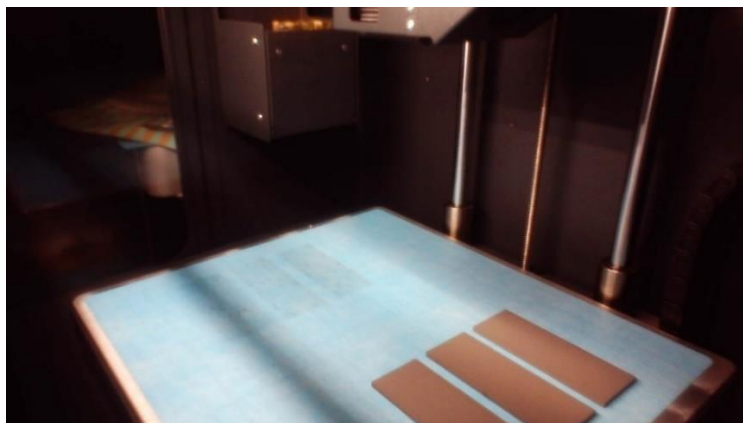


*Ilustración 22: Simulación de la bandeja de la impresora Metal X.
Fuente: Propia.*

Finalizada la preparación digital en Eiger, las probetas comenzarán el proceso de impresión en la impresora Metal X. El propio software estima la duración del proceso de fabricación, dependiendo éste del número y tipo de piezas a fabricar. En nuestro caso, de unas trece horas y media para las tres probetas

Una vez completado el proceso, Eiger recomienda un tiempo de enfriamiento antes de retirar las piezas de la bandeja, con el fin de evitar deformaciones o daños. En el caso de las probetas de la Ilustración 22 se puede observar que, para esas probetas, el tiempo recomendado de enfriamiento es de 50 minutos.

A continuación, en la Ilustración 23, se presenta una imagen real del interior de la impresora con las probetas ya impresas sobre la bandeja de impresión.



*Ilustración 23: Probetas impresas en el interior de la impresora Metal X.
Fuente: Propia.*

Una vez completada la fase de impresión y tras el tiempo de enfriamiento recomendado por Eiger, las probetas se retiran de la bandeja de impresión para ser sometidas a la etapa de desaglomerado.

Este proceso se lleva a cabo en el equipo Wash-1, el cual utiliza un disolvente específico (Opteon SF79) para eliminar el aglutinante polimérico presente en las piezas verdes.

Antes de introducir las probetas en el equipo Wash-1, será necesario pesarlas para, una vez terminado este proceso de lavado, volver a pesarlas y comprobar la pérdida del aglutinante mediante la pérdida de peso de la propia probeta.



*Ilustración 24: Pesaje de la probeta.
Fuente: Propia.*

Una vez pesadas, las probetas son introducidas en la primera cámara del equipo (cámara de la izquierda de la Ilustración 25), donde permanecerán completamente sumergidas durante un periodo de tiempo determinado por Eiger. Posteriormente se trasladan a una segunda cámara (cámara derecha de la Ilustración 25) donde se completa el proceso mediante el secado de las piezas, durante un tiempo determinado también por Eiger. Al finalizar esta fase las piezas se denominan ‘pieza marrón’

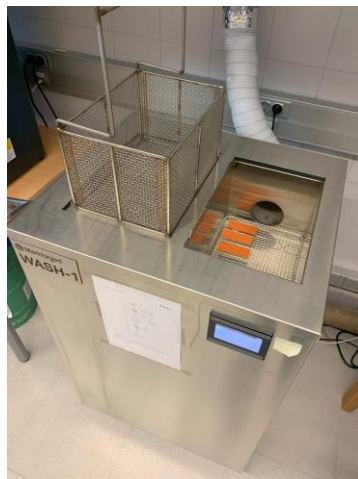


Ilustración 25: Proceso de lavado.
Fuente: Propia.

Una vez completado el proceso de secado se procede a la medición de la pieza para comprobar la desaparición de ese aglutinante. La propia marca Markforged indica que porcentaje de peso debe haber perdido como mínimo la pieza en función del material, en este caso, para los materiales de Acero H13, Cobre e Inconel 625, los porcentajes de pérdida de masa deben ser mayores a 4,1%, 2,7% y 3,8% respectivamente. Si no se cumplieran estos porcentajes, sería necesario repetir el proceso de lavado. A continuación, se muestra una tabla (Tabla 9) en la que aparece la masa antes del proceso de lavado, la masa de después del proceso de lavado y el porcentaje de masa perdido. Para el porcentaje de masa perdido se ha utilizado la siguiente fórmula.

$$\Delta\%masa = \frac{|masa_{final} - masa_{inicial}|}{masa_{inicial}} * 100 \quad (1)$$

PROBETA	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	Δ MASA
HT6H4V-1	41,08	39,36	4,18%
HT6H4V-2	41,17	39,45	4,18%
HT6H4V-3	41,10	39,39	4,17%
HS4H2V-1	58,59	56,14	4,18%
HS4H2V-2	58,62	56,16	4,19%
HS4H2V-3	58,82	56,35	4,19%
HG8H6V-1	47,72	45,73	4,17%
HG8H6V-2	47,88	45,83	4,29%
HG8H6V-3	47,32	45,34	4,18%
CG6H4V-1	47,00	45,64	2,90%
CG6H4V-2	47,02	45,66	2,90%
CG6H4V-3	47,37	45,99	2,90%
CS8H6V-1	67,19	65,24	2,90%

CS8H6V-2	67,27	65,32	2,90%
CS8H6V-3	67,20	65,25	2,91%
CT4H2V-1	38,16	37,06	2,89%
CT4H2V-2	38,44	37,33	2,89%
CT4H2V-3	38,54	37,42	2,90%
IS6H4V-1	64,89	62,35	3,91%
IS6H4V-2	64,53	62,01	3,91%
IS6H4V-3	64,66	62,14	3,90%
IT8H6V-1	53,82	51,73	3,89%
IT8H6V-2	54,02	51,93	3,87%
IT8H6V-3	54,37	52,26	3,90%
IG4H2V-1	37,86	36,41	3,82%
IG4H2V-2	37,70	36,26	3,83%
IG4H2V-3	37,75	36,30	3,83%

Tabla 9: Variación de la masa de las probetas tras l proceso de lavado.

Una vez finalizado el proceso de lavado y secado, las probetas se introducen en el equipo SINTER-1, para completar la última fase del proceso de fabricación. Para ello, las probetas se agruparán según el material de fabricación, realizándose tres cargas de nueve probetas cada una, correspondiente a los materiales utilizados: Acero H13, Cobre e Inconel 625.

El ciclo completo de sinterizado es el más largo de todo el proceso, destacando especialmente la carga de acero H13, cuyo tratamiento, al realizarse en condiciones de recocido, tuvo una duración de 39 horas.

En la Ilustración 26 se muestra el horno cargado con una tanda de probetas de cobre justo antes de iniciar el proceso de sinterizado.



Ilustración 26: Carga de las probetas de cobre en el horno SINTER-1.
Fuente: Propia.

Completadas las tres fases, se obtiene el conjunto final de las probetas listas para su caracterización. A continuación, se muestra una tabla (Tabla 10) con los tiempos requeridos en cada proceso para cada grupo de probetas. Esta información permite tener una visión global de la duración total del proceso de fabricación.

Probeta	Tiempo de Impresión	Tiempo de Enfriamiento	Tiempo de Lavado	Tiempo de Secado	Tiempo de Sinterizado
HS4H2V	06h 23min	50min	12h 00min	04h 00min	1d 15h 25min
HT6H4V	05h 19min	50min	12h 00min	04h 00min	1d 15h 25min
HG8H6V	06h 02min	50min	12h 00min	04h 00min	1d 15h 25min
CS8H6V	13h 19min	50min	12h 00min	04h 00min	1d 03h 13min
CT4H2V	07h 07min	50min	12h 00min	04h 00min	1d 03h 13min
CG6H4V	08h 54min	50min	12h 00min	04h 00min	1d 03h 13min
IS6H4	06h 40min	50min	12h 00min	04h 00min	1d 03h 40min
IT8H6V	05h 37min	50min	12h 00min	04h 00min	1d 03h 40min
IG4H2	05h 08min	50min	12h 00min	04h 00min	1d 03h 40min

Tabla 10: Tiempo de Fabricación de cada probeta.

Cabe destacar, si bien algunas probetas requerían un tiempo de lavado de 4 horas, con el fin de optimizar recursos y evitar realizar ciclos de lavado independientes, éstas se agruparon junto a otras probetas cuyo tiempo recomendado era de 12 horas, ya que prolongar ese tiempo de lavado no supone un inconveniente.

En la Ilustración 26 se puede observar una probeta de cada material una vez finalizado los tres procesos.



Ilustración 27: Probetas una vez finalizadas todas las fases. De izquierda a derecha: Acero H13, Cobre, Inconel 625. Fuente: Propia.

5.2 Metodología de Ensayo

En este apartado se describe la metodología a seguir para poder comprobar el comportamiento a flexión de las probetas fabricadas. En él se detallarán el equipo utilizado, los parámetros empleados en las pruebas y el protocolo seguido en el ensayo.

El objetivo principal en esta fase es la obtención de resultados experimentales que permitan ver el rendimiento mecánico de las probetas teniendo en cuenta los tres materiales empleados (Acero H13, Cobre e Inconel 625), así como analizar la influencia de los diferentes parámetros utilizados (relleno y número de capas exteriores).

5.2.1 Metodología de Ensayo

El ensayo de flexión utilizado será el ensayo de flexión en tres puntos, constituido por dos apoyos y un mandril, regulado a través de la norma ISO 7438.

Como se comentó en apartados anteriores (4.2.1 Comportamiento a Flexión) este tipo de ensayo resulta útil en el estudio de materiales metálicos dúctiles, ya que permite evaluar su comportamiento cuando son sometidos a esfuerzos de tracción y compresión simultáneamente.

Por todo ello, se considera un procedimiento adecuado para poder observar el comportamiento mecánico de las diferentes probetas.

5.2.2 Equipo de Ensayo

Para la realización de los ensayos de flexión se ha empleado una máquina universal de ensayos Servosis ME-402, perteneciente a la Universidad de Córdoba y en donde se han realizado los ensayos de flexión. Este equipo permite la realización de diferentes ensayos como son tracción, compresión o flexión cumpliendo con las normativas respectivas de cada ensayo. Esta máquina esta caracterizada por:

- Capacidad de carga: desde 0,1 hasta 30 toneladas.
- Velocidad desde desplazamiento: puede variar desde 0,0001 mm/min hasta 100 mm/min.
- Precisión de los canales análogos de fuerza y desplazamiento: Clase 1 de la norma EN-7500.
- Control de software: Opera mediante el sistema PCD2K.

Para el caso del presente trabajo se utilizará con la configuración de ensayo de flexión en 3 puntos (Ilustración 28).



Ilustración 28: Máquina universal de ensayos Servosis ME-402 con la configuración de ensayo de flexión en 3 puntos.

Fuente: Propia.

5.2.3 Parámetros de Ensayo

Para garantizar la repetitividad y validez de los ensayos de flexión se definirán una serie de parámetros que rigen las condiciones del ensayo.

Se comenzará configurando la máquina de ensayo de 3 puntos, definiendo la distancia existente entre rodillos, para ello, lo primero que se ha de conocer es que los 3 rodillos cuentan con un diámetro de **30 mm**. Una vez sabido el diámetro del mandril se puede calcular la distancia mediante la ecuación (2), definida en la norma ISO 7438.

$$l = (D + 3 * a) \pm \frac{a}{2} \quad (2)$$

Siendo D , el diámetro del mandril, 30 mm y a el espesor de la probeta, 3 mm, se puede conocer que la distancia entre la cara interna de los rodillos de apoyo (l), siendo ésta de 39 mm.

En la Ilustración 29 se puede observar tanto el tamaño de los diámetros de los rodillos como la distancia entre rodillos.



*Ilustración 29: Montaje de la máquina de ensayo a 3 puntos.
Fuente: Propia.*

Una vez establecida esta configuración, se pasará a realizar la configuración de los parámetros mediante el software de Servosis PCD2K. En este software se permiten variar diferentes parámetros tales como velocidad del mandril, límites, distancia entre ejes de rodillos, ancho y espesor de la probeta a ensayar. Los parámetros de este ensayo se encuentran recogidos en la Tabla 11.

Velocidad	6 mm/min
Límite superior e inferior	0 %
Distancia entre rodillos	69 mm
Ancho de la probeta	30 mm
Espesor de la probeta	3 mm

Tabla 11: Parámetros de ensayo en el software PCD2K.

En la Ilustración 30 se puede observar la interfaz del software PCD2K. En la pestaña de parámetros donde se añaden los parámetros definidos en la Tabla 11. Además, en la parte inferior izquierda se encuentran los controles de la máquina de ensayo desde donde se puede mover manualmente el mandril para subir o bajar la altura, además del botón con el que se inicia el ensayo. En la parte principal se aprecia una gráfica fuerza–distancia y en la parte superior los valores de éstos ejercidos por el mandril que van actualizándose en tiempo real.

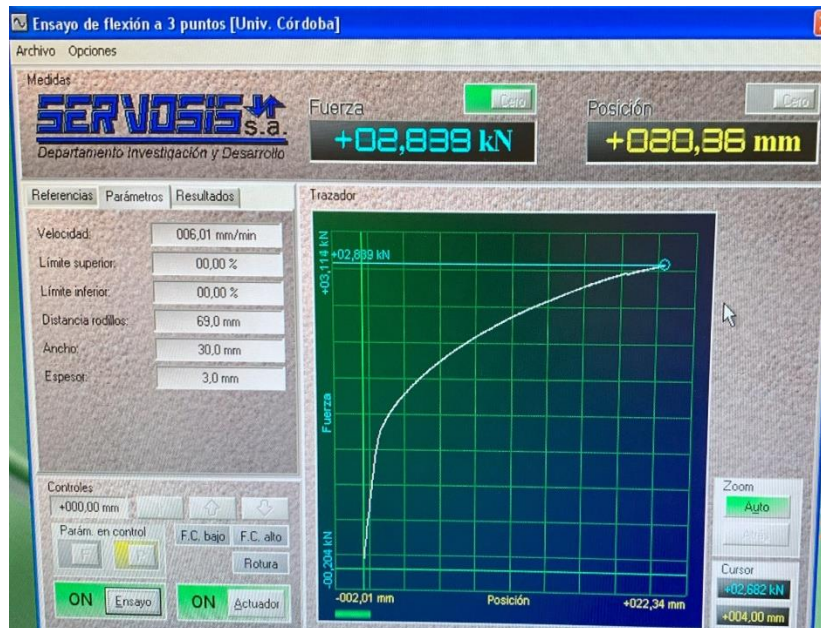


Ilustración 30: Interfaz del software PDC2K.
Fuente: Propia.

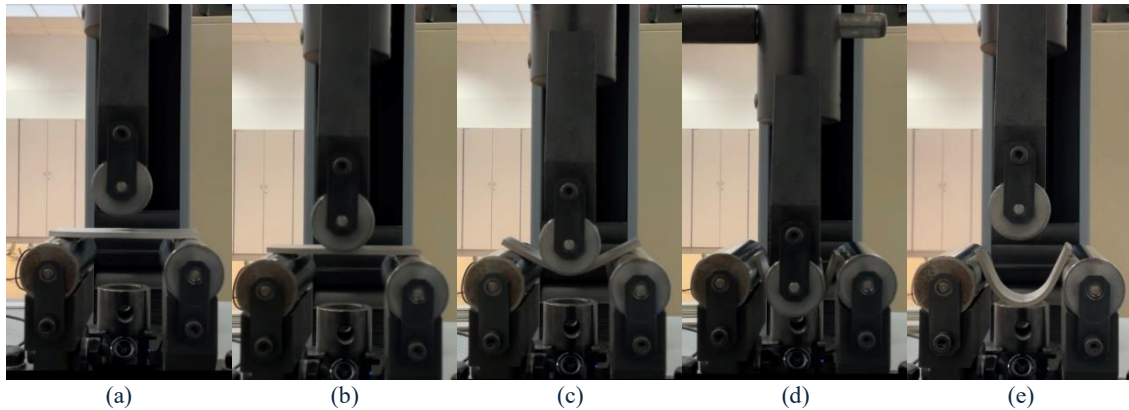
5.2.4 Protocolo de Ensayo

Una vez realizada la configuración y definidos los parámetros de diseño se procede a realizar los ensayos de flexión en 3 puntos siguiendo un protocolo sistemático para garantizar la repetibilidad. Los pasos serán los siguientes:

1. Colocación de las probetas: La probeta se sitúa de forma simétrica sobre los dos rodillos de apoyo del equipo de ensayo, asegurando su correcta alineación en el eje de carga (Ilustración 31 a).
2. Bajada del mandril: El rodillo superior (mandril) desciende manualmente hasta aplicar una precarga leve sobre la probeta. Esto garantiza el contacto adecuado entre ambas partes (Ilustración 31 b).
3. Comienzo del ensayo: Una vez la probeta está colocada y en contacto con el mandril se inicia el ensayo a una velocidad constante de 6 mm/min, previamente definida como parámetro de ensayo (Ilustración 31 c).
4. Fin del ensayo: Con el objeto de mantener la coherencia en todos los ensayos, se establece como criterio de finalización un desplazamiento del mandril de 35 mm (Ilustración 31 d).
5. Retirada de la probeta: Finalizado el ensayo, se eleva manualmente en mandril para permitir la retirada de la probeta (Ilustración 31 e).

6. Obtención y almacenamiento de los resultados: Los datos obtenidos durante el ensayo son recogidos automáticamente mediante el software PCD2K y son exportados en formato digital para su posterior análisis.

A continuación, en la Ilustración 31 se muestra de forma visual los primeros 5 pasos del proceso.



*Ilustración 31: Evolución del proceso de ensayo de flexión en diferentes instantes. Inicial (a), final (e).
Fuente: Propia.*

Además, la norma ISO 7438 establece que un ensayo de flexión se considera satisfactorio si no se detectan grietas visibles en la superficie de la probeta. Dado que se desconoce con la debida precisión el comportamiento que presentarán las probetas durante el ensayo, se optó por colocar una cámara enfocando la zona inferior de las probetas durante el mismo, permitiendo monitorizar en todo momento el desarrollo del proceso y detectar la posible aparición de grietas, tanto en tiempo real como posteriormente.

En la Ilustración 32 se muestra un ejemplo de la visualización obtenida desde dicha cámara durante uno de los ensayos.



*Ilustración 32: Vista de la zona inferior de la probeta para la detección de grietas.
Fuente: Propia.*

Concluida la fase experimental y recogida toda la información derivada de los ensayos de flexión, se procederá a su análisis. Este análisis permitirá evaluar el

comportamiento de los materiales seleccionados en función de las distintas variables consideradas.

En el siguiente apartado se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este apartado, se presenta el análisis de las probetas fabricadas y su posterior ensayo de flexión realizado sobre las distintas combinaciones descritas en el apartado anterior. Con objetivo de los resultados de forma estructurada, se ha considerado adecuado dividir el estudio en dos partes diferenciadas.

En primer lugar, se procederá la caracterización de las probetas fabricadas, considerando aspectos como las dimensiones reales obtenidas tras los procesos de impresión, lavado y sinterizado. Asimismo, se analizará el acabado superficial mediante la medición de la rugosidad de las probetas.

En segundo lugar, se analizarán los resultados obtenidos a partir de la realización de los ensayos de flexión, a través del estudio de las curvas carga-desplazamiento y del grado de curvatura alcanzado a carga máxima. Esto permitirá evaluar la influencia de las variables de material, patrón de relleno y configuración de capas exteriores sobre el comportamiento mecánico de las probetas.

6.1 Caracterización de las probetas

Antes de realizar los ensayos de flexión de las probetas, se decide realizar la caracterización de cada una de las probetas fabricadas para conocer sus dimensiones reales y su acabado superficial. El objetivo de este paso es comprobar si una vez finalizados los tres procesos de fabricación, impresión, lavado y sinterizado, los resultados obtenidos se asemejan a los diseñados inicialmente.

Se comenzará conociendo las dimensiones de las probetas, para ello, se medirán los tres parámetros clave, espesor (a), ancho (b) y longitud (L) de la probeta. Las mediciones se realizar a través de un pie de rey con resolución centesimal (0,01 mm), realizando en total cinco mediciones en diferentes posiciones de la probeta para obtener un promedio representativo.

Esta medición se realiza para las 27 probetas, con el objetivo de sintetizar la memoria y no cargarla de tablas, a continuación, en la Tabla 12 se muestra un ejemplo la toma de datos de una de las probetas, en este caso de la correspondiente a la probeta HS4H2V-1, en donde se muestran las 5 medidas tomadas en cada dimensión, su media

ponderada y su desviación típica. En el apartado de anexos, se encuentra esta misma tabla recogida para cada una de las 27 probetas.

HS4H2V-1	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,19	30,75	81,72
2	3,21	30,70	81,73
3	3,20	30,68	81,72
4	3,23	30,64	81,75
5	3,24	30,66	81,68
MEDIA	3,21	30,69	81,72
DESV. TÍPIC	0,0207	0,0422	0,0255

Tabla 12: Medidas de las dimensiones de la probeta HS4H2V-1.

Mostrado el ejemplo de como se han realizado las 5 medidas para cada una de las dimensiones de cada probeta, en la siguiente tabla (Tabla 13) se encuentran recogidas las dimensiones medias de cada una de las probetas.

PROBETA	\bar{a} (mm)	\bar{b} (mm)	\bar{L} (mm)
HS4H2V-1	3,21	30,69	81,72
HS4H2V-2	3,19	30,65	81,77
HS4H2V-3	3,25	30,73	81,82
HT6H4V-1	3,21	30,44	81,09
HT6H4V-2	3,20	30,48	81,16
HT6H4V-3	3,22	30,48	81,08
HG8H6V-1	3,18	30,54	81,29
HG8H6V-2	3,19	30,52	81,13
HG8H6V-3	3,21	30,56	81,27
IS6H4V-1	3,05	30,95	82,65
IS6H4V-2	3,04	30,96	82,55
IS6H4V-3	3,02	30,99	82,49
IT8H6V-1	3,14	30,82	82,17
IT8H6V-2	3,14	30,80	82,13
IT8H6V-3	3,10	30,79	82,12
IG4H2V-1	3,14	30,64	82,29
IG4H2V-2	3,17	30,68	82,16
IG4H2V-3	3,19	30,68	82,09
CS8H6V-1	3,08	30,06	80,66
CS8H6V-2	3,07	30,12	80,81
CS8H6V-3	3,11	30,18	80,96
CT4H2V-1	3,13	30,33	81,14
CT4H2V-2	3,12	30,34	81,04
CT4H2V-3	3,10	30,27	81,11
CG6H4V-1	3,10	30,30	81,14
CG6H4V-2	3,10	30,27	81,10

CG6H4V-3	3,10	30,28	80,83
----------	------	-------	-------

Tabla 13: Dimensiones medias de las probetas.

Caracterizadas las dimensiones de las 27 probetas, se observa que, en todos los casos, las dimensiones reales obtenidas se encuentran ligeramente por encima del diseño establecido inicialmente. Destaca especialmente, que en el caso del material inconel 625, se presenta una mayor desviación respecto a las dimensiones establecidas tanto en ancho como en longitud, siendo los valores máximos un 3% y un 2,5% mayor que los valores mínimos obtenidos en el cobre, mientras que en el caso del material acero para herramientas H13 recocido es donde mayor valor de espesor hay siendo el valor máximo un 7,6% mayor que el valor mínimo encontrado en las probetas fabricadas de cobre. En el caso de las probetas de cobre es donde se muestra la menor diferencia con respecto al diseño inicial.

Una vez vistas las dimensiones reales de las probetas se procede a la evaluación de la calidad superficial, para ello se realizó una medición de la rugosidad sobre la cara superior de la probeta. Par ello se utilizará el rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ-210, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar este rugosímetro mientras se encontraba realizando una medición en una de las probetas. Además, el rugosímetro se puede conectar mediante USB al ordenador y manejarlo mediante su software SurfTest SJ USB Communication Tool Ver5.007.



Ilustración 33: Rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ-210.
Fuente: Propia.

Dentro del software, y el primer paso a realizar, será la introducción de las condiciones de medición. A continuación, se muestra las condiciones seleccionadas.

- Norma: ISO 1997.
- Perfil: R.

- Filtro: GAUSS.
- Lc: 0,8 mm.
- Ls: 2,5 μm
- Velocidad media: 0,5 mm/s
- N: 5
- Pre/Post recorrido: Sí

Con ello, queda una longitud de medición de 4,80 mm y una longitud evaluable de 4,00 mm.

Una vez configurados las condiciones de medición se deciden los parámetros a medir, en este caso Ra (Rugosidad Media Aritmética) y Rz (Rugosidad Máxima), para ello se colocará la probeta a 45°, contrarias a las líneas de capa, donde se encuentra la situación más desfavorable.

Definido todo el procedimiento previo a la caracterización superficial, se procede a la medición de la rugosidad de las probetas mediante el rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ-210. Igual que con la medición de las dimensiones de las probetas, se realizarán 5 mediciones de la rugosidad en cada probeta a lo largo de toda su cara superior. A continuación, se muestra la Tabla 14 como ejemplo de una de las probetas. En el apartado de Anexos se encuentran el resto de tablas para cada probeta.

HS4H2V-1	Ra (μm)	Rz (μm)
1	5,106	24,949
2	4,523	24,629
3	4,205	23,290
4	4,384	20,532
5	4,119	23,362
MEDIA	4,467	23,352
DESV. TÍPIC	0,3899	1,7419

Tabla 14: Medidas de la rugosidad para la probeta HS4H2V-1.

Mostrado el ejemplo de cómo se han realizado las 5 medidas de la rugosidad para cada probeta, en la siguiente tabla (Tabla 15) se encuentran recogidas las Ra y Rz medias de cada una de las probetas.

PROBETA	\overline{Ra} (μm)	\overline{Rz} (μm)
HS4H2V-1	4,467	23,352
HS4H2V-2	4,561	23,176
HS4H2V-3	1,480	9,759
HT6H4V-1	3,484	21,361

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

HT6H4V-2	2,810	17,028
HT6H4V-3	1,878	11,298
HG8H6V-1	2,433	12,692
HG8H6V-2	1,525	8,729
HG8H6V-3	2,256	12,083
IS6H4V-1	8,441	30,356
IS6H4V-2	9,761	36,313
IS6H4V-3	9,567	35,460
IT8H6V-1	6,561	28,036
IT8H6V-2	7,103	30,915
IT8H6V-3	7,461	32,008
IG4H2V-1	3,413	20,854
IG4H2V-2	5,703	31,000
IG4H2V-3	3,513	21,788
CS8H6V-1	1,252	7,432
CS8H6V-2	1,650	10,805
CS8H6V-3	2,244	14,250
CT4H2V-1	6,704	35,496
CT4H2V-2	6,036	32,352
CT4H2V-3	6,721	35,730
CG6H4V-1	2,147	13,530
CG6H4V-2	1,801	11,379
CG6H4V-3	1,695	11,364

Tabla 15: Ra y Rz medias de todas las probetas.

Una vez obtenidos los datos de la rugosidad se puede observar como en el caso de las probetas fabricadas de inconel 625 se encuentra una mayor rugosidad, comprendiendo valores de Ra entre 3,4 μm y 9,7 μm y Rz entre 20,8 μm y 36,3 μm , lo que hace sugerir que este material genera una superficie con un acabado más rugoso que los demás materiales, debido probablemente al proceso de sinterizado.

Por otro lado, las probetas fabricadas de cobre presentan los valores más bajos, lo que indica un mejor acabado superficial, con valores de Ra comprendido entre 1,25 μm y 6,7 μm , siendo el valor mínimo un 87,2% menor que el valor máximo alcanzado por las probetas fabricadas de inconel 625. El valor de Rz se encuentra entre 7,4 μm y 35,7 μm .

Por último, las probetas fabricadas mediante acero par herramientas H13 recocido se encuentran entre medias de las fabricadas con inconel 625 y cobre, con valores de Ra comprendidos entre 1,5 μm y 4,5 μm y de Rz valores entre 8,7 μm y 23,3 μm .

Con todo ello, queda completada la caracterización de las probetas, quedando listas para el análisis de su respuesta mecánica a los ensayos de flexión.

6.2 Ensayo de flexión

Con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico de las probetas fabricadas, se han realizado ensayos de flexión de acuerdo con la norma ISO 7438, siguiendo el protocolo descrito anteriormente (apartado 4.2.1). En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos, centrándose en principalmente en las curvas carga-desplazamiento, la carga máxima, el grado de curvatura en el momento de carga máxima, así como la resistencia a la rotura.

Este análisis permitirá identificar la influencia de las variables estudiadas, material, patrón de relleno y número de capas exteriores, en respuesta al ensayo de flexión realizado.

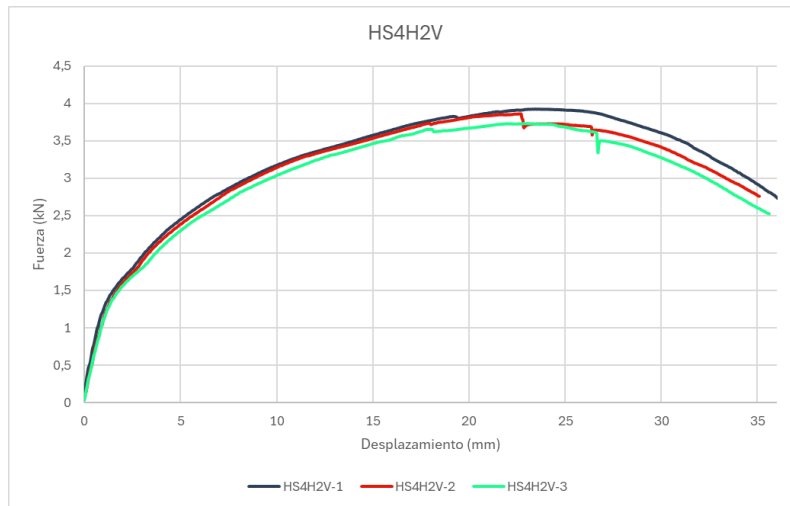
Las curvas carga-desplazamiento representan la respuesta directa de las probetas durante el ensayo de flexión. En estas curvas se puede observar el comportamiento de las diferentes combinaciones de las probetas fabricadas.

En la mayoría de los casos, las curvas presentan un tramo lineal inicial que corresponde al comportamiento elástico, seguidamente, aparece una zona no lineal vinculada a la deformación plástica, hasta alcanzar la carga máxima. Posteriormente se observa un descenso progresivo de la carga conforme avanza el desplazamiento del mandril, reflejando la pérdida de capacidad portante de la probeta.

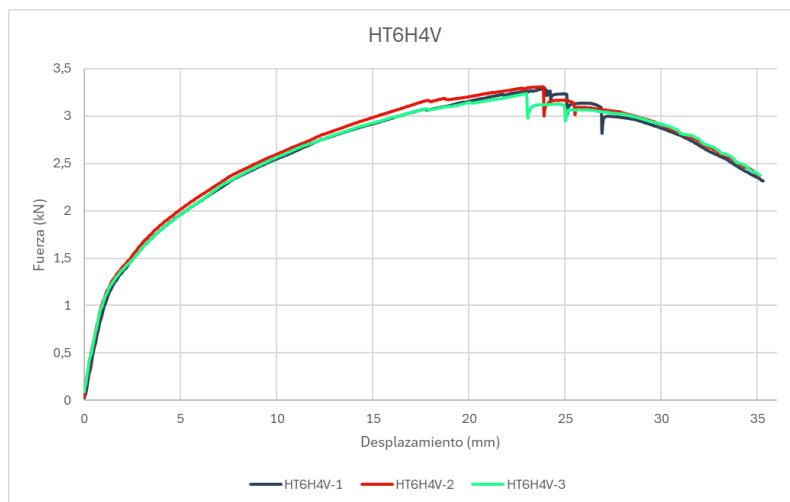
Con el objetivo de mostrar un análisis más detallado, a continuación, se muestran las curvas carga-desplazamiento para cada una de las 9 combinaciones estudiadas. De esta manera se podrá observar de manera más clara el comportamiento de cada conjunto.

Se comenzará con las probetas fabricadas con material acero para herramientas H13 recocido, recogidas en la Gráfica 1, Gráfica 2 y Gráfica 3.

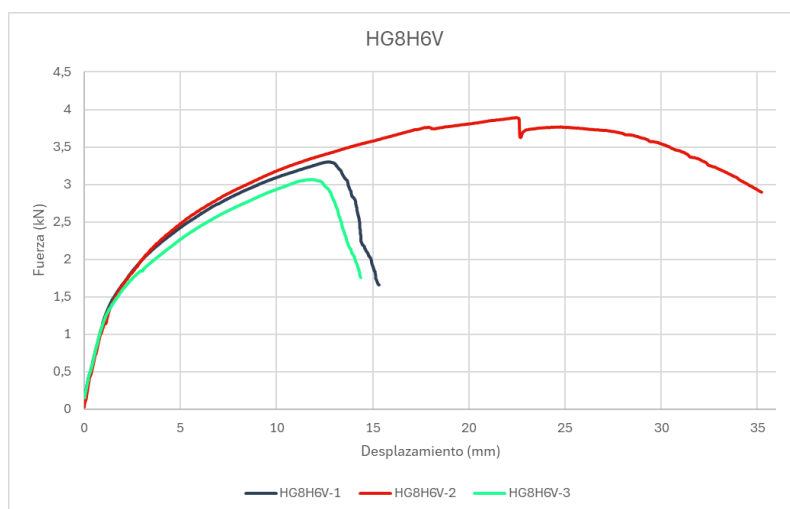
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS



Gráfica 1: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas HS4H2V.



Gráfica 2: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas HT6H4V.



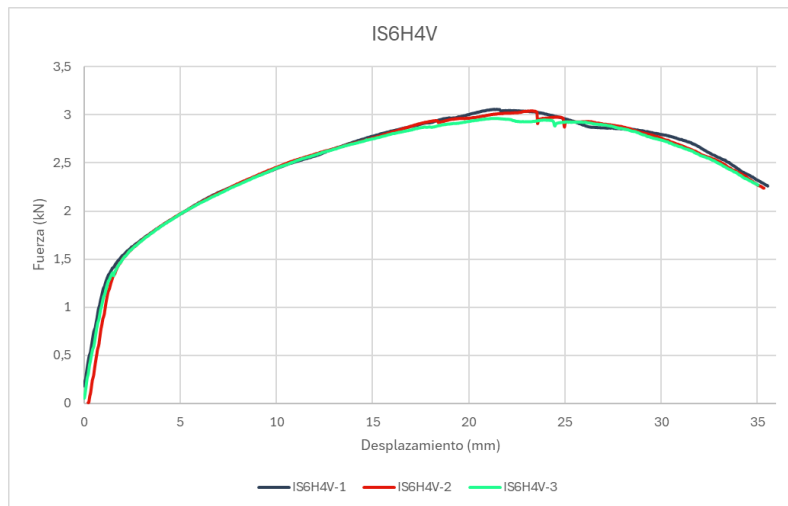
Gráfica 3: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas HG8H6V.

Vistas las 9 probetas fabricadas de acero para herramientas H13 recocido durante el ensayo a flexión se puede observar como 2 probetas de las 3 con patrón de relleno

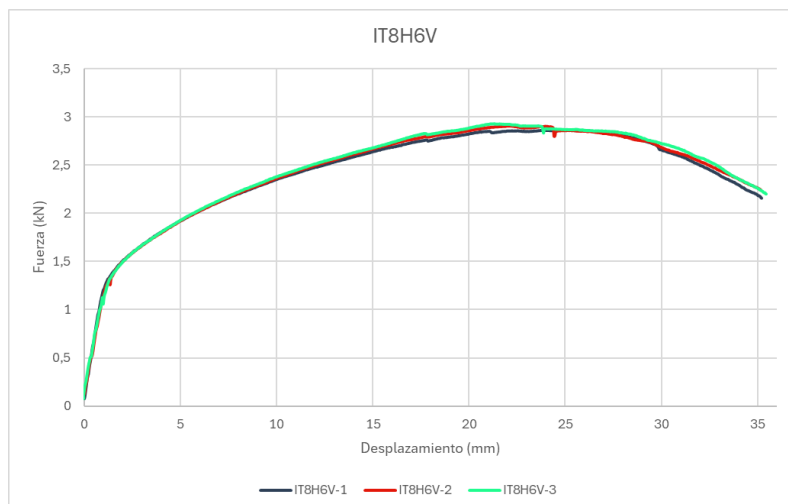
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

gyroid partieron a mitad del ensayo. Por otra parte, las probetas fabricadas con patrón de relleno sólido son las que más carga soportan. Además, destacan esa pequeña caída, cuando se encontraba en el punto máximo de carga, debido al deslizamiento entre la probeta y los rodillos de apoyo.

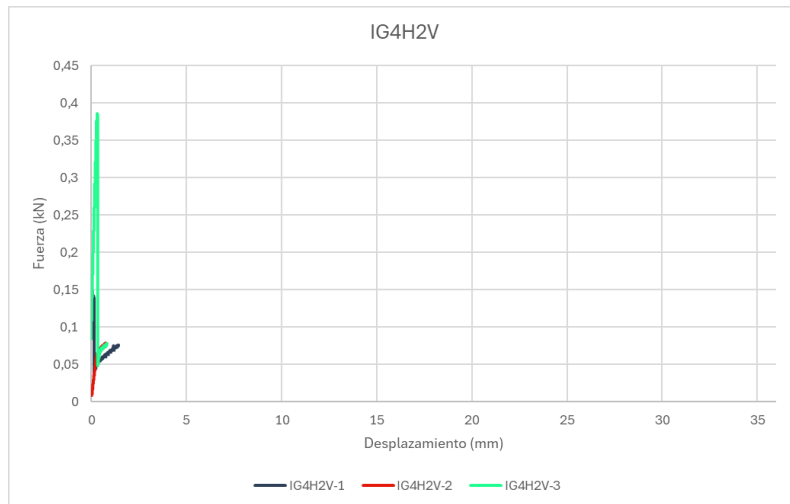
A continuación, en la Gráfica 4, Gráfica 5 y Gráfica 6 se muestran las curvas asociadas a las probetas fabricadas de Inconel 625 durante el ensayo de flexión.



Gráfica 4: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas IS6H4V.



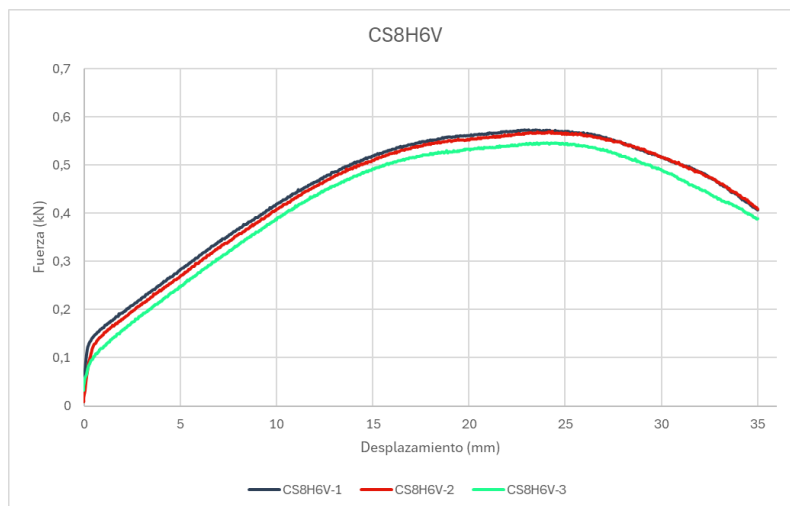
Gráfica 5: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas IT8H6V.



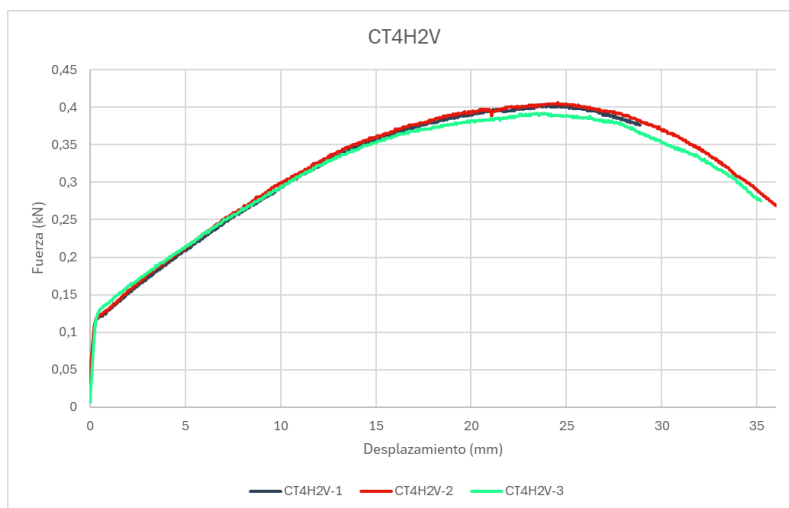
Gráfica 6: Curvas fuerza-desplazamiento de las probetas IG4H2V.

Lo primero que destaca es la rotura de las 3 probetas fabricadas con patrón de relleno gyroid y menor número de capas externas, las cuales, como se observa en la Gráfica 6, fracturaron al comienzo del ensayo. Las probetas restantes respondieron de forma adecuada al ensayo.

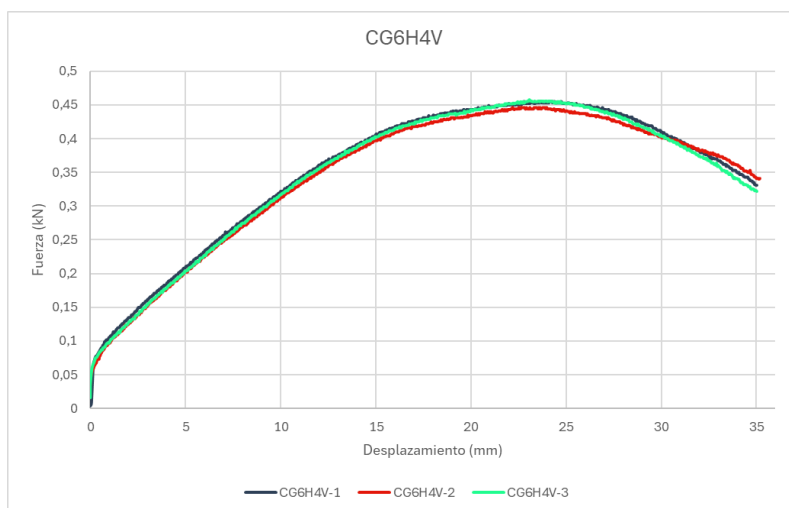
Por último, en la Gráfica 7, Gráfica 8 y Gráfica 9, se encuentran las curvas generadas por las probetas fabricadas de cobre.



Gráfica 7: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas CS8H6V.



Gráfica 8: Curva fuerza-desplazamiento de las probetas CT4H2V.



Gráfica 9: Curva fuerza- desplazamiento de las probetas CG6H4V.

Este caso ha sido el único en el que todas las probetas han cumplido satisfactoriamente con el ensayo de flexión, sin que fracturar ninguna de ellas. Como se observa, la carga empleada es bastante menor que en casos anteriores debido a la ductilidad del cobre.

Representadas las curvas carga-desplazamiento de cada una de las posibles combinaciones, se procede a la evaluación de la carga máxima alcanzada y su curvatura en dicho instante.

Para ello, a través de los datos obtenidos mediante el software PDC2K de Servosis, se determina la carga máxima sufrida por las probetas durante el ensayo. Tras determinar la carga máxima resulta necesario seguir la norma UNE-EN ISO 7438, que ha servido de referencia a lo largo de todo el trabajo. En su anexo se recogen las ecuaciones pertinentes necesarias para poder calcular el grado de curvatura. En la Ilustración 34 se

puede observar una representación de los diferentes parámetros necesarios para el cálculo de las fórmulas. Para el caso concreto del presente estudio, existen algunos parámetros constantes como son a con un valor de 3 mm, R con un valor de 15 mm, $D/2$ con un valor de 15 mm y P con un valor de 34,5 mm. Siendo f variable y dependiente del desplazamiento del mandril.

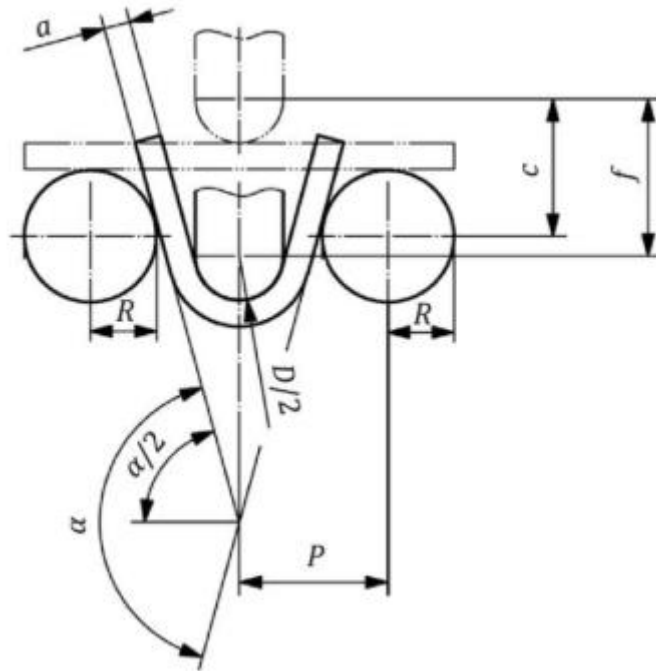


Ilustración 34: Valores para el cálculo del ángulo de doblado.
Fuente : UNE-EN ISO 7438 (2021).

Una vez conocidos dichos parámetros, se procede al cálculo de dos ecuaciones para poder obtener el grado de curvatura α .

$$c = R + a + \frac{D}{2} \quad (3)$$

$$W = \sqrt{p^2 + (f - c)^2 - c^2} \quad (4)$$

Obtenidas c y W se procede al cálculo del grado α , para ello se puede obtener mediante dos ecuaciones, por un lado, la del seno y por otro la del coseno.

$$\text{sen} \frac{\alpha}{2} = \frac{p \times c + W \times (f - c)}{p^2 + (f - c)^2} \quad (5)$$

$$\text{cos} \frac{\alpha}{2} = \frac{W \times p - c \times (f - c)}{p^2 + (f - c)^2} \quad (6)$$

Con ello ya se podría calcular el ángulo de curvatura en el instante de máxima carga, cuya variable viene determinada por el desplazamiento del mandril f .

A continuación, se presenta las tablas con los valores de carga máxima alcanzada y el ángulo de curvatura correspondiente a cada una de las probetas. En primer lugar, se presentan los ensayos con resultados positivos del ensayo y, finalmente, los dos ensayos que resultaron fallidos.

En la Tabla 16, se observa los resultados obtenidos del conjunto de probetas HS4H2V, en donde se observa como la carga máxima se consigue cerca de los 4 kN en el momento que la probeta tiene un grado de curvatura de 100 °.

HS4H2V	HS4H2V-1	HS4H2V-2	HS4H2V-3	Media
Carga máxima	3,924 kN	3,856 kN	3,731 kN	3,837 kN
Grado de Curvatura	103,24 °	98,84 °	100,27 °	100,79 °

Tabla 16: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas HS4H2V.

Siguiendo con la familia del material acero para herramienta H13, en la Tabla 17, se encuentran el conjunto de probetas HT6H4V donde la carga máxima se encuentra por debajo del conjunto de probetas HS4H2V, encontrándose ésta alrededor de los 3,3 kN en el momento que se encuentra con 104 ° de curvatura.

HT6H4V	HT6H4V-1	HT6H4V-2	HT6H4V-3	Media
Carga máxima	3,291 kN	3,310kN	3,240 kN	3,280 kN
Grado de Curvatura	106,06 °	105,09 °	101,20 °	104,11 °

Tabla 17: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas HT6H4V.

Pasando al material inconel 625, en la Tabla 18, se encuentran el conjunto de probetas IS6H4V, donde la carga, comparada con el modelo de relleno sólido del acero para herramientas H13, es menor, teniendo una media de aproximadamente 3 kN alrededor de los 95 ° de curvatura.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

IS6H4V	IS6H4V-1	IS6H4V-2	IS6H4V-3	Media
Carga máxima	3,059 kN	3,042 kN	2,961 kN	3,021 kN
Grado de Curvatura	92,41 °	102,43 °	91,95 °	95,59 °

Tabla 18: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas IS6H4V.

Siguiendo con el iniconel 625, el resultado obtenido del conjunto de probetas IT8H6V se encuentra recogido en la Tabla 19, donde la carga máxima se encuentra por debajo de los 3 kN a los 100 ° de curvatura.

IT8H6V	IT8H6V-1	IT8H6V-2	IT8H6V-3	Media
Carga máxima	2,870 kN	2,909 kN	2,933 kN	2,904 kN
Grado de Curvatura	111,62 °	95,70 °	92,41 °	99,91 °

Tabla 19: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas IT8H6V.

Con respecto al material cobre, en la Tabla 20 se encuentran los resultados obtenidos del conjunto de probetas CS8H6V donde la carga máxima es bastante menor con respecto a las probetas fabricadas de acero para herramientas H13 e iniconel 625, siendo ésta de media alrededor de los 500 N a los 104 ° de curvatura.

CS8H6V	CS8H6V-1	CS8H6V-2	CS8H6V-3	Media
Carga máxima	0,573 kN	0, 570 kN	0,546 kN	0,563 kN
Grado de Curvatura	100,58 °	107,89 °	104,01 °	104,16 °

Tabla 20: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas CS8H6V.

Para el conjunto de probetas CT4H2V los resultados se encuentra recogidos en la Tabla 21, donde la carga máxima se encuentra en 400 N y en un grado de curvatura de 105 °.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

CT4H2V	CT4H2V-1	CT4H2V-2	CT4H2V-3	Media
Carga máxima	0,403 kN	0,406 kN	0,392 kN	0,400 kN
Grado de Curvatura	104,01 °	109,00 °	103,40 °	105,47 °

Tabla 21: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas CT4H2V.

En la Tabla 22 se encuentran los resultados obtenidos del conjunto de probetas CG6H4V, únicas probetas de relleno gyroid donde las tres probetas han resultado satisfactorias del ensayo de flexión, obteniendo una media de carga máxima de 450 N en el momento que la probeta se encuentra con 100 ° de curvatura.

CG6H4V	CG6H4V-1	CG6H4V-2	CG6H4V-3	Media
Carga máxima	0,455 kN	0,446 kN	0,458 kN	0,453 kN
Grado de Curvatura	100,12 °	96,99 °	101,51 °	99,54 °

Tabla 22: Carga máxima y grado de curvatura de las probetas CG6H4V.

Por último, se encuentran recogidos los resultados obtenidos de las probetas fallidas en el ensayo de flexión. En la Tabla 23 se encuentran los resultados del conjunto de probetas HG8H6V, donde la probeta 1 partió cuando se encontraba una carga máxima de 3,3 kN con 50 ° de curvatura, mientras que la probeta 3 partió cuando se encontraba soportando 3 kN a los 45 ° de curvatura. En cambio, la probeta 2 sí realizó un ensayo satisfactorio llegando a alcanzar 3,88 kN de carga máxima cuando se encontraba con 98° de curvatura.

HG8H6V	HG8H6V-1	HG8H6V-2	HG8H6V-3
Carga máxima	3,301 kN	3,888 kN	3,066 kN
Grado de Curvatura	49,97 °	98,37 °	45,53 °

Tabla 23: Resultados fallidos de la carga máxima y grado de curvatura de las probetas HG8H2V.

En la Tabla 24, se encuentran los resultados fallidos obtenidos de las probetas IG4H2V, donde las tres probetas fracturaron al comienzo del ensayo con una carga máxima en probeta 3 de 300 N y una curvatura máxima en la probeta 2 de 2,55 °.

IG4H2V	IG4H2V-1	IG4H2V-2	IG4H2V-3
Carga máxima	0,148 kN	0,079 kN	0,386 kN
Grado de Curvatura	0,20 °	2,55 °	1,03 °

Tabla 24: Resultados fallidos de la carga máxima y grado de curvatura de las probetas IG4H2V.

De este modo, se encuentran recogidos los valores de carga máxima y su grado de curvatura en ese preciso instante.

Además, el software PCD2K de Servosis también da información acerca de la resistencia a la rotura, en la tabla 34 se encuentran recogidos los valores medios de de cada conjunto formado por sus tres probetas. Para el caso de las probetas HG8H6 y las probetas IG4H2V no aparecen debido a su rotura durante el ensayo, ya que no superó el ensayo.

Además, el PCD2K de Servosis proporciona información relativa a la resistencia a la rotura. En la Tabla 25 se recogen los valores medios obtenidos para cada conjunto de probetas, calculados a partir de las 3 probetas que forman las muestras. En el caso de datos con respecto a las probetas IG4H2V y HG8H6V no se incluyen ya que fracturaron la mayor parte de las probetas durante el ensayo y los valores obtenidos no pueden considerarse representativos.

Probeta	Resistencia a la rotura (MPa)
HS4H2V	1470,78
HT6H4V	1257,39
IS6H4V	1157,96
IT8H6V	1113,22
CS8H6V	196,18
CT4H2V	153,35
CG6H4V	173,62

Tabla 25: Resultados medios de la resistencia a la rotura de cada conjunto de probetas.

Se observa, según lo esperado, que las probetas fabricadas con acero para herramientas H13 recocido presentan mayor resistencia a la rotura, mientras que el cobre muestra los valores más bajos. Asimismo, se confirma como el patrón de relleno sólido hace que incremente la resistencia de las probetas.

A continuación, se va a realizar un análisis mediante tablas de los datos obtenidos comparándolos entre sí por grupos de variables. Se comienza con la variable material y siempre será comparado con el caso que mayor valor a dado.

Probeta	Resistencia a la rotura (MPa)	Variación
HS4H2V	1470,78	-
HT6H4V	1257,39	14,51 %

Tabla 26: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas de acero para herramienta H13 recocido.

Probeta	Resistencia a la rotura (MPa)	Variación
IS6H4V	1157,96	-
IT8H6V	1113,22	3,86 %

Tabla 27: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas de inonel 625.

Probeta	Resistencia a la rotura (MPa)	Variación
CS8H6V	196,18	-
CT4H2V	153,35	21,83 %
CG6H4V	173,62	11.50 %

Tabla 28: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas de cobre.

Se puede observar la influencia del número de capas exterior ya que en las probetas fabricadas de relleno triangular e de inonel 625, donde el número de capas es mayor, la resistencia a la rotura con respecto a la sólida varía solamente un 3,86% mientras que en el caso del cobre, donde el número de capas es menor, varía un 21,83%, quedando entre medias de ambas las probetas fabricadas de acero para herramientas H13

recocido que presenta una resistencia a la rotura de un 14,51% menor con respecto a la sólida.

Siguiendo con el patrón de relleno, se encuentran las siguientes tablas y sus respectivas variaciones .

Probeta	Resistencia a la rotura (MPa)	Variación
HS4H2V	1470,78	-
IS6H4V	1157,96	21,27 %
CS8H6V	196,81	86,66 %

Tabla 29: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas de patrón de relleno sólido.

Probeta	Resistencia a la rotura (MPa)	Variación
HT6H4V	1257,39	-
IT8H6V	1113,22	11,47 %
CT4H2V	153,35	87,80 %

Tabla 30: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas de patrón de relleno triangular.

En la Tabla 29 y Tabla 30 se puede observar como la resistencia a la rotura de las probetas fabricadas de cobre es entorno a un 90% menor con respecto las probetas fabricadas de acero para herramientas H13 recocido. También se puede observar como la resistencia a la rotura de las probetas fabricadas de inconel 625 presentan un valor de resistencia a la rotura del 21,27 % con respecto a la fabricadas de acero para herramientas H13 recocido con relleno sólido, mientras que en las fabricadas de relleno triangular, presentan una variación del 11,47 % que es debido a que en este último caso, en las probetas fabricadas de relleno triangular, el número de capas exteriores es mayor en las probetas fabricadas de inconel, siendo estas 8 en la parte superior e inferior y 6 en los laterales, mientras que las probetas fabricada de acero para herramientas H13 recocido son de 6 y 4 respectivamente.

Por último, teniendo en cuenta el número de capas exteriores, se encuentra las siguientes tablas.

Probeta	Resistencia a la rotura (MPa)	Variación
HS4H2V	1470,78	-
CT4H2V	153,35	89,57 %

Tabla 31: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas con capas exteriores 4H2V.

Probeta	Resistencia a la rotura (MPa)	Variación	Variación con respecto inconel
HT6H4V	1257,39	-	-
IS6H4V	1157,96	7,91 %	-
CG6H4V	173,62	86,19 %	85,01 %

Tabla 32: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas con capas exteriores 6H4V.

Probeta	Resistencia a la rotura (MPa)	Variación
IT8H6V	1113,22	-
CS8H6V	196,18	82,38 %

Tabla 33: Variación resistencia a la rotura de las probetas fabricadas con capas exteriores 8H6V.

En la Tabla 32 se va a añadir una columna viendo la variación de la carga de rotura de las probetas fabricadas de cobre con respecto a las fabricada de inconel 625, para sí poder ver la diferencia con los resultados de la Tabla 33. En la Tabla 32, tabla que muestra las probetas fabricadas con el menor número de capas exteriores posibles, se encuentra la mayor diferencia, donde las probetas fabricadas de cobre presentar una carga a la rotura del 89,57% con respecto a las probetas fabricadas de acero para herramientas H13 recocido con patrón de relleno sólido y por ello es donde mayor diferencia se presenta. En las probetas fabricadas de cobre con respecto a inconel 625 se muestra una menor diferencia de resistencia a la rotura cuando la probeta de cobre esta compuesta con patrón de relleno sólido y la de inconel 625 compuesta con patrón de relleno triangular.

A continuación, una vez terminados los resultados, se procede al apartado de las conclusiones sobre dicho trabajo.

7.CONCLUSIONES

La fabricación aditiva (FA) continúa consolidándose como una de las tecnologías más prometedoras en el ámbito de la producción industrial, y la fabricación aditiva de materiales metálicos se perfila cada vez más a ser una alternativa a utilizar frente a los procesos convencionales.

El presente trabajo ha llevado a cabo la caracterización de probetas metálicas realizadas mediante FA y su posterior ensayo a flexión para determinar su comportamiento mecánico.

Durante la fase de diseño y fabricación de las probetas se observa que, aun realizando el propio software de Markforged (Eiger) sobredimensiones en las probetas para compensar la contracción en el proceso de lavado y sinterizado, las dimensiones finales de las probetas presentan unas ligeras desviaciones respecto al diseño CAD, manteniéndose estas dentro de tolerancias aceptables y por encima de su valor diseñado. Las probetas fabricadas del material de inconel 625 presentan una mayor desviación dimensional en anchura y longitud, siendo el valor máximo alcanzado un 3% y un 2,5% mayor que en los valores mínimos alcanzados en las probetas fabricadas de cobre, mientras que con respecto al espesor, las probetas fabricadas de acero para herramientas H13 presentan mayor desviación siendo su valor máximo un 7,6% mayor que en el valor mínimo alcanzado en las probetas de cobre. En todos los casos las probetas fabricadas de cobre mostraron la menor desviación respecto al diseño CAD.

Con respecto a la caracterización superficial, las probetas fabricadas del material inconel 625 presentan la mayor rugosidad, tanto rugosidad media aritmética (Ra) como rugosidad máxima (Rz), mientras que las probetas fabricadas de cobre presentan los valores más bajos, siendo el valor mínimo un 87,2% menor que el valor máximo alcanzado en las probetas fabricadas de inconel 625, quedando las probetas fabricadas de acero para herramientas H13 recocido en valores intermedios.

Por otra parte, con respecto al ensayo de flexión realizado se puede determinar que las probetas fabricadas de acero para herramientas H13 recocido presentan la mayor resistencia, seguidas de las probetas fabricadas de inconel 625, teniendo esta una resistencia la rotura de entre un 7,91 % y un 21,27 % menor que las probetas de acero para herramienta H13 recocido, mientras que las probetas fabricadas de cobre, como era

de esperar, registran los valores con menor resistencia, siendo su resistencia a la rotura de entre un 85-90 % con las probetas de acero para herramienta H13 recocido.

Además, dentro de cada grupo de material, el patrón de relleno influye a la hora de realizar el ensayo, siendo el relleno sólido el que más resistencia proporciona. Por otro lado, el patrón de relleno *gyroid* no funciona bien para la flexión, fallando en las probetas fabricadas con materiales con menor ductilidad como el acero para herramientas H13 recocido e inonel 625, mientras que para un material muy dúctil como el cobre si funciona satisfactoriamente. El patrón de relleno triangular no es tan resistente como el patrón de relleno sólido, siendo entre un 3,86 % y un 21,83 % menor la resistencia a la rotura de probetas del mismo material.

Por último, la variable correspondiente al número de capas exteriores de la pared superior, inferior y lateral muestra un efecto influyente, aunque en las probetas sólidas son más despreciables, ya que se imprime de forma maciza, en el resto de configuraciones con menor densidad de relleno como son la configuración triangular y *gyroid*, se observa una mejora en la capacidad de carga cuanto mayor es este número de capas, consiguiendo acercarse a valores obtenidos con el patrón de relleno sólido como por ejemplo la probeta IT8H6V siendo la resistencia a la rotura solo un 3,86% menor con respecto a la probeta IS6H4V o el valor de la probeta CT4H2V, que al tener el menor número de capas posible con respecto a la probeta HS4H2V, tiene la mayor diferencia entre probetas de cobre u acero para herramientas H13 recocido, siendo una resistencia a la rotura un 89,57 % menor.

Los resultados obtenidos en este estudio permiten afirmar que la FA es una alternativa viable frente a procesos de fabricación convencionales, como la forja o fundición, siempre que, para probetas fabricadas de materiales acero para herramienta H13 recocido e inonel 625, se empleen un patrón de relleno sólido o triangular, ya que el comportamiento de probetas fabricadas de estos materiales con patrón de relleno *gyroid* presenta un comportamiento frágil. En el caso de probetas fabricadas de cobre, al ser un material con mayor ductilidad, permite los tres patrones de relleno evaluados.

8.LÍNEAS FUTURAS

Los resultados obtenidos constituyen una base para futuros trabajos acerca de materiales dúctiles y su comportamiento a flexión, siendo este el primer paso de futuros proyectos que aborden esta nueva tendencia de la fabricación aditiva. A continuación, plantean posibles líneas futuras a seguir:

- Ampliación del número de materiales evaluados, como aceros inoxidable o aleaciones de aluminio que permitan comparar más comportamientos.
- Influencia de la orientación de fabricación, repitiendo los ensayos con probetas fabricadas en otra orientación (inclinada o vertical).
- Validación del patrón de relleno *gyroid*, repetir los ensayos con materiales con mayor ductilidad que el inconel 625 y acero para herramientas H13 recocido, ya que estos han resultado desfavorables o realizarlos con otra configuración como relleno sólido o mayor número de capas exteriores.
- Simulación numérica del ensayo de flexión, emplear software de elementos finitos para predecir el comportamiento de las probetas y validar los resultados experimentales.
- Realizar ensayo de dureza, observando la microestructura resultante del proceso ADAM.
- Aumentar el número de probetas fabricadas, de manera que si falla alguna, se disponga de suficientes probetas que disponga de resultados representativos y comparables.

9.BIBLIOGRAFÍA

- UNE-EN ISO 7438:2021 Materiales metálicos. Ensayo de doblado. (2021).
- Abramowitch, S., & Easley, D. (2016). Introduction to Classical Mechanics. *Biomechanics of the Female Pelvic Floor*, 89-107. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803228-2.00004-0>
- Batista Ponce, M. (s. f.). *Introducción. La Fabricación Aditiva dentro del contexto actual de Ingeniería de Fabricación.*
- Belda Rodríguez, J. (2023). *FABRICACIÓN ADITIVA CON PLA. ESTUDIO DE PROPIEDADES SEGÚN SU MORFOLOGÍA DE RELLENO.*
- Bhatia, A., & Sehgal, A. K. (2023). Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 81(2), 1060-1067. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.04.379>
- Biesiekierski, A., Munir, K., Li, Y., & Wen, C. (2020). Mechanical testing of metallic biomaterials. *Metallic Biomaterials Processing and Medical Device Manufacturing*, 427-467. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102965-7.00013-8>
- Darsin, M., Sabariman, W. A., Trifiananto, M., & Fachri, B. A. (2023). Flexural properties of metal 3D printing products using PLA-stainless steel filament. *AIP Conference Proceedings*, 2482. <https://doi.org/10.1063/5.0110568>
- DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112-224. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2017.10.001>
- Galati, M., & Minetola, P. (2019). Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts. *Materials* 2019, Vol. 12, Page 4122, 12(24), 4122. <https://doi.org/10.3390/MA12244122>
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89. <https://doi.org/10.1016/J.CAD.2015.04.001>

- Golab, M., Massey, S., & Moultrie, J. (2022). How generalisable are material extrusion additive manufacturing parameter optimisation studies? A systematic review. *Heliyon*, 8(11), e11592. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E11592>
- Kaleli, N., Uçar, Y., Ekren, O., & Ural, Ç. (2022). Effect of layer thickness on the flexural strength of multiple-unit laser-sintered metal frameworks. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 127(4), 651-658. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.10.006>
- Kumar, V., Kaur, H., Kumari, A., Hooda, G., Garg, V., & Dureja, H. (2023). Drug delivery and testing via 3D printing. *Bioprinting*, 36, e00298. <https://doi.org/10.1016/J.BPRINT.2023.E00298>
- Lewandowski, J. J., & Seifi, M. (2016). Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties. *Annual Review of Materials Research*, 46(Volume 46, 2016), 151-186. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-MATSCI-070115-032024/CITE/REFWORKS>
- Li, N., Qiao, D., Zhao, S., Lin, Q., Zhang, B., & Xie, F. (2021). 3D printing to innovate biopolymer materials for demanding applications: A review. *Materials Today Chemistry*, 20, 100459. <https://doi.org/10.1016/J.MTCHEM.2021.100459>
- Liu, G., Zhang, X., Chen, X., He, Y., Cheng, L., Huo, M., Yin, J., Hao, F., Chen, S., Wang, P., Yi, S., Wan, L., Mao, Z., Chen, Z., Wang, X., Cao, Z., & Lu, J. (2021). Additive manufacturing of structural materials. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 145. <https://doi.org/10.1016/J.MSER.2020.100596>
- Mahieux, C. A. (2006). ENVIRONMENTAL IMPACT ON MICROMECHANICAL AND MACROMECHANICAL CALCULATIONS. *Environmental Degradation of Industrial Composites*, 175-232. <https://doi.org/10.1016/B978-185617447-3/50030-X>
- Markforged. (s. f.-a). *Acero para herramientas H13: acero impreso en 3D versátil para trabajos en caliente*. Recuperado 21 de junio de 2025, de <https://markforged.com/materials/metals/h13-tool-steel>
- Markforged. (s. f.-b). *Copper 3D Printing - Manufacture Complex Parts with Copper*. Recuperado 21 de junio de 2025, de <https://markforged.com/materials/metals/copper>

- Markforged. (s. f.-c). *H13 Tool Steel - Versatile Hot Work 3D Printed Steel*. Recuperado 21 de junio de 2025, de <https://markforged.com/materials/metals/h13-tool-steel>
- Markforged. (s. f.-d). *Inconel: prototipos funcionales y piezas de uso final impresos en 3D*. Recuperado 21 de junio de 2025, de <https://markforged.com/materials/metals/625-inconel>
- Markforged. (s. f.-e). *What is Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM)?* Recuperado 21 de junio de 2025, de <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-atomic-diffusion-additive-manufacturing-adam>
- Opoz, T. T., Burgess, A., Ahuir-Torres, J. I., Kotadia, H. R., & Tammam-Williams, S. (2024). The effect of surface finish and post-processing on mechanical properties of 17-4 PH stainless steel produced by the atomic diffusion additive manufacturing process (ADAM). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *130*(7-8), 4053-4066. <https://doi.org/10.1007/S00170-024-12949-6/FIGURES/12>
- Pandey, P., Nayak, A., & Taufik, M. (2024). Evaluation of mathematical models for surface roughness prediction of PolyJet 3D printed parts. *Advances in Materials and Processing Technologies*, *10*(1), 89-98. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2097416>
- Pontes, A. J. (2021). Designing for additive manufacturing. *Design and Manufacturing of Plastics Products: Integrating Traditional Methods With Additive Manufacturing*, 249-292. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819775-2.00009-7>
- RepRap Darwin - RepRap*. (s. f.). Recuperado 4 de junio de 2025, de https://reprap.org/wiki/RepRap_Darwin
- Rodriguez, J., Zuriarrain, A., Madariaga, A., Arrazola, P. J., Dominguez, E., Fraile, I., & Soler, D. (2023). Mechanical Properties and Fatigue Performance of 17-4 PH Stainless Steel Manufactured by Atomic Diffusion Additive Manufacturing Technology. *Journal of Manufacturing and Materials Processing 2023, Vol. 7, Page 172*, 7(5), 172. <https://doi.org/10.3390/JMMP7050172>
- Rouf, S., Raina, A., Irfan Ul Haq, M., Naveed, N., Jeganmohan, S., & Farzana Kichloo, A. (2022). 3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications.

-
- Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(3), 143-158.
<https://doi.org/10.1016/J.AIEPR.2022.02.001>
- Saba, N., Jawaid, M., & Sultan, M. T. H. (2019). An overview of mechanical and physical testing of composite materials. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1>
- Schultheiß, G., Burkhard Heine, ·, & Merkel, M. (2024). Characterization of flexural fatigue behaviour of additively manufactured (PBF-LB) gyroid structures. *Progress in Additive Manufacturing*, 9, 1331-1340. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00607-y>
- Srivastava, M., Rathee, S., Patel, V., Kumar, A., & Koppad, P. G. (2022). A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2612-2641.
<https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2022.10.015>
- UNE-EN ISO/ASTM 52900:2021 Fabricación aditiva. Principios generales. Fundamentos y vocabulario. (2022).
- Wohlers, T., Gornet, T., Mostow, N., Campbell, I., Diegel, O., Kowen, J., Huff, R., Stucker, B., Fidan, I., Doukas, A., Drab, B., Drstvenšek, I., Eitsert, N., Espalín, D., Feldhausen, T., Ghany, K., Gillett-Crooks, M., Guo, D., Held, A., ... Peels, J. (2016). History of Additive Manufacturing. *SSRN Electronic Journal*.
<https://doi.org/10.2139/SSRN.4474824>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering*, 2012.
<https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- Wurth Additive Group. (s. f.). *Markforged Metal X Bundle - Metal X / Wash 1 / Sinter 1* . Recuperado 23 de junio de 2025, de <https://wurthadditive.com/products/metal-x-wash-1-sinter-1>

10. ANEXOS

10.1 Fichas Técnicas de los Materiales

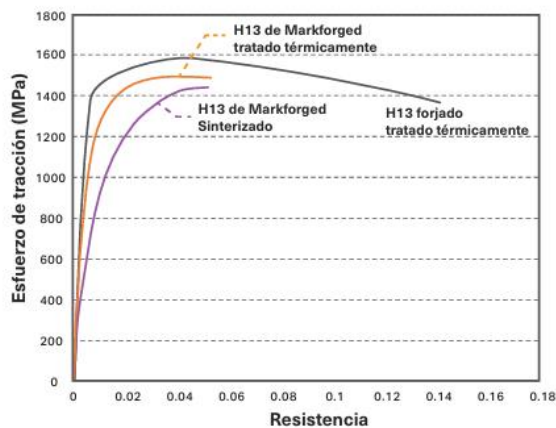
HOJA INFORMATIVA DE MATERIALES METÁLICOS



H13

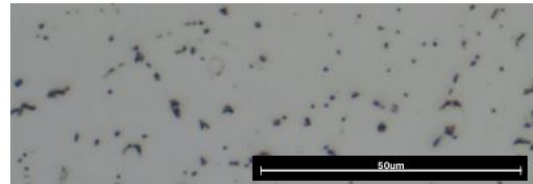
ACERO PARA HERRAMIENTAS

El acero para herramientas H13, más duro que el acero inoxidable 17-4 PH y capaz de conservar las propiedades del material a altas temperaturas, es un material extremadamente versátil para trabajar. El H13 de Markforged puede tratarse térmicamente a 45 HRC, con una tensión de rotura (UTS) de 1500 MPa. Los clientes de Markforged lo utilizan para cuerpos de herramientas, utillaje para soldar y otras piezas que requieren de dureza o resistencia al calor.



● H13 de Markforged sinterizado

Acero para herramientas H13 impreso en la impresora Metal X, lavado en el sistema Wash-1 y sinterizado en el horno Sinter-1. A la izquierda se muestra la imagen de una microestructura sinterizada.



● H13 de Markforged tratado térmicamente

Acero para herramientas H13 impreso con el sistema Metal X, templado al aire a 1010 °C y con temple doble a 600 °C.

● Forjado H13 tratado térmicamente

Estándar de acero forjado para herramientas H13 del manual ASM Specialty Handbook - templado al aire a 1010°C y con temple doble a 600°C.

Propiedades físicas	Prueba	Markforged sinterizado	Markforged tratado térmicamente	Forjado tratado térmicamente	Composición	Peso (%)
Resistencia a la tracción óptima [MPa]	ASTM E8	1420	1500	1580	Cromo	4,7-5,5
Límite de fluencia [MPa] de 0,2 %	ASTM E8	800	1250	1360	Molibdeno	1,3-1,7
Alargamiento de rotura [%]	ASTM E8	5	5	14	Silicio	0,8-1,2
Dureza [HRC]	ASTM E18	40	45	46	Vanadio	0,8-1,2
Densidad relativa [%]	ASTM B923	94,5	94,5	100	Carbono	0,3-0,45
					Manganeso	0,2-0,5
					Fósforo	0,03 máx.
					Azufre	0,03 máx.
					Hierro	bal

Estos datos representan los valores típicos del acero para herramientas H13 de Markforged sinterizado y después del tratamiento térmico. Los valores se han probado internamente, y tanto la composición del material como los datos de sinterización se han verificado en un laboratorio independiente. Estos datos representativos se han probado, medido o calculado utilizando métodos estándar y pueden cambiar sin previo aviso. Markforged no ofrece garantías de ningún tipo, ni expresas ni implícitas.
* Datos de forjado tratado térmicamente solo incluidos en la tabla. Datos del manual ASM Specialty Handbook: Tool Materials, página 140.

HOJA INFORMATIVA DE MATERIAL

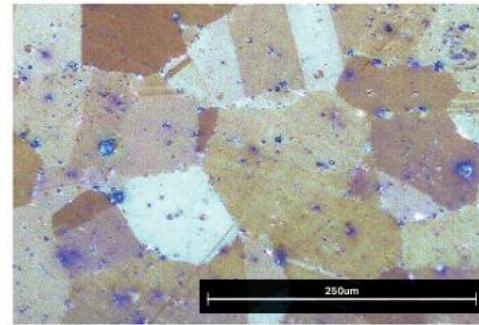
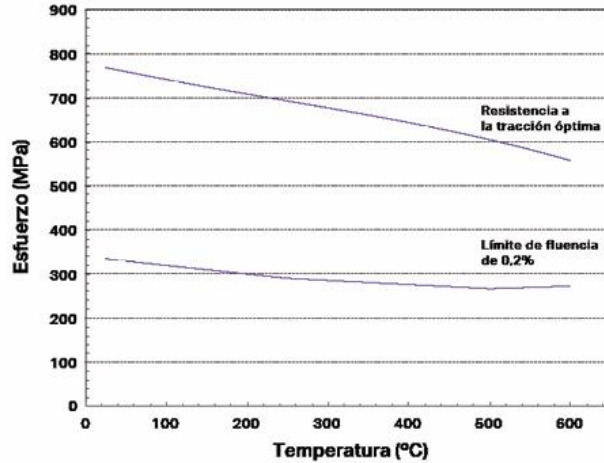


Inconel 625

Otras denominaciones: UNS N06625, ISO NW6625, DIN 17744

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

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



Inconel 625 de Markforged sinterizado

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

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

1. Los datos de AMS 5599 forjado representan los valores mínimos, salvo en el caso de la dureza.

2. La densidad relativa del Inconel 625 se basa en un valor de referencia de 8,44 g/cm³.

3. La prueba de temperatura elevada de la norma ASTM E21 se ha realizado en un laboratorio NADCAP externo. Las muestras se han impreso en XY y la distancia entre señales se ha mecanizado a medida.

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

markforged.com

REV 1.1 -11/5/2019

480 Pleasant St, Watertown, MA 02472, EE. UU.

Cobre

El cobre es un metal blando y dúctil utilizado principalmente por su conductividad eléctrica y térmica. Por su alta conductividad, es un material ideal para fabricar disipadores e intercambiadores de calor, componentes de distribución de energía (como barras colectoras), equipos de fabricación (como mangos para soldar por puntos), antenas de RF, etc. Con la impresora Metal X se puede imprimir con cobre puro para producir piezas optimizadas geométricamente. Antes, estas piezas tenían un elevado coste económico, se tardaba mucho en fabricarlas o directamente no se podían hacer.



Propiedades físicas	Prueba	Temperatura	Ajustes de impresión / Orientación	Markforged sinterizado	Estándar MIM	Composición	Peso (%)
Resistencia a la tracción óptima [MPa]	ASTM E8	Temperatura ambiente	Sólido XY	193 ¹	207	Cobre	99,8 mín.
Límite de resistencia a la tracción de 0,2 %	ASTM E8	Temperatura ambiente	Sólido XY	26 ¹	69	Oxígeno	0,05 máx.
Alargamiento de rotura	ASTM E8	Temperatura ambiente	Sólido XY	45	30	Hierro	0,05 máx.
Densidad relativa	ASTM B923	Temperatura ambiente	Sólido	98 ²	98	Otros	bal
Conductividad eléctrica [IACS ³]	ASTM E1004	Temperatura ambiente	Sólido XY	84	—		
Conductividad térmica [W/mk ⁴]	ASTM E1461	Temperatura ambiente	Sólido XY y Z	350	328		
Coeficiente de expansión térmica	ASTM E831-19 ⁵	68-100 °F	Sólido Z	9,6 x 10 ⁻⁴ /°F	8,7 x 10 ⁻⁴ /°F		
		68-150 °F		9,7 x 10 ⁻⁴ /°F	8,9 x 10 ⁻⁴ /°F		
	68-200 °F	9,8 x 10 ⁻⁴ /°F		9,1 x 10 ⁻⁴ /°F			
	68-250 °F	9,9 x 10 ⁻⁴ /°F		9,3 x 10 ⁻⁴ /°F			
	68-300 °F	10,0 x 10 ⁻⁴ /°F		9,4 x 10 ⁻⁴ /°F			
	68-500 °F	10,1 x 10 ⁻⁴ /°F		—			
68-750 °F	10,5 x 10 ⁻⁴ /°F	—					

- Las probetas se reducen y se laminan con los ajustes predeterminados para el cobre (pero sin balsa). De manera predeterminada, las piezas de cobre son sólidas.
- La densidad se basa en un valor teórico de 8,96 g/cc.
- La conductividad eléctrica, cuando se evalúa con instrumentos de corrientes inducidas, suele expresarse como un porcentaje de la conductividad del Estándar Internacional de Cobre Recocido (% IACS). La conductividad del Estándar de Cobre Recocido se define como 0,58 x 10⁸ S/m (100 % IACS) a 20 °C.
- La difusividad térmica se mide según la norma ASTM E1461. La difusividad se ha convertido en conductividad mediante la fórmula conductividad térmica = difusividad térmica * densidad * calor específico. Se considera que el calor específico del cobre es igual a 0,385 J/g-K según el manual *Handbook of Chemistry and Physics 72nd Edition*.
- El coeficiente de expansión térmica (CTE) del material de Markforged sinterizado se ha medido en un laboratorio externo mediante Análisis Termomecánico (ASTM E831). En la referencia del manual de MIM se ha utilizado un dilatómetro de varilla de empuje (ASTM E228).

Estos datos representan los valores típicos del cobre de Markforged sinterizado. Las muestras de Markforged se han impreso con el ajuste de relleno sólido. Todos los valores se basan en pruebas de laboratorios externos, salvo la densidad relativa, que se ha probado en Markforged. Estos datos representativos se han probado, medido y calculado utilizando métodos estándar y pueden cambiar sin previo aviso. Markforged no ofrece garantías de ningún tipo, ni expresas ni implícitas.

Propiedades mecánicas completas	Estándar	Temperatura	Ajustes de impresión / Orientación	Markforged sinterizado	Estándar MIM
Resistencia a la tracción óptima [MPa]	ASTM E8	Temperatura ambiente	Sólido XY	193 ¹	207
			Sólido Z	117 ¹	
			Resistente a fugas XY	197 ¹	
			Resistente a fugas Z	141 ¹	
Límite de resistencia a la tracción [MPa] de 0,2 %	ASTM E8	Temperatura ambiente	Sólido XY	26 ¹	69
			Sólido Z	26 ¹	
			Resistente a fugas XY	31 ¹	
			Resistente a fugas Z	32 ¹	
Alargamiento de rotura [%]	ASTM E8	Temperatura ambiente	Sólido XY	45 ¹	30
			Sólido Z	15 ¹	
			Resistente a fugas XY	58 ¹	
			Resistente a fugas Z	15 ¹	

10.2 Fichas Técnicas del Sistema de Impresión



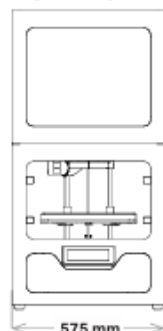
ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO

Metal X (2.^a generación)

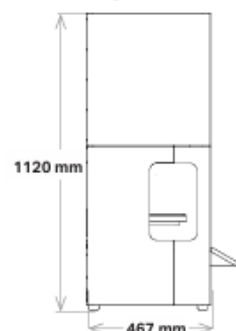
La Metal X es una impresora 3D revolucionaria que imprime polvo de metal aglomerado dentro de una matriz de plástico, lo que elimina los riesgos de seguridad que presentan los métodos tradicionales de impresión 3D de metal y proporciona nuevas características, como el relleno de celdas cerradas para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

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

VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



La pantalla táctil se extiende horizontalmente 12 cm desde la parte frontal de la impresora.

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

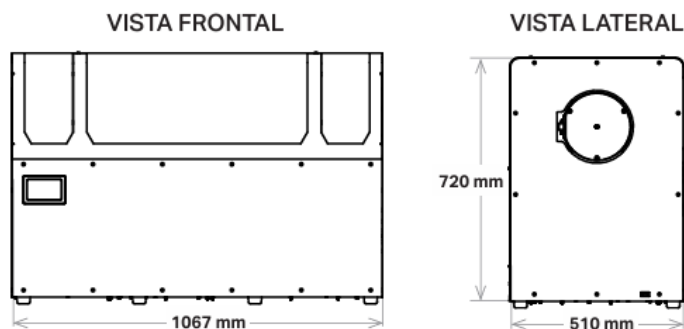


ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO

Sinter-1

El Markforged Sinter-1 es un horno de sinterización de alto rendimiento ideal para la producción de tiradas cortas. Es un dispositivo económico y fiable que se basa en la tecnología de moldeo por inyección de metal (MIM), utilizada desde hace 30 años. Con una zona caliente activa de 4760 cm³, el Sinter-1 convierte las piezas lavadas en piezas finales de metal de alta calidad totalmente compactadas en solo 26 horas.

Propiedades del horno	Materiales compatibles	Piezas impresas con la impresora Metal X que han pasado por el proceso de desaglutinación química
	Elemento de calentamiento	Kanthal
	Controlador	Ciclo automático preprogramado
	Tiempo de sinterización	26 horas*
	Temp. interna máxima	1300 °C / 2372 °F
	Capacidad de sinterización	Rectangular con arco superior, 141 mm DI x 305 mm L
	Volumen de trabajo de sinterización	3020 cm ³
	Área de superficie de sinterización	348 cm ² , una sola bandeja cerámica
	Tamaño de la bandeja	11,4 cm an. x 30,4 cm prof.
	Tipos de gas	Argón, mezcla de argón / hidrógeno
	Retorta	Retorta refractaria de alta pureza (sin carbón)
	Módulo de RF	Banda de frecuencias 2,4 GHz, estándar Wi-Fi 802.11 b/g/n
	Seguridad e instalación	Requisitos ambientales
Alimentación		200–240 V monofásico, 30 A, cableado recomendado 50 A
Dimensiones físicas	Dimensiones externas	1067 x 510 x 720 mm
	Peso	136 kg



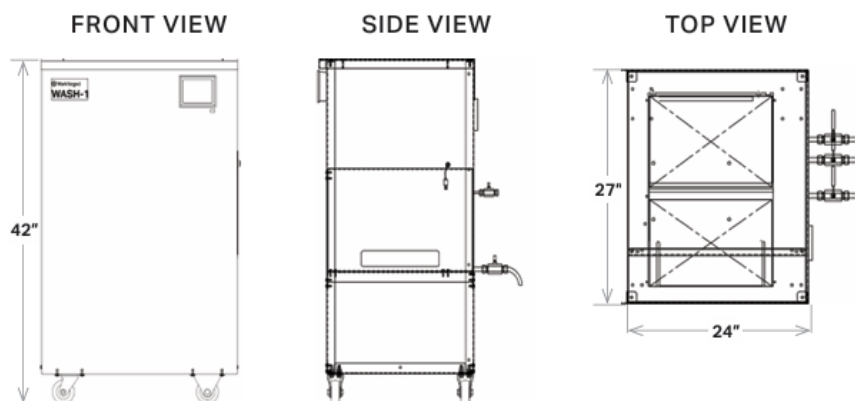
* Puede variar en función del material. **Nota:** Todas las especificaciones son aproximadas y pueden cambiar sin previo aviso.

PRODUCT SPECIFICATIONS

Wash-1

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

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



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

10.3 Fichas Técnicas de la Máquina de Ensayo



ME 402 características

Me 402

	ME 402/0,1	ME 402/1	ME 402/2	ME 402/5	ME 402/10	ME 402/20	ME 402/30
Capacidad de carga (t)	0,1	1	2	5	10	20	30
Velocidad máx. de trabajo (mm/min)	200. Opcionalmente hasta 500 mm/min						
Exactitud de la medida	FUERZA: +/- 1 % POSICION: +/- 1%						
Máx. luz axial libre (mm)	1000						
Recorrido útil del husillo (mm)	400 en modelos de suelo / 300 en modelos de sobremesa						
Luz lateral libre entre columnas (mm)	350	520	520	610	610	610	610
Luz lateral libre modelo sobremesa	350	350	350	350	350	n.d.	n.d.
Dimensiones marco de ensayos. Frontal /fondo/altura(mm)	650 / 400 / 1800	800 /500 /1800	800 /500 /2000	900 /500 /2050	900 /500 /2100	900 /500 /2150	900 /500 /2200
Dimensiones marco de ensayos modelo sobremesa (mm)	500 /400 /1500	500 /400 /1500	500 /400 /1500	550 /450 /1650	600 / 500 /1650	n.d.	n.d.
Peso aprox. Marco de ensayos(Kg)	180	310	410	610	710	790	980
Requisitos eléctricos	220/380 VAC / 50/60Hz +/- 10%						

Potencias intermedias pueden ser fabricadas bajo demanda, normalmente sus medidas se asocian al modelo inmediatamente superior.

www.servosis.com

10.4 Cálculos y Tablas

10.4.1 Dimensiones de las Probetas

Siendo a el espesor de la probeta, b la anchura de la probeta y L la longitud de la probeta.

PROBETA			
HS4H2V-1	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,19	30,75	81,72
2	3,21	30,70	81,73
3	3,20	30,68	81,72
4	3,23	30,64	81,75
5	3,24	30,66	81,68
MEDIA	3,21	30,69	81,72
Desv. Típico	0,02074	0,04219	0,02550

Tabla 34: Medición de las dimensiones de la probeta HS4H2V-1.

PROBETA			
HS4H2V-2	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,17	30,66	81,76
2	3,23	30,68	81,74
3	3,20	30,60	81,77
4	3,16	30,63	81,80
5	3,18	30,67	81,77
MEDIA	3,19	30,65	81,77
Desv. Típico	0,02775	0,03271	0,02168

Tabla 35: Medición de las dimensiones de la probeta HS4H2V-2.

PROBETA			
HS4H2V-3	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,22	30,71	81,86
2	3,24	30,75	81,81
3	3,25	30,74	81,85
4	3,27	30,70	81,79
5	3,25	30,77	81,80
MEDIA	3,25	30,73	81,82
Desv. Típico	0,01817	0,02881	0,03114

Tabla 36: Medición de las dimensiones de la probeta HS4H2V-3.

PROBETA			
HT6H4V-1	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,18	30,45	81,05
2	3,25	30,47	81,10
3	3,22	30,40	81,10
4	3,23	30,48	81,08
5	3,19	30,41	81,12
MEDIA	3,21	30,44	81,09
Desv. Típico	0,02881	0,03564	0,02646

Tabla 37: Medición de las dimensiones de la probeta HT6H4V-1.

PROBETA			
HT6H4V-2	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,22	30,48	81,18
2	3,18	30,50	81,20
3	3,20	30,48	81,13
4	3,21	30,49	81,21
5	3,18	30,44	81,08
MEDIA	3,20	30,48	81,16
Desv. Típico	0,01789	0,02280	0,05431

Tabla 38: Medición de las dimensiones de la probeta HT6H4V-2.

PROBETA			
HT6H4V-3	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,25	30,48	81,03
2	3,23	30,48	81,09
3	3,23	30,52	81,07
4	3,19	30,45	81,07
5	3,22	30,49	81,13
MEDIA	3,22	30,48	81,08
Desv. Típico	0,02191	0,02510	0,03633

Tabla 39: Medición de las dimensiones de la probeta HT6H4V-3.

PROBETA			
HG8H6V-1	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,17	30,58	81,28
2	3,16	30,52	81,29
3	3,18	30,51	81,26
4	3,20	30,53	81,31
5	3,17	30,56	81,32
MEDIA	3,18	30,54	81,29
Desv. Típico	0,01517	0,02915	0,02387

Tabla 40: Medición de las dimensiones de la probeta HG8H6V-1.

PROBETA			
HG8H6V-2	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,19	30,50	81,11
2	3,16	30,59	81,17
3	3,16	30,56	81,14
4	3,20	30,49	81,15
5	3,24	30,48	81,10
MEDIA	3,19	30,52	81,13
Desv. Típico	0,03317	0,04827	0,02881

Tabla 41: Medición de las dimensiones de la probeta HG8H6V-2.

PROBETA			
HG8H6V-3	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,21	30,60	81,25
2	3,24	30,54	81,29
3	3,22	30,59	81,27
4	3,18	30,53	81,24
5	3,21	30,55	81,28
MEDIA	3,21	30,56	81,27
Desv. Típico	0,02168	0,03114	0,02074

Tabla 42: Medición de las dimensiones de la probeta HG8H6V-3.

PROBETA			
IS6H4V-1	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,08	30,96	82,82
2	3,00	30,88	82,60
3	3,03	30,90	82,55
4	3,11	31,05	82,65
5	3,05	30,97	82,62
MEDIA	3,05	30,95	82,65
Desv. Típico	0,04278	0,06686	0,10281

Tabla 43: Medición de las dimensiones de la probeta IS6H4V-1.

PROBETA			
IS6H4V-2	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,08	30,99	82,53
2	3,04	31,00	82,55
3	3,01	30,87	82,57
4	3,03	30,95	82,58
5	3,05	30,98	82,50
MEDIA	3,04	30,96	82,55
Desv. Típico	0,02588	0,05263	0,03209

Tabla 44: Medición de las dimensiones de la probeta IS6H4V2.

PROBETA			
IS6H4V-3	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,00	31,01	82,45
2	2,98	30,89	82,50
3	3,01	31,06	82,57
4	3,06	31,02	82,43
5	3,05	30,96	82,50
MEDIA	3,02	30,99	82,49
Desv. Típico	0,03391	0,06535	0,05431

Tabla 45: Medición de las dimensiones de la probeta IS6H4V-3.

PROBETA			
IT8H6V-1	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,14	30,75	82,18
2	3,17	30,76	82,19
3	3,11	30,88	82,24
4	3,15	30,79	82,12
5	3,14	30,90	82,14
MEDIA	3,14	30,82	82,17
Desv. Típico	0,02168	0,06950	0,04669

Tabla 46: Medición de las dimensiones de la probeta IT8H6V-1.

PROBETA			
IT8H6V-2	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,11	30,79	82,07
2	3,20	30,77	82,21
3	3,11	30,78	82,17
4	3,16	30,81	82,06
5	3,10	30,84	82,16
MEDIA	3,14	30,80	82,13
Desv. Típico	0,04278	0,02775	0,06580

Tabla 47: Medición de las dimensiones de la probeta IT8H6V-2.

PROBETA			
IT8H6V-3	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,08	30,80	82,07
2	3,07	30,79	82,14
3	3,14	30,79	82,15
4	3,09	30,83	82,08
5	3,13	30,75	82,15
MEDIA	3,10	30,79	82,12
Desv. Típico	0,03114	0,02864	0,03962

Tabla 48: Medición de las dimensiones de la probeta IT8H6V-3.

PROBETA			
IG4H2V-1	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,17	30,55	82,30
2	3,16	30,64	82,41
3	3,12	30,68	82,30
4	3,09	30,64	82,25
5	3,18	30,71	82,20
MEDIA	3,14	30,64	82,29
Desv. Típico	0,03782	0,06025	0,07791

Tabla 49: Medición de las dimensiones de la probeta IG4H2V-1.

PROBETA			
IG4H2V-2	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,20	30,72	82,12
2	3,10	30,65	82,21
3	3,21	30,72	82,14
4	3,17	30,61	82,15
5	3,18	30,71	82,19
MEDIA	3,17	30,68	82,16
Desv. Típico	0,04324	0,04970	0,03701

Tabla 50: Medición de las dimensiones de la probeta IG4H2V-2.

PROBETA			
IG4H2V-3	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,23	30,64	82,02
2	3,18	30,63	82,22
3	3,15	30,71	82,00
4	3,17	30,70	82,03
5	3,20	30,72	82,19
MEDIA	3,19	30,68	82,09
Desv. Típico	0,03050	0,04183	0,10426

Tabla 51: Medición de las dimensiones de la probeta IG4H2V-3.

PROBETA			
CS8H6V-1	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,09	30,02	80,65
2	3,08	30,06	80,76
3	3,07	30,07	80,59
4	3,09	30,07	80,66
5	3,06	30,08	80,64
MEDIA	3,08	30,06	80,66
Desv. Típico	0,01304	0,02345	0,06205

Tabla 52: Medición de las dimensiones de la probeta CS8H6V-1.

PROBETA			
CS8H6V-2	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,06	30,10	80,81
2	3,09	30,17	80,73
3	3,09	30,06	80,86
4	3,08	30,14	80,87
5	3,05	30,12	80,79
MEDIA	3,07	30,12	80,81
Desv. Típico	0,01817	0,04147	0,05675

Tabla 53: Medición de las dimensiones de la probeta CS8H6V-2.

PROBETA			
CS8H6V-3	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,13	30,22	80,92
2	3,11	30,14	80,97
3	3,08	30,15	80,96
4	3,11	30,17	81,00
5	3,12	30,20	80,95
MEDIA	3,11	30,18	80,96
Desv. Típico	0,01871	0,03362	0,02915

Tabla 54: Medición de las dimensiones de la probeta CS8H6V-3.

PROBETA			
CT4H2V-1	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,10	30,31	81,12
2	3,12	30,33	81,20
3	3,16	30,35	81,16
4	3,14	30,27	81,00
5	3,12	30,37	81,21
MEDIA	3,13	30,33	81,14
Desv. Típico	0,02280	0,03847	0,08497

Tabla 55: Medición de las dimensiones de la probeta CT4H2V-1.

PROBETA			
CT4H2V-2	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,13	30,41	81,01
2	3,12	30,36	80,96
3	3,10	30,28	80,98
4	3,13	30,31	81,18
5	3,11	30,36	81,05
MEDIA	3,12	30,34	81,04
Desv. Típico	0,01304	0,05030	0,08735

Tabla 56: Medición de las dimensiones de la probeta CT4H2V-2.

PROBETA			
CT4H2V-3	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,08	30,30	81,04
2	3,11	30,33	81,06
3	3,09	30,20	81,25
4	3,11	30,28	81,08
5	3,10	30,26	81,10
MEDIA	3,10	30,27	81,11
Desv. Típico	0,01304	0,04879	0,08355

Tabla 57: Medición de las dimensiones de la probeta CT4H2V-3.

PROBETA			
CG6H4V-1	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,10	30,27	81,03
2	3,09	30,26	81,11
3	3,11	30,32	81,19
4	3,08	30,30	81,23
5	3,10	30,35	81,13
MEDIA	3,10	30,30	81,14
Desv. Típico	0,01140	0,03674	0,07694

Tabla 58: Medición de las dimensiones de la probeta CG6H4V-1.

PROBETA			
CG6H4V-2	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,11	30,28	81,08
2	3,11	30,27	81,16
3	3,08	30,24	80,99
4	3,09	30,26	81,10
5	3,13	30,31	81,15
MEDIA	3,10	30,27	81,10
Desv. Típico	0,01949	0,02588	0,06804

Tabla 59: Medición de las dimensiones de la probeta CG6H4V-2.

PROBETA			
CG6H4V-3	a (mm)	b (mm)	L (mm)
1	3,11	30,19	80,83
2	3,10	30,31	80,85
3	3,08	30,26	80,87
4	3,12	30,34	80,75
5	3,09	30,31	80,84
MEDIA	3,10	30,28	80,83
Desv. Típico	0,01581	0,05891	0,04604

Tabla 60: Medición de las dimensiones de la probeta CG6H4V-3.

10.4.2 Rugosidad de las Probetas

Siendo Ra la rugosidad media aritmética de la probeta y Rz la rugosidad máxima de la probeta.

PROBETA		
HS4H2V-1	Ra (µm)	Rz (µm)
1	5,106	24,949
2	4,523	24,629
3	4,205	23,290
4	4,384	20,532
5	4,119	23,362
MEDIA	4,467	23,352
Desv. Típico	0,38990	1,74194

Tabla 61: Medición de la rugosidad de la probeta HS4H2V-1.

PROBETA		
HS4H2V-2	Ra (µm)	Rz (µm)
1	4,993	24,814
2	3,882	20,692
3	4,917	23,812
4	4,429	23,542
5	4,585	23,022
MEDIA	4,561	23,176
Desv. Típico	0,44508	1,53423

Tabla 62: Medición de la rugosidad de la probeta HS4H2V-2.

PROBETA		
HS4H2V-3	Ra (µm)	Rz (µm)
1	1,71	12,20
2	1,54	9,47
3	1,46	9,64
4	1,39	9,99
5	1,30	7,50
MEDIA	1,480	9,759
Desv. Típico	0,15705	1,67264

Tabla 63: Medición de la rugosidad de la probeta HS4H2V-3.

PROBETA		
HT6H4V-1	Ra (µm)	Rz (µm)
1	4,554	27,491
2	3,699	21,794
3	2,170	14,909
4	3,619	23,067
5	3,378	19,543
MEDIA	3,484	21,361
Desv. Típico	0,85837	4,62624

Tabla 64: Medición de la rugosidad de la probeta HT6H4V-1.

PROBETA		
HT6H4V-2	Ra (µm)	Rz (µm)
1	2,941	16,020
2	2,831	18,852
3	3,093	17,505
4	2,750	16,471
5	2,437	16,294
MEDIA	2,810	17,028
Desv. Típico	0,24516	1,16400

Tabla 65: Medición de la rugosidad de la probeta HT6H4V-2.

PROBETA		
HT6H4V-3	Ra (µm)	Rz (µm)
1	1,702	9,884
2	1,928	11,400
3	2,077	11,690
4	1,757	11,607
5	1,926	11,909
MEDIA	1,878	11,298
Desv. Típico	0,15002	0,81121

Tabla 66: Medición de la rugosidad de la probeta HT6H4V-3.

PROBETA		
HG8H6V-1	Ra (μm)	Rz (μm)
1	2,593	14,291
2	2,559	13,781
3	2,329	12,077
4	2,387	11,990
5	2,298	11,320
MEDIA	2,433	12,692
Desv. Típico	0,13475	1,27438

Tabla 67: Medición de la rugosidad de la probeta HG8H6V-1.

PROBETA		
HG8H6V-2	Ra (μm)	Rz (μm)
1	1,924	10,754
2	1,365	8,464
3	1,069	6,269
4	1,408	7,946
5	1,861	10,211
MEDIA	1,525	8,729
Desv. Típico	0,36032	1,80498

Tabla 68: Medición de la rugosidad de la probeta HG8H6V-2.

PROBETA		
HG8H6V-3	Ra (μm)	Rz (μm)
1	2,402	14,241
2	2,099	11,295
3	2,347	11,274
4	2,042	10,223
5	2,388	13,382
MEDIA	2,256	12,083
Desv. Típico	0,17137	1,66429

Tabla 69: Medición de la rugosidad de la probeta HG8H6V-3.

PROBETA		
IS6H4V-1	Ra (μm)	Rz (μm)
1	8,707	32,778
2	8,506	29,809
3	7,551	26,842
4	9,114	32,451
5	8,329	29,901
MEDIA	8,441	30,356
Desv. Típico	0,57718	2,40362

Tabla 70: Medición de la rugosidad de la probeta IS6H4V-1.

PROBETA		
IS6H4V-2	Ra (μm)	Rz (μm)
1	9,230	34,793
2	9,408	34,996
3	10,826	36,331
4	9,420	36,762
5	9,923	38,681
MEDIA	9,761	36,313
Desv. Típico	0,64871	1,56957

Tabla 71: Medición de la rugosidad de la probeta IS6H4V-2.

PROBETA		
IS6H4V-3	Ra (μm)	Rz (μm)
1	9,482	35,260
2	9,771	36,672
3	9,540	35,376
4	9,932	36,330
5	9,112	33,660
MEDIA	9,567	35,460
Desv. Típico	0,31218	1,17398

Tabla 72: Medición de la rugosidad de la probeta IS6H4V-3.

PROBETA		
IT8H6V-1	Ra (μm)	Rz (μm)
1	6,263	27,145
2	5,169	26,875
3	7,845	30,689
4	5,774	25,125
5	7,756	30,348
MEDIA	6,561	28,036
Desv. Típico	1,19609	2,39789

Tabla 73: Medición de la rugosidad de la probeta IT8H6V-1.

PROBETA		
IT8H6V-2	Ra (μm)	Rz (μm)
1	6,980	29,354
2	8,642	34,952
3	7,172	32,428
4	6,818	30,238
5	5,905	27,602
MEDIA	7,103	30,915
Desv. Típico	0,98803	2,84858

Tabla 74: Medición de la rugosidad de la probeta IT8H6V-2.

PROBETA		
IT8H6V-3	Ra (μm)	Rz (μm)
1	6,762	27,255
2	9,148	39,030
3	6,875	31,618
4	7,529	33,369
5	6,991	28,769
MEDIA	7,461	32,008
Desv. Típico	0,98786	4,59334

Tabla 75: Medición de la rugosidad de la probeta IT8H6V-3.

PROBETA		
IG4H2V-1	Ra (μm)	Rz (μm)
1	3,999	23,985
2	3,312	19,452
3	3,228	20,259
4	3,200	19,164
5	3,325	21,409
MEDIA	3,413	20,854
Desv. Típico	0,33201	1,95492

Tabla 76: Medición de la rugosidad de la probeta IG4H2V-1.

PROBETA		
IG4H2V-2	Ra (μm)	Rz (μm)
1	6,065	33,747
2	5,691	32,196
3	5,611	28,158
4	5,148	28,808
5	5,998	32,092
MEDIA	5,703	31,000
Desv. Típico	0,36562	2,40056

Tabla 77: Medición de la rugosidad de la probeta IG4H2V-2.

PROBETA		
IG4H2V-3	Ra (μm)	Rz (μm)
1	3,756	23,260
2	3,886	24,306
3	2,650	17,317
4	4,159	23,040
5	3,114	21,018
MEDIA	3,513	21,788
Desv. Típico	0,61633	2,76845

Tabla 78: Medición de la rugosidad de la probeta IG4H2V-3.

PROBETA		
CS8H6V-1	Ra (μm)	Rz (μm)
1	1,303	7,673
2	1,210	7,125
3	1,317	8,303
4	1,098	6,568
5	1,330	7,491
MEDIA	1,252	7,432
Desv. Típico	0,09797	0,64439

Tabla 79: Medición de la rugosidad de la probeta CS8H6V-1.

PROBETA		
CS8H6V-2	Ra (μm)	Rz (μm)
1	1,662	10,231
2	1,881	12,652
3	1,748	11,712
4	1,838	12,439
5	1,122	6,991
MEDIA	1,650	10,805
Desv. Típico	0,30710	2,33346

Tabla 80: Medición de la rugosidad de la probeta CS8H6V-2.

PROBETA		
CS8H6V-3	Ra (μm)	Rz (μm)
1	1,580	9,104
2	2,605	17,407
3	2,239	14,363
4	3,173	20,141
5	1,621	10,233
MEDIA	2,244	14,250
Desv. Típico	0,67498	4,67175

Tabla 81: Medición de la rugosidad de la probeta CS8H6V-3.

PROBETA		
CT4H2V-1	Ra (μm)	Rz (μm)
1	6,352	34,493
2	6,876	36,327
3	7,531	37,640
4	6,729	37,334
5	6,031	31,687
MEDIA	6,704	35,496
Desv. Típico	0,56810	2,45866

Tabla 82: Medición de la rugosidad de la probeta CT4H2V-2.

PROBETA		
CT4H2V-2	Ra (μm)	Rz (μm)
1	6,762	27,255
2	9,148	39,030
3	6,875	31,618
4	7,529	33,369
5	6,991	28,769
MEDIA	7,461	32,008
Desv. Típico	0,98786	4,59334

Tabla 83: Medición de la rugosidad de la probeta CT4H2V-2.

PROBETA		
CT4H2V-3	Ra (μm)	Rz (μm)
1	3,999	23,985
2	3,312	19,452
3	3,228	20,259
4	3,200	19,164
5	3,325	21,409
MEDIA	3,413	20,854
Desv. Típico	0,33201	1,95492

Tabla 84: Medición de la rugosidad de la probeta CT4H2V-3.

PROBETA		
CG6H4V-1	Ra (μm)	Rz (μm)
1	6,065	33,747
2	5,691	32,196
3	5,611	28,158
4	5,148	28,808
5	5,998	32,092
MEDIA	5,703	31,000
Desv. Típico	0,36562	2,40056

Tabla 85: Medición de la rugosidad de la probeta CG6H4V-1.

PROBETA		
CG6H4V-2	Ra (μm)	Rz (μm)
1	3,756	23,260
2	3,886	24,306
3	2,650	17,317
4	4,159	23,040
5	3,114	21,018
MEDIA	3,513	21,788
Desv. Típico	0,61633	2,76845

Tabla 86: Medición de la rugosidad de la probeta CG6H4V-2.

PROBETA		
CG6H4V-3	Ra (μm)	Rz (μm)
1	1,303	7,673
2	1,210	7,125
3	1,317	8,303
4	1,098	6,568
5	1,330	7,491
MEDIA	1,252	7,432
Desv. Típico	0,09797	0,64439

Tabla 87: Medición de la rugosidad de la probeta CG6H4V-3.

10.5 Ficha de las probetas

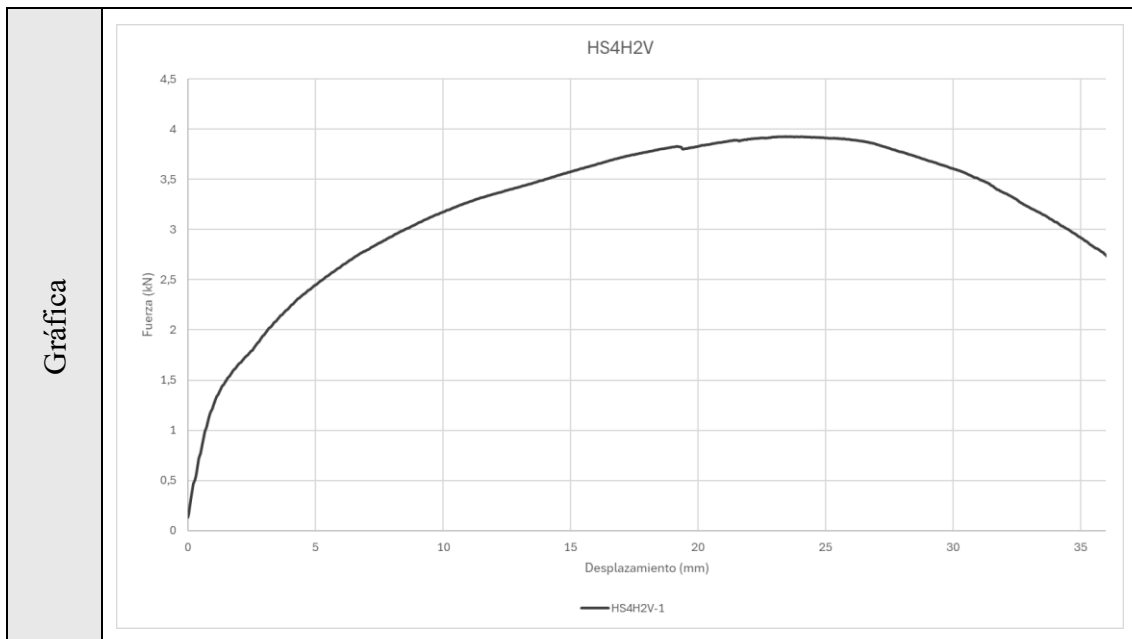
FICHA TÉCNICA

Probeta	HS4H2V-1	Material	Relleno	Capa Exterior
		Acero para herramienta H13 recocido	Sólido	4 sup. e inf. 2 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,21 mm	30,69 mm	81,72 mm	4,467 μm	23,352 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	3,924 kN	103,25 °	1504,05 MPa



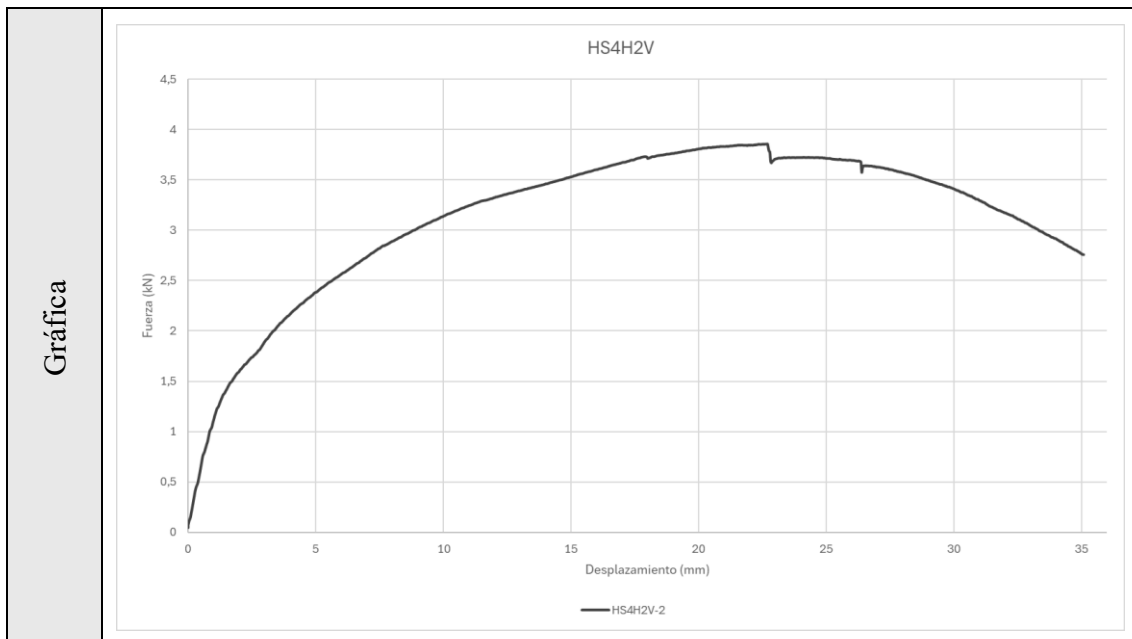
FICHA TÉCNICA

Probeta	HS4H2V-2	Material	Relleno	Capa Exterior
		Acero para herramienta H13 recocido	Sólido	4 sup. e inf. 2 latera

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,19 mm	30,65 mm	81,77 mm	4,561 μm	23,176 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	3,856 kN	98,84 °	1478,24 kN



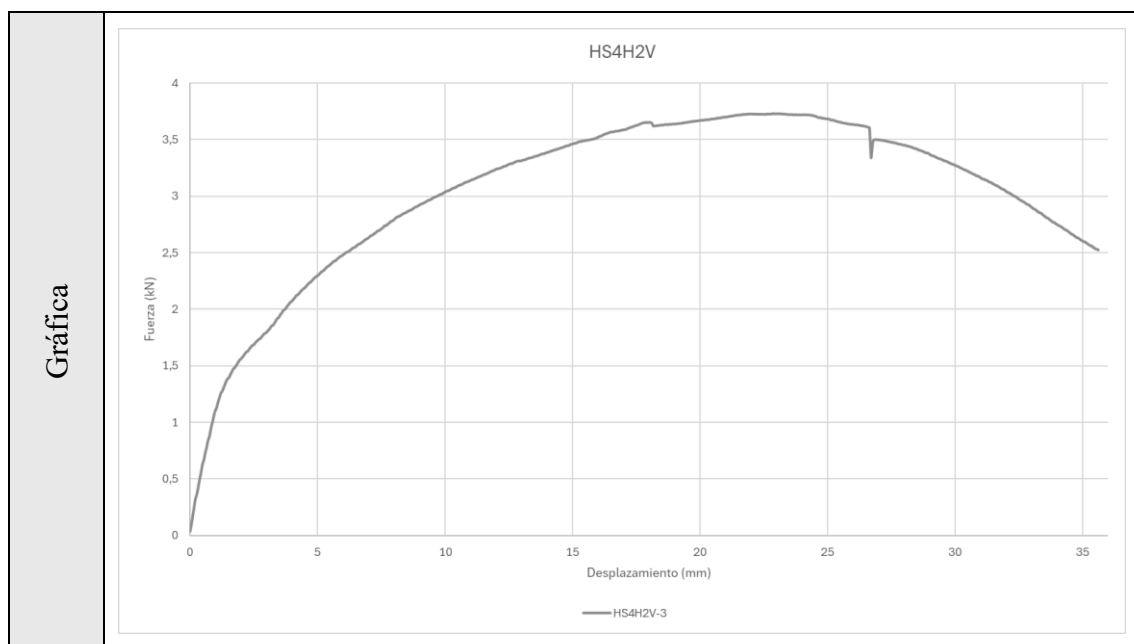
FICHA TÉCNICA

Probeta	HS4H2V-3	Material	Relleno	Capa Exterior
		Acero para herramienta H13 recocido	Sólido	4 sup. e inf. 2 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,25 mm	30,73 mm	81,82 mm	1,480 μm	9,759 μm



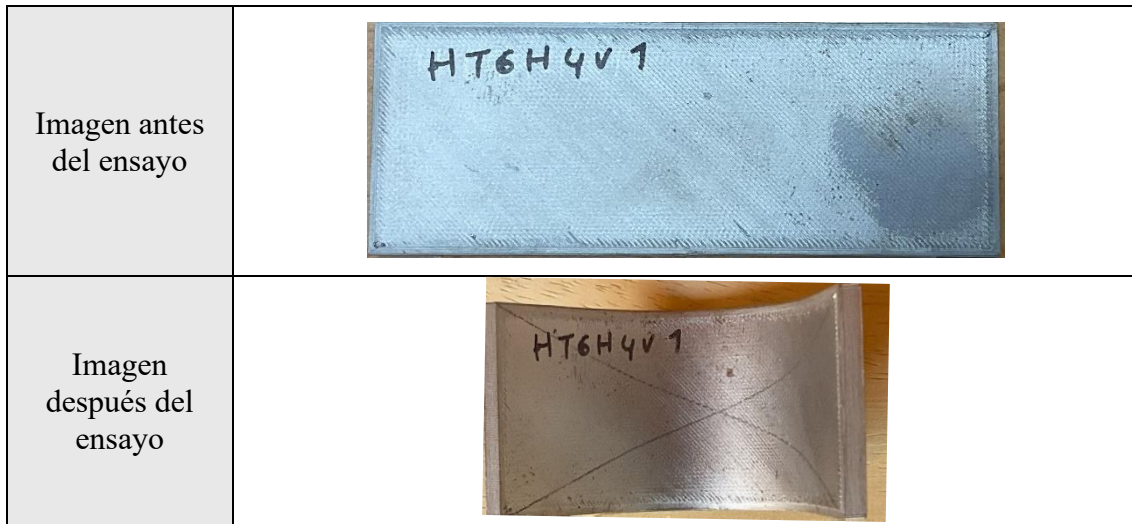
Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	3,731 kN	1430,06 MPa	1430,06



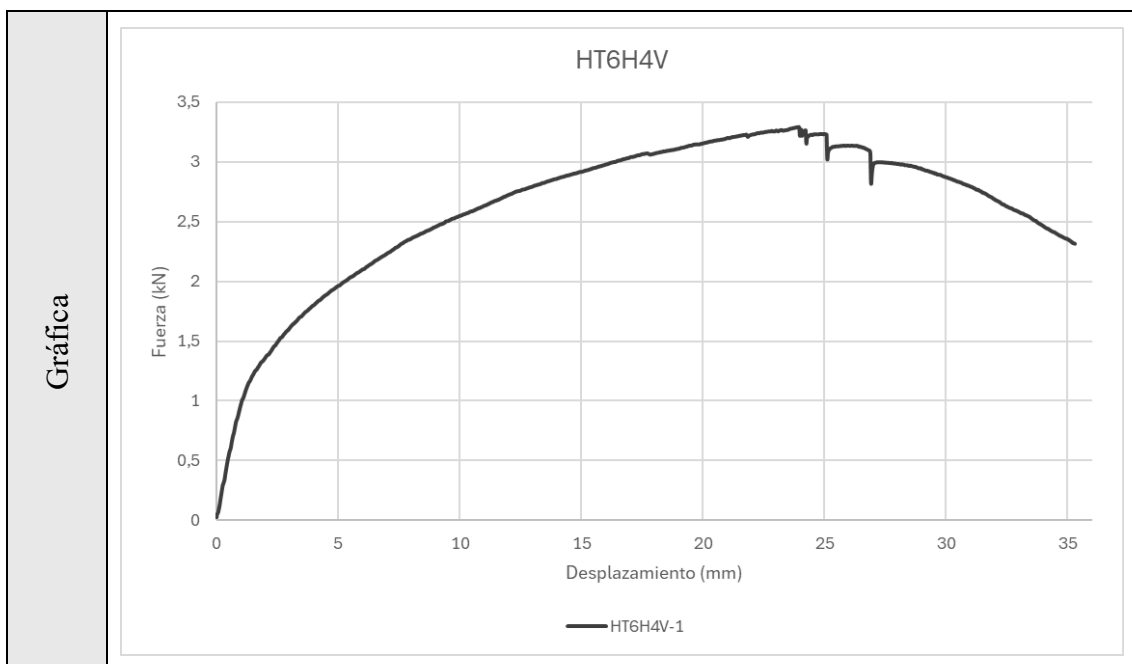
FICHA TÉCNICA

Probeta	HT6H4V-1	Material	Relleno	Capa Exterior
		Acero para herramienta H13 recocido	Triangular	6 sup. e inf. 4 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,21 mm	30,44 mm	81,09 mm	3,484 μm	21,361 μm





Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	3,291 kN	106,07 °	1261,41 MPa



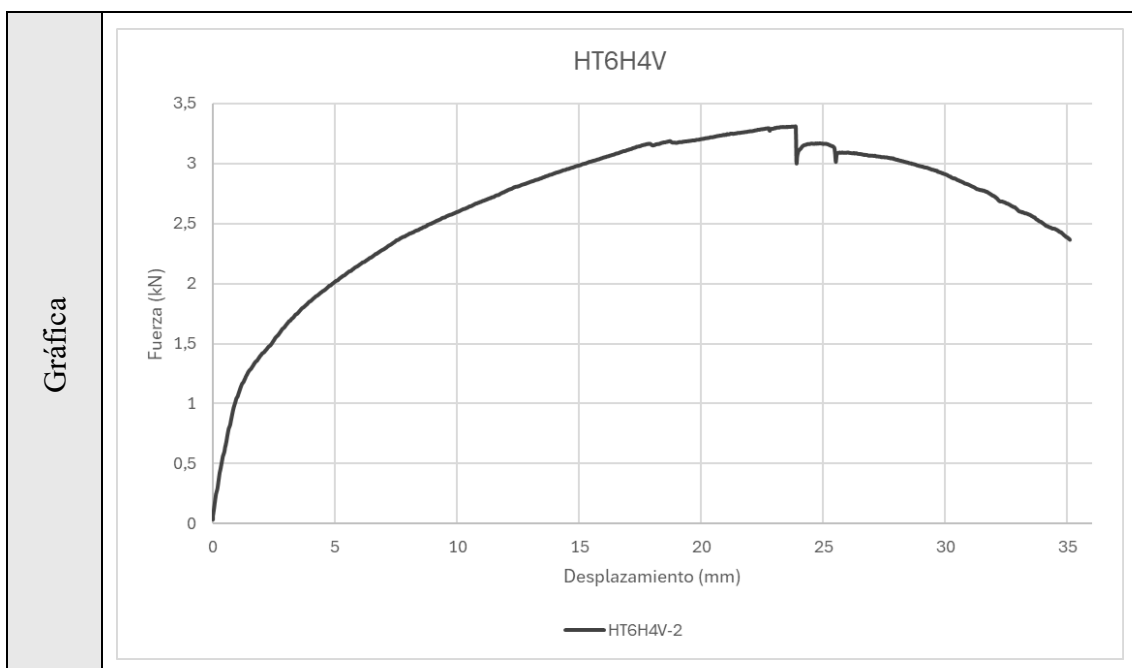
FICHA TÉCNICA

Probeta	HT6H4V-2	Material	Relleno	Capa Exterior
		Acero para herramienta H13 recocido	Triangular	6 sup. e inf. 4 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,20 mm	30,48 mm	81,16 mm	2,810 μm	17,028 μm

Imagen antes del ensayo	
Imagen después del ensayo	

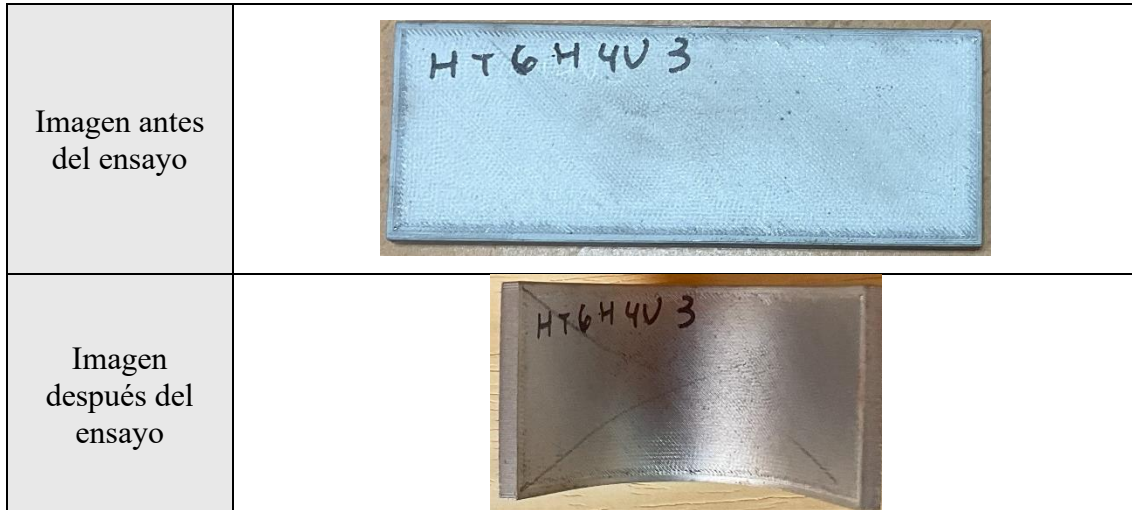
Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	3,310 kN	105,09 °	1268,87 MPa



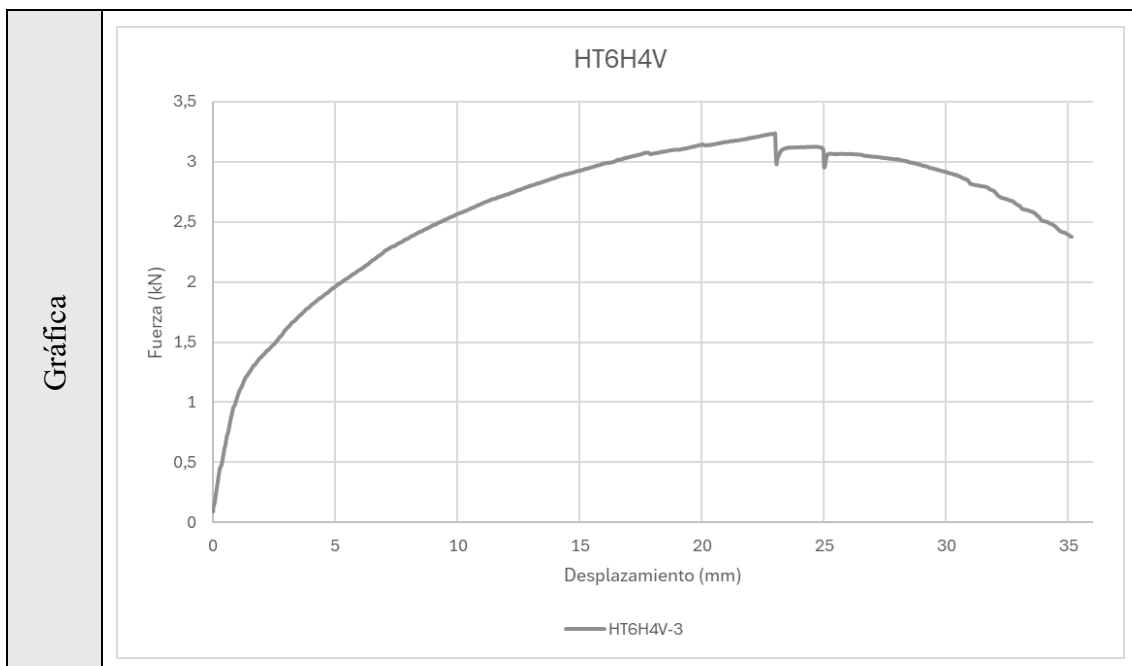
FICHA TÉCNICA

Probeta	HT6H4V-3	Material	Relleno	Capa Exterior
		Acero para herramienta H13 recocido	Triangular	6 sup. e inf. 4 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,22 mm	30,48 mm	81,08 mm	1,878 μm	11,298 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	3,240 kN	101,20 °	1241,91 MPa



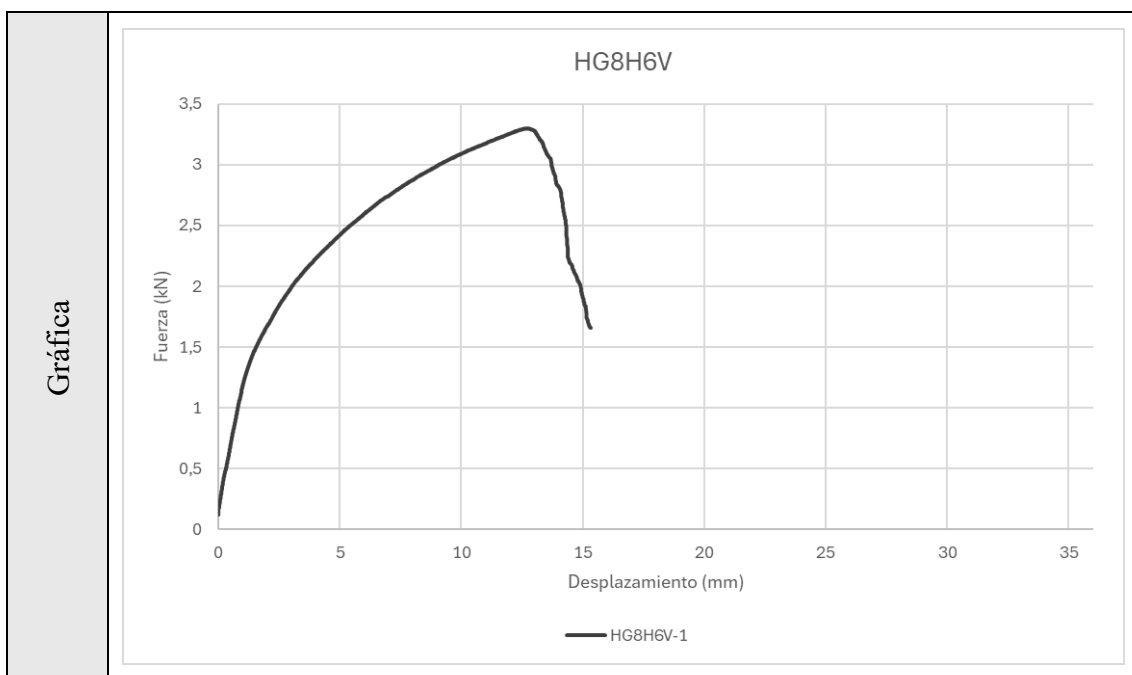
FICHA TÉCNICA

Probeta	HG8H6V-1	Material	Relleno	Capa Exterior
		Acero para herramienta H13 recocido	Gyroid	8 sup. e inf. 6 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,18 mm	30,54 mm	81,29 mm	2,433 μm	12,692 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	3,301 kN	49,97 °	1265,42 MPa



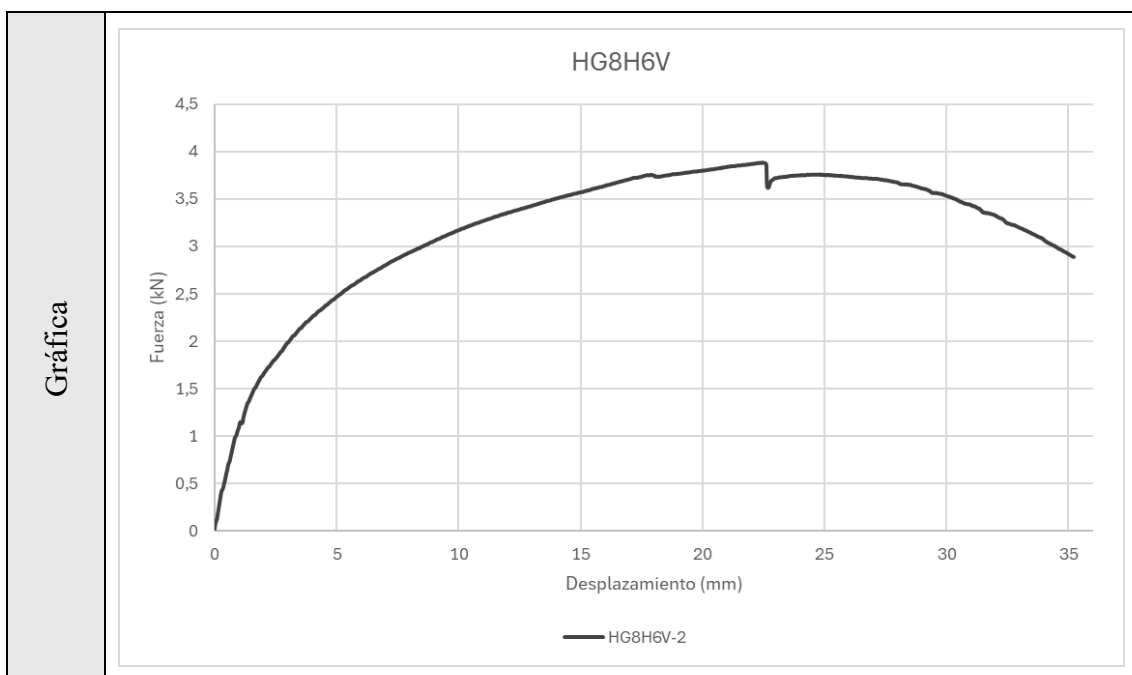
FICHA TÉCNICA

Probeta	HG8H6V-2	Material	Relleno	Capa Exterior
		Acero para herramienta H13 recocido	Gyroid	8 sup. e inf. 6 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,19 mm	30,52 mm	81,13 mm	1,525 μm	8,729 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	3,888 kN	98,37 °	1490,29 MPa



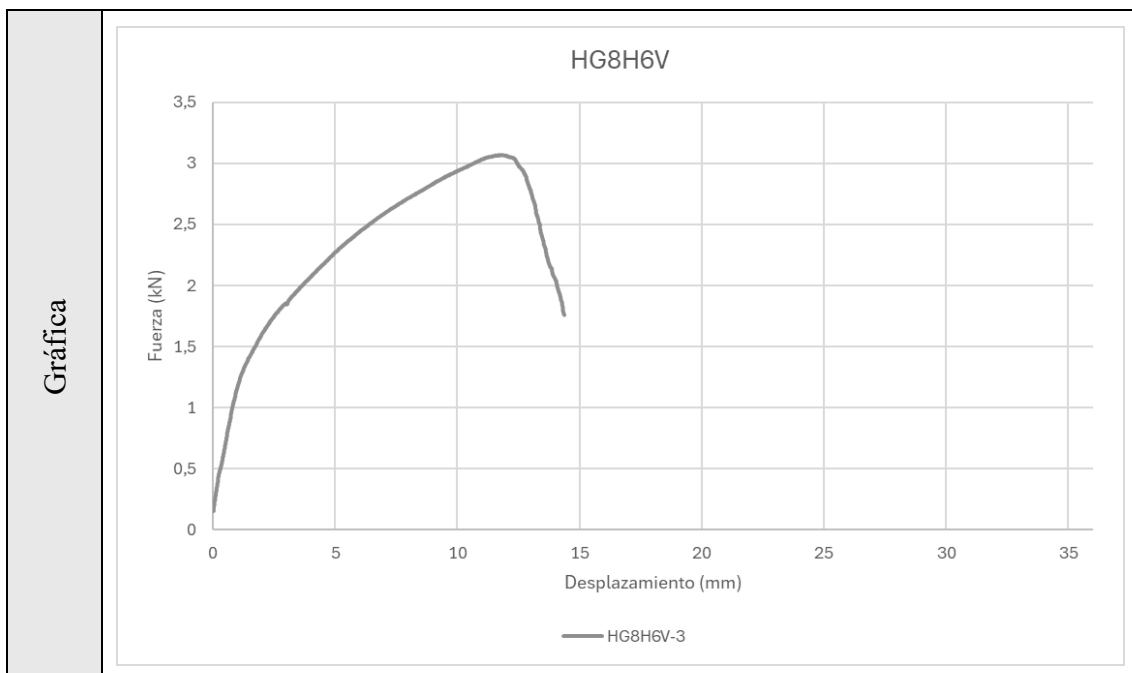
FICHA TÉCNICA

Probeta	HG8H6V-3	Material	Relleno	Capa Exterior
		Acero para herramienta H13 recocido	Gyroid	8 sup. e inf. 6 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,21 mm	30,56 mm	81,27 mm	2,256 μm	12,083 μm

Imagen antes del ensayo	
Imagen después del ensayo	

Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	3,066 kN	45,53 °	1175,36 MPa



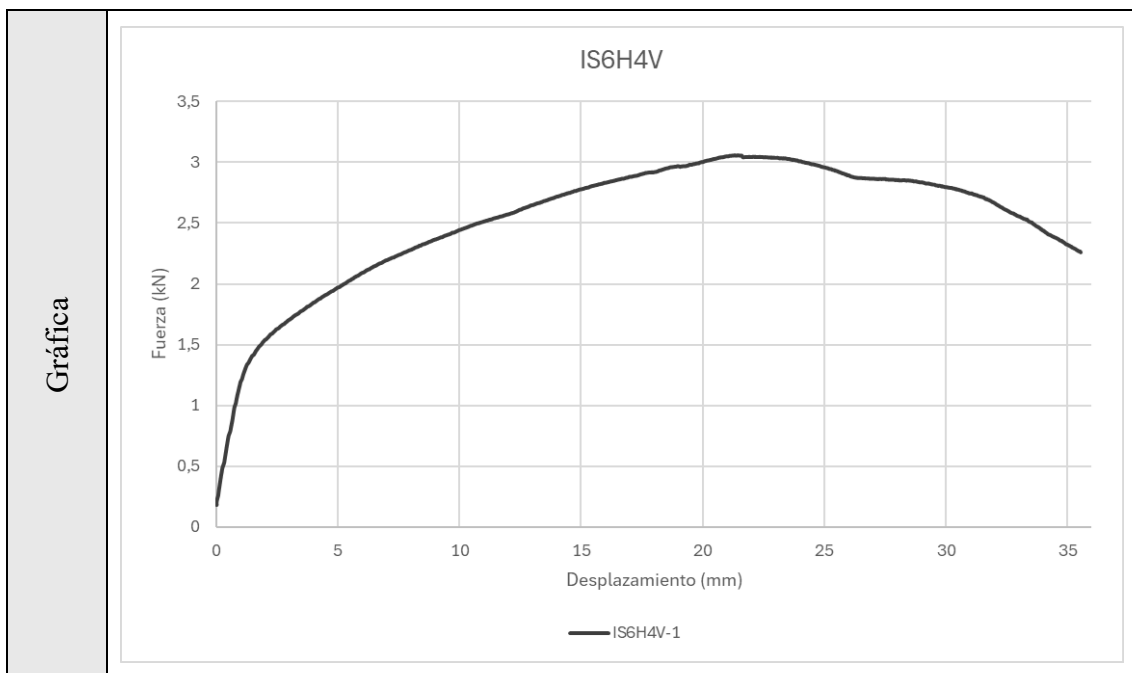
FICHA TÉCNICA

Probeta	IS6H4V-1	Material	Relleno	Capa Exterior
		Inconel 625	Sólido	6 sup. e inf. 4 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,05 mm	30,95 mm	82,65 mm	8,441 μm	30,356 μm



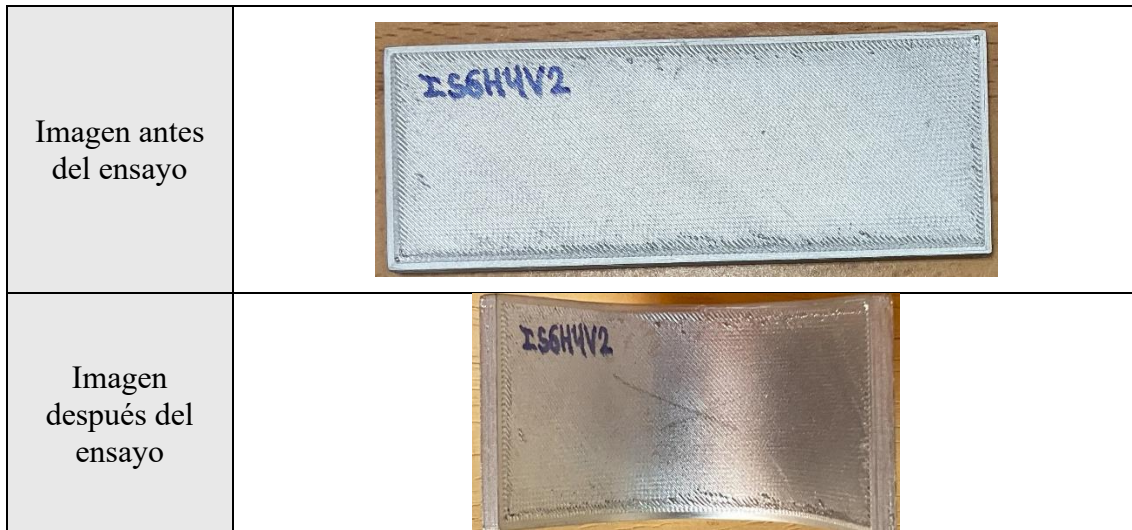
Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	3,059 kN	92,41 °	1172,50 MPa



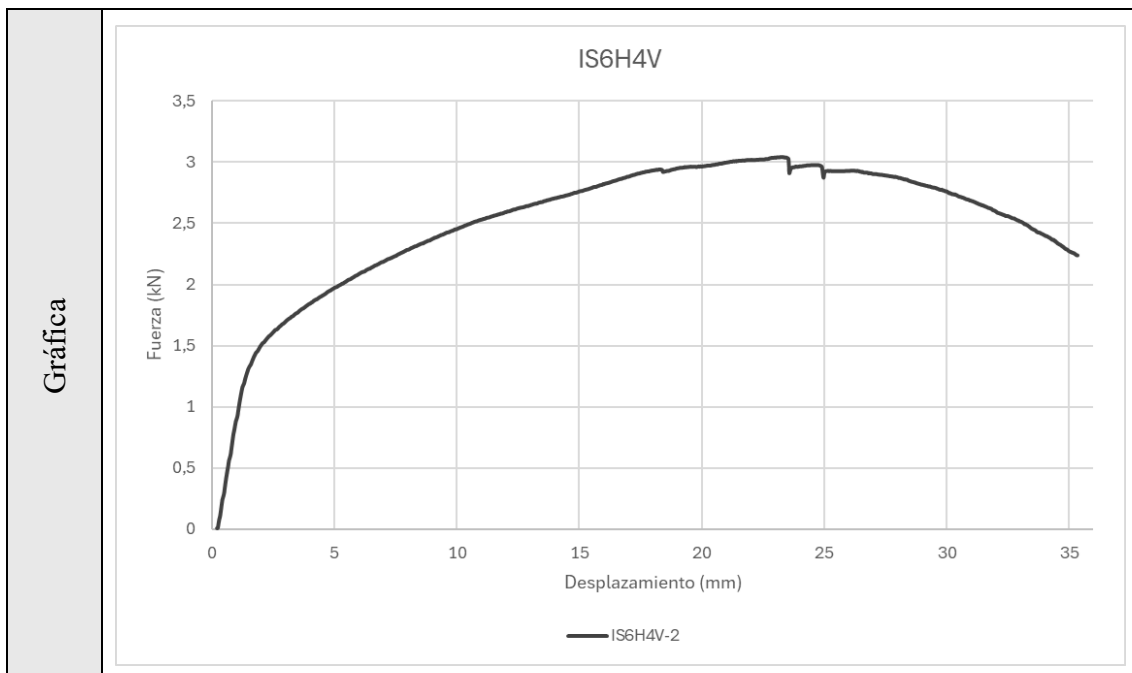
FICHA TÉCNICA

Probeta	IS6H4V-2	Material	Relleno	Capa Exterior
		Inconel 625	Sólido	6 sup. e inf. 4 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,04 mm	30,96 mm	82,55 mm	9,761 μm	36,313 μm



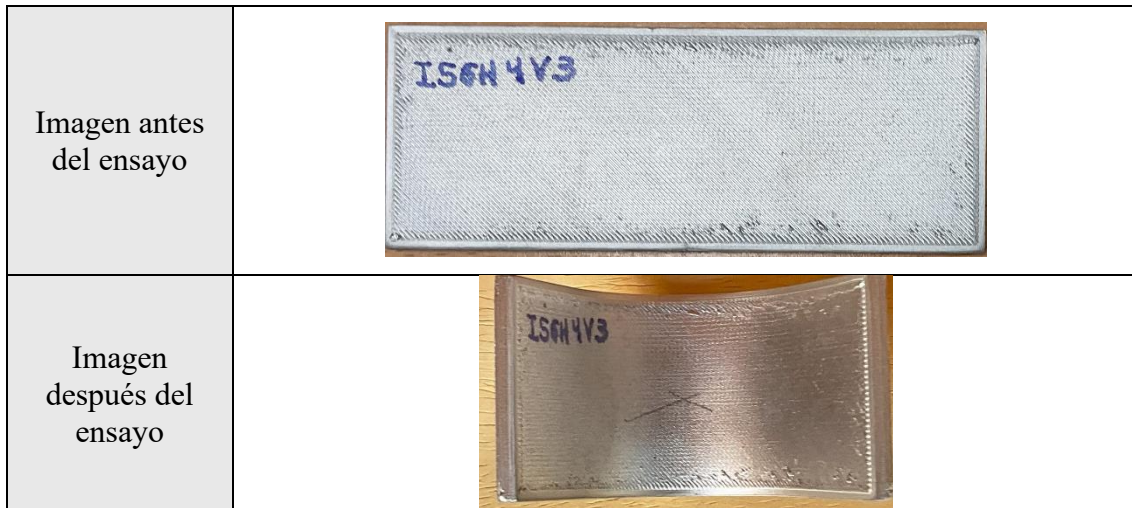
Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	3,042 kN	102,43°	116,19 MPa



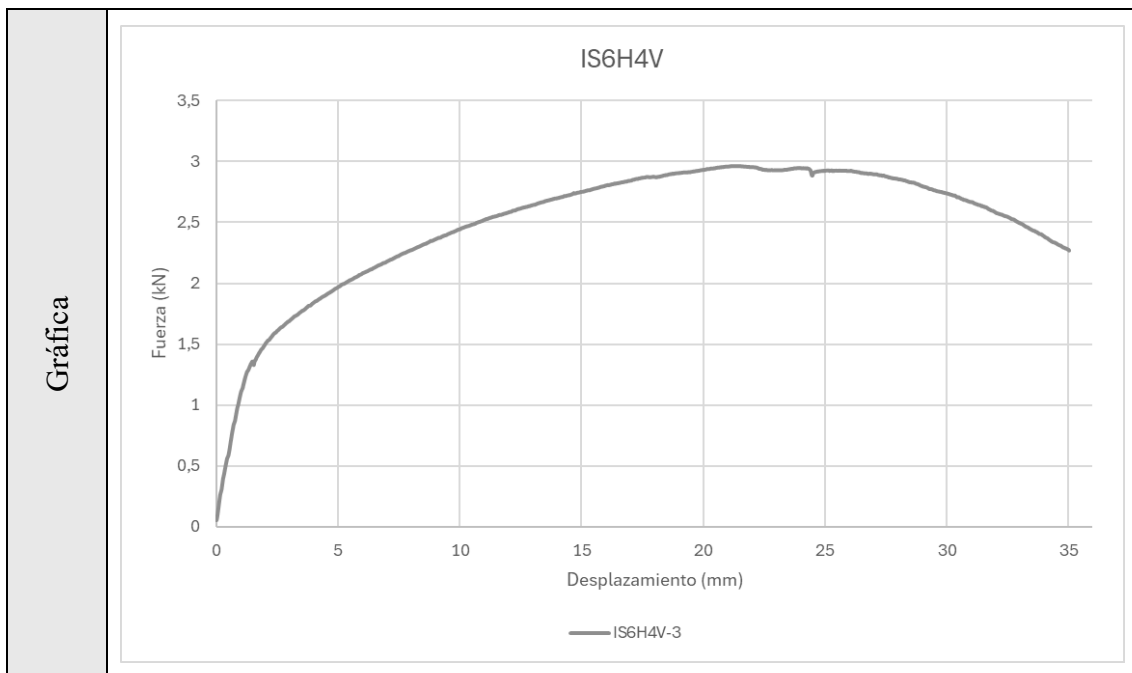
FICHA TÉCNICA

Probeta	IS6H4V-3	Material	Relleno	Capa Exterior
		Inconel 625	Sólido	6 sup. e inf. 4 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,02 mm	30,99 mm	82,49 mm	9,567 μm	35,460 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	2,961 kN	91,95 °	1135,21 MPa



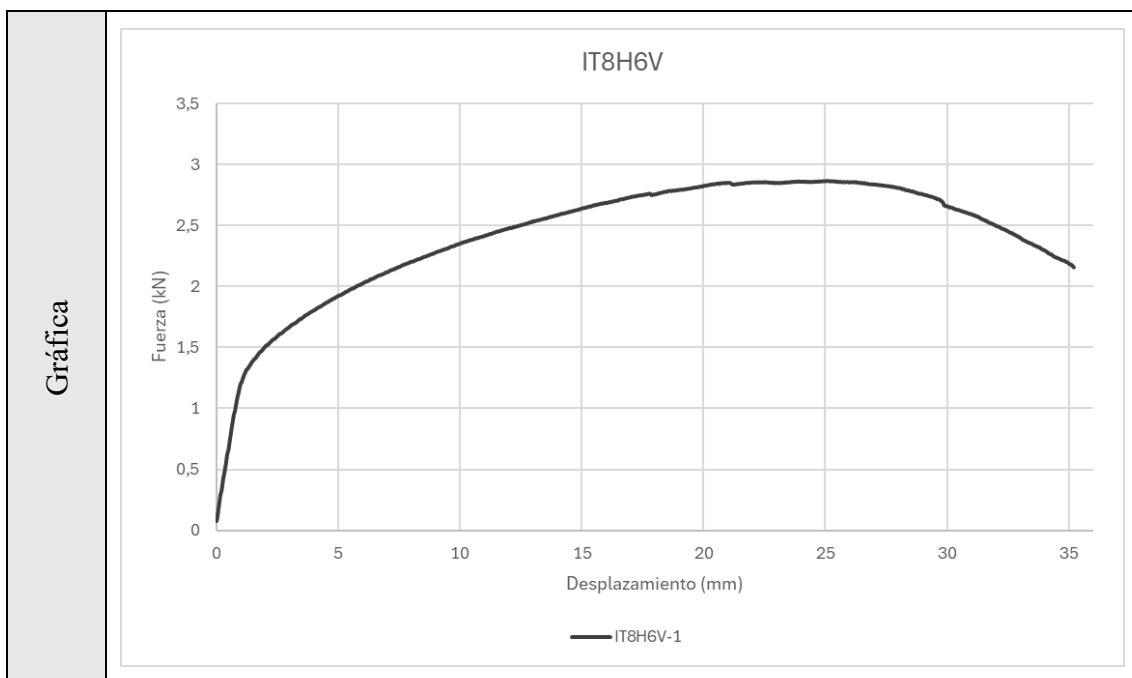
FICHA TÉCNICA

Probeta	IT8H6V-1	Material	Relleno	Capa Exterior
		Inconel 625	Triangular	8 sup. e inf. 6 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,14 mm	30,82 mm	82,17 mm	6,561 μm	28,036 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	2,870 kN	111,62 °	1100,22 MPa



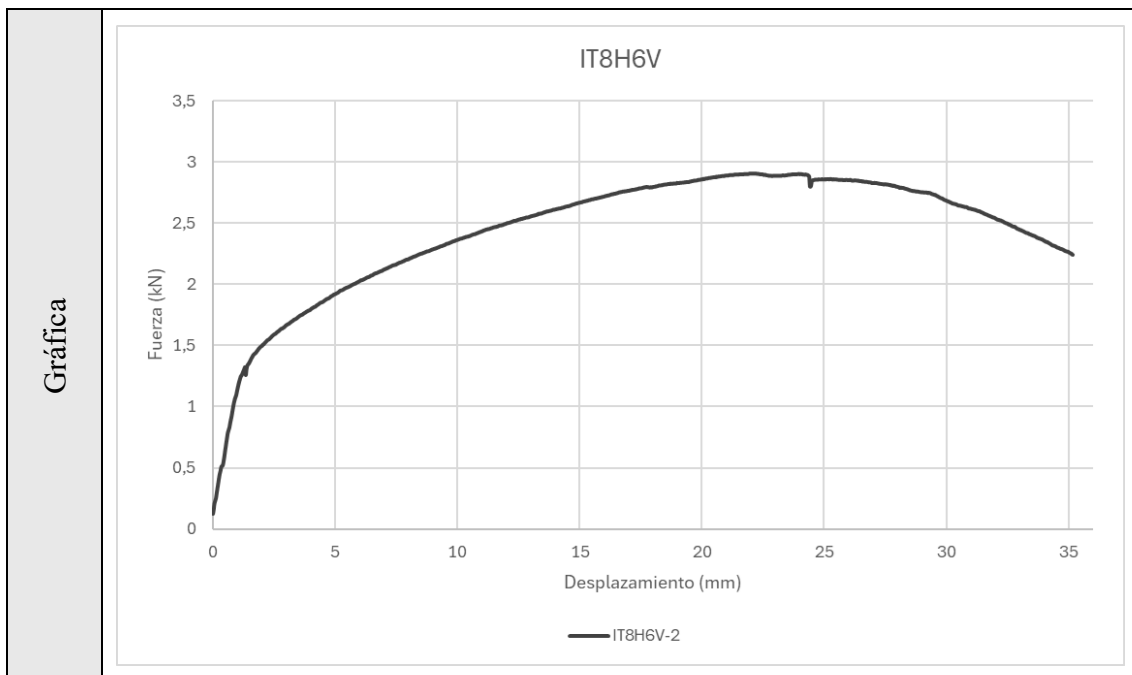
FICHA TÉCNICA

Probeta	IT8H6V-2	Material	Relleno	Capa Exterior
		Inconel 625	Triangular	8 sup. e inf. 6 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,14 mm	30,80 mm	82,3 mm	7,103 μm	30,915 μm



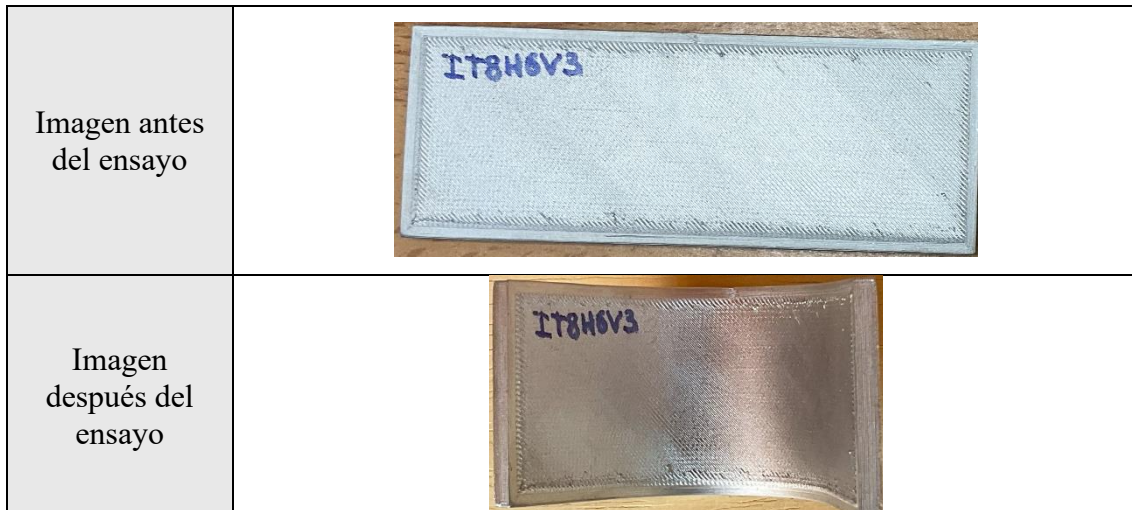
Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	2,909 kN	95,70 °	1115,13 MPa



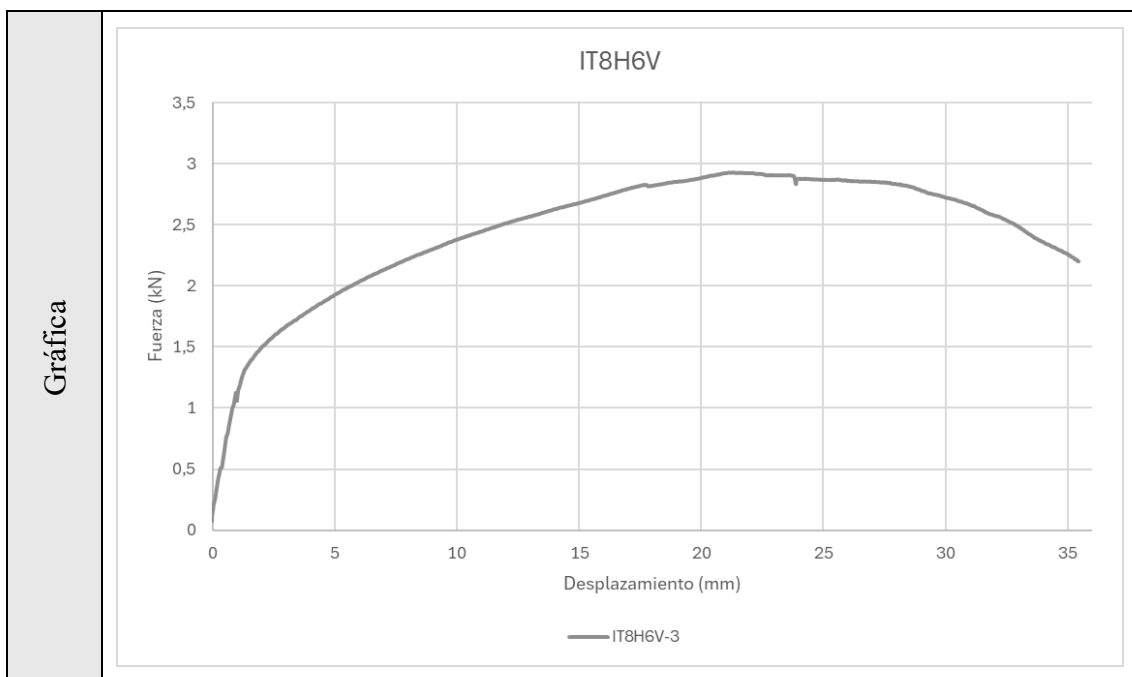
FICHA TÉCNICA

Probeta	IT8H6V-3	Material	Relleno	Capa Exterior
		Inconel 625	Triangular	8 sup. e inf. 6 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,10 mm	30,79 mm	82,12 mm	7,461 μm	32,088 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	2,933 kN	92,41 °	1124,31 MPa



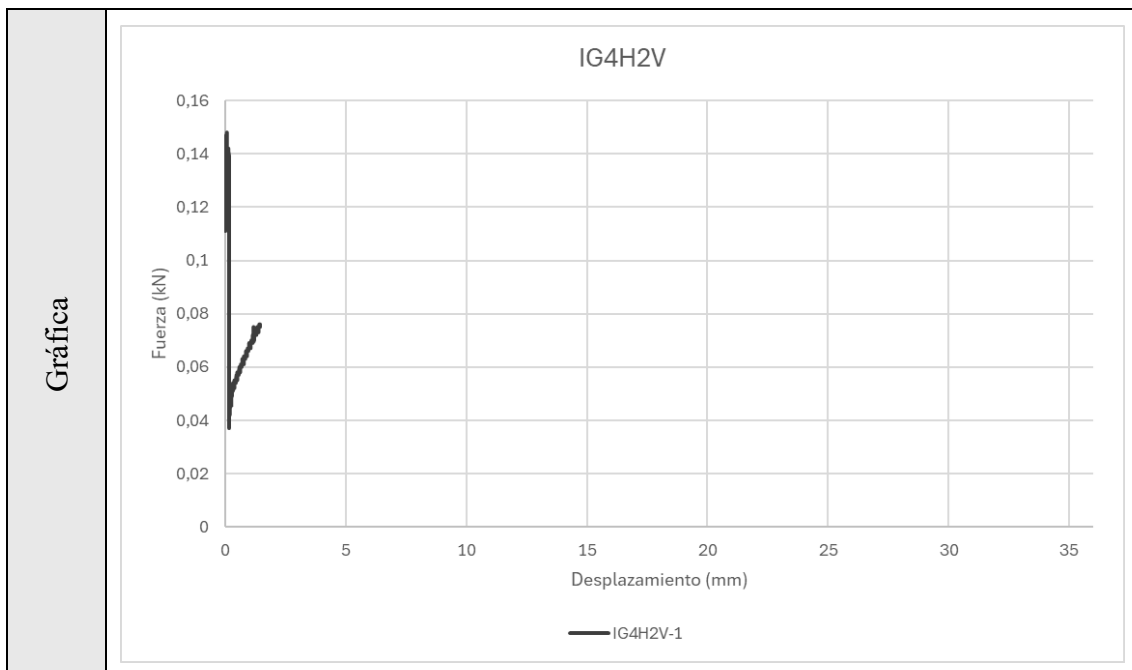
FICHA TÉCNICA

Probeta	IG4H2V-1	Material	Relleno	Capa Exterior
		Inconel 625	Gyroid	4 sup. e inf. 2 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,14 mm	30,64 mm	82,29 mm	3,413 μm	20,854 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	0,148 kN	0,20 °	56,79 MPa



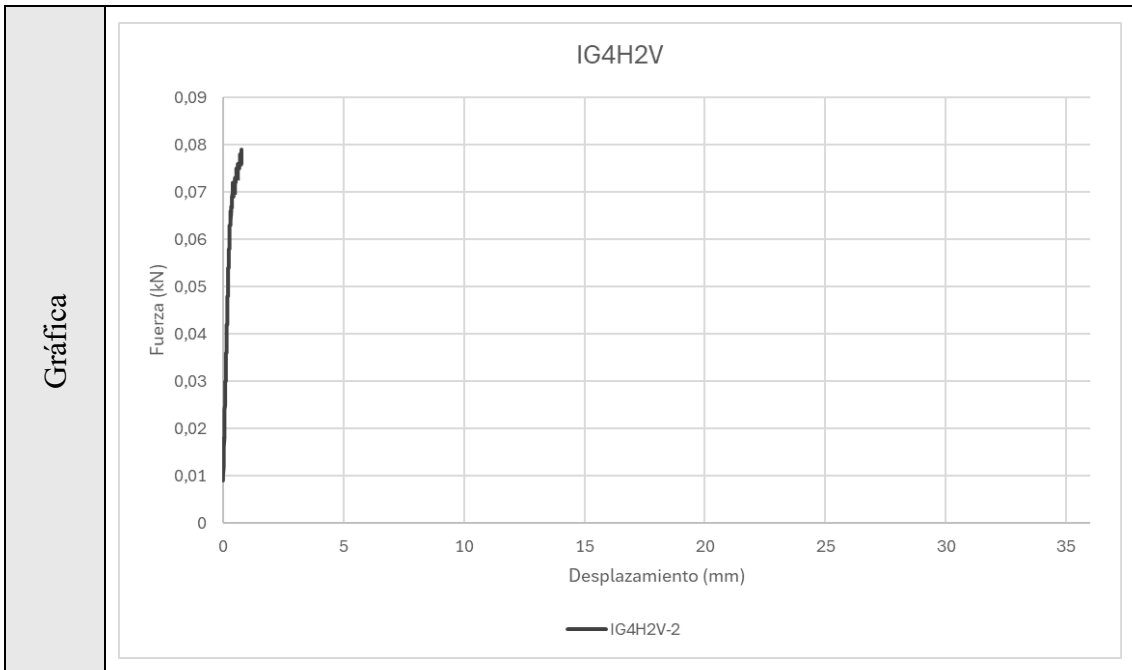
FICHA TÉCNICA

Probeta	IG4H2V-2	Material	Relleno	Capa Exterior
		Inconel 625	Gyroid	4 sup. e inf. 2 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,17 mm	30,68 mm	82,16 mm	5,703 µm	31,000 µm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	0,079 kN	2,55 °	30,40 MPa



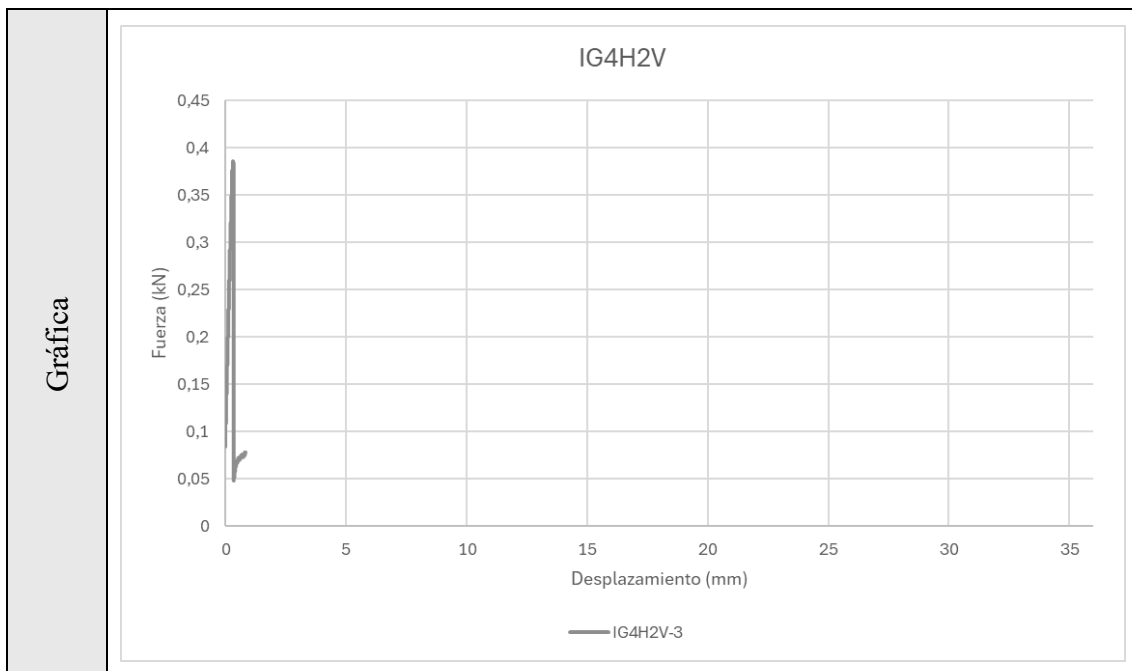
FICHA TÉCNICA

Probeta	IG4H2V-3	Material	Relleno	Capa Exterior
		Inconel 625	Gyroid	4 sup. e inf. 42 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,19 mm	30,68 mm	82,09 mm	3,513 μm	21,788 μm

Imagen antes del ensayo	
Imagen después del ensayo	



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	0,386 kN	1,03 °	148,00 MPa



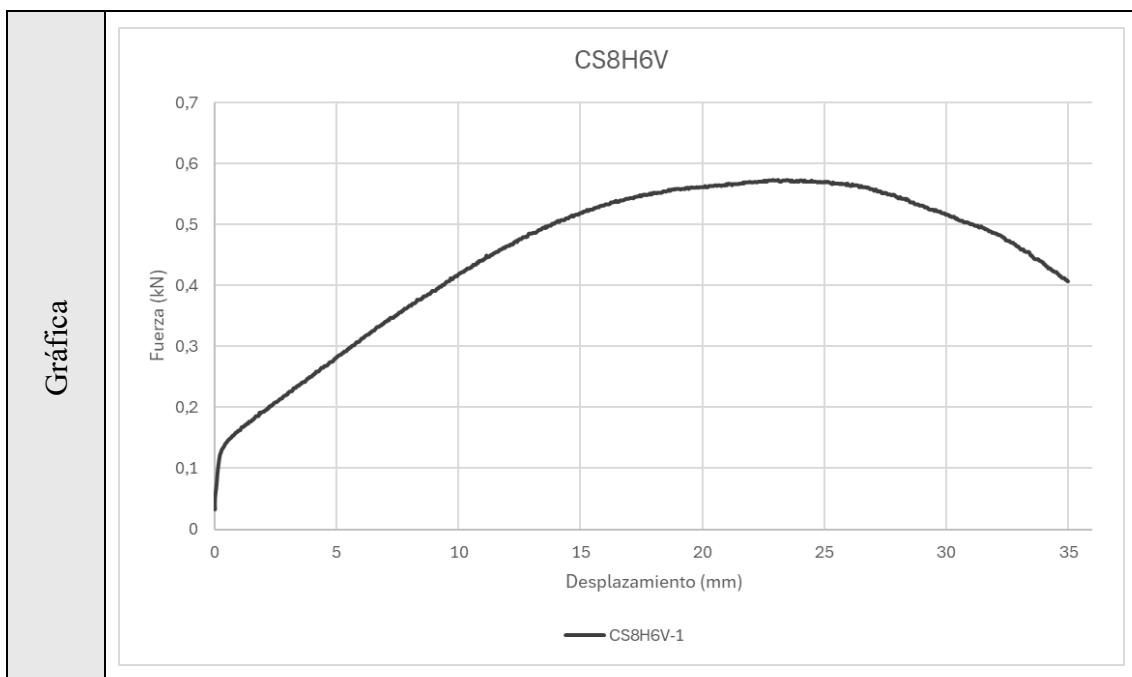
FICHA TÉCNICA

Probeta	CS8H6V-1	Material	Relleno	Capa Exterior
		Cobre	Sólido	8 sup. e inf. 6 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,08 mm	30,06 mm	80,66 mm	1,252 μm	7,432 μm

Imagen antes del ensayo	
Imagen después del ensayo	

Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	0,573 kN	100,58 °	219,70 MPa



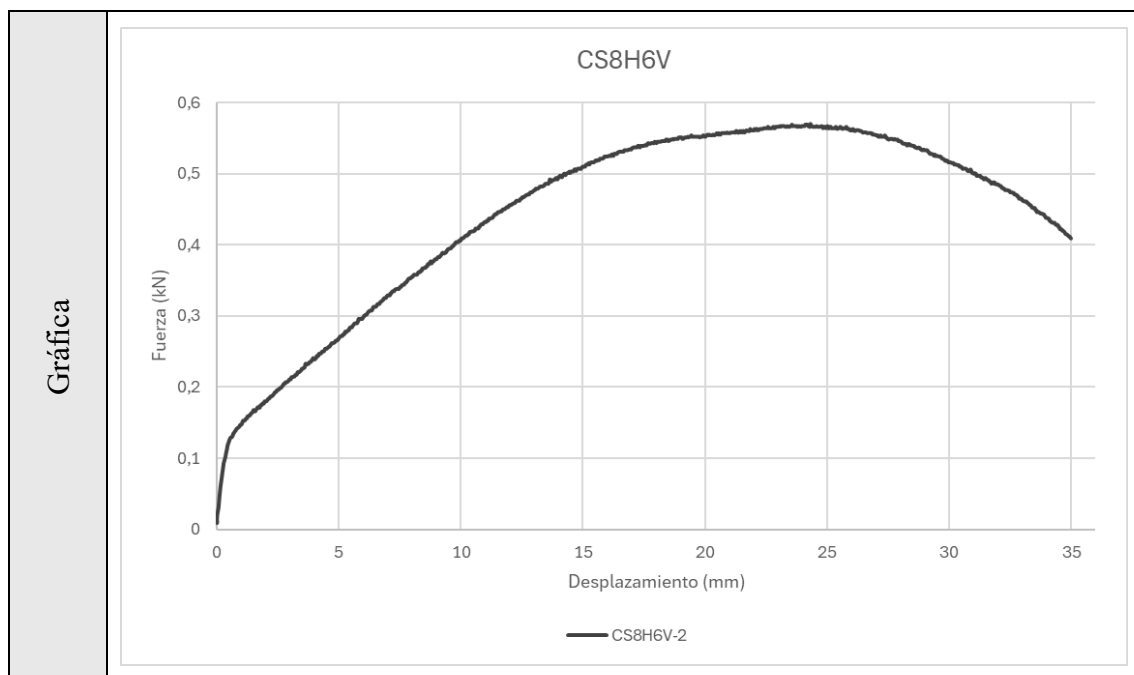
FICHA TÉCNICA

Probeta	CS8H6V-2	Material	Relleno	Capa Exterior
		Cobre	Sólido	8 sup. e inf. 6 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,07 mm	30,12 mm	80,81 mm	1,650 μm	10,805 μm

Imagen antes del ensayo	
Imagen después del ensayo	



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	0,570 kN	107,89 °	218,55 MPa



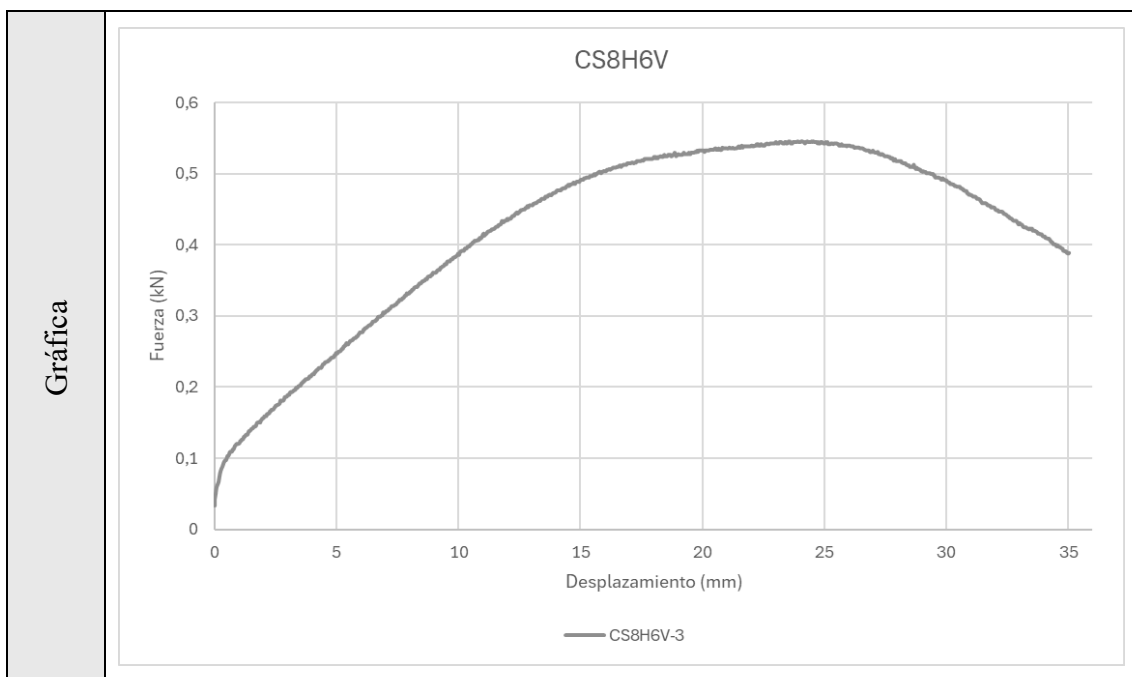
FICHA TÉCNICA

Probeta	CS8H6V-3	Material	Relleno	Capa Exterior
		Cobre	Sólido	8 sup. e inf. 6 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,11 mm	30,18 mm	80,96 mm	2,244 μm	14,250 μm

Imagen antes del ensayo	
Imagen después del ensayo	

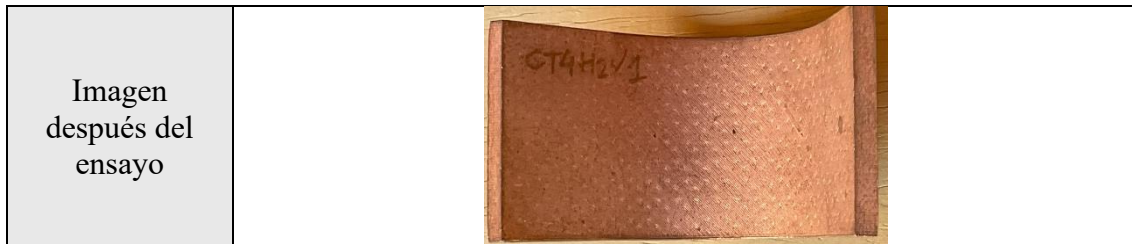
Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	0,546 kN	104,01 °	209,37 MPa



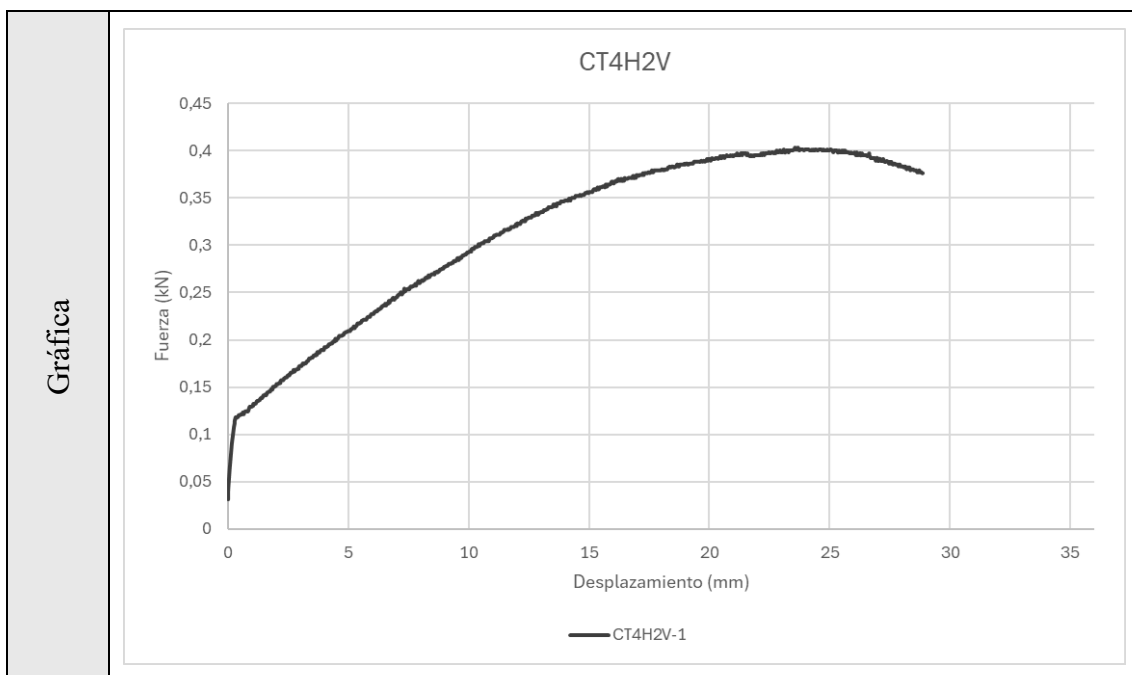
FICHA TÉCNICA

Probeta	CT4H2V-1	Material	Relleno	Capa Exterior
		Cobre	Triangular	4 sup. e inf. 2 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,13 mm	30,33 mm	81,14 mm	6,704 μm	35,496 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	0,403 kN	104,01 °	154,31 MPa



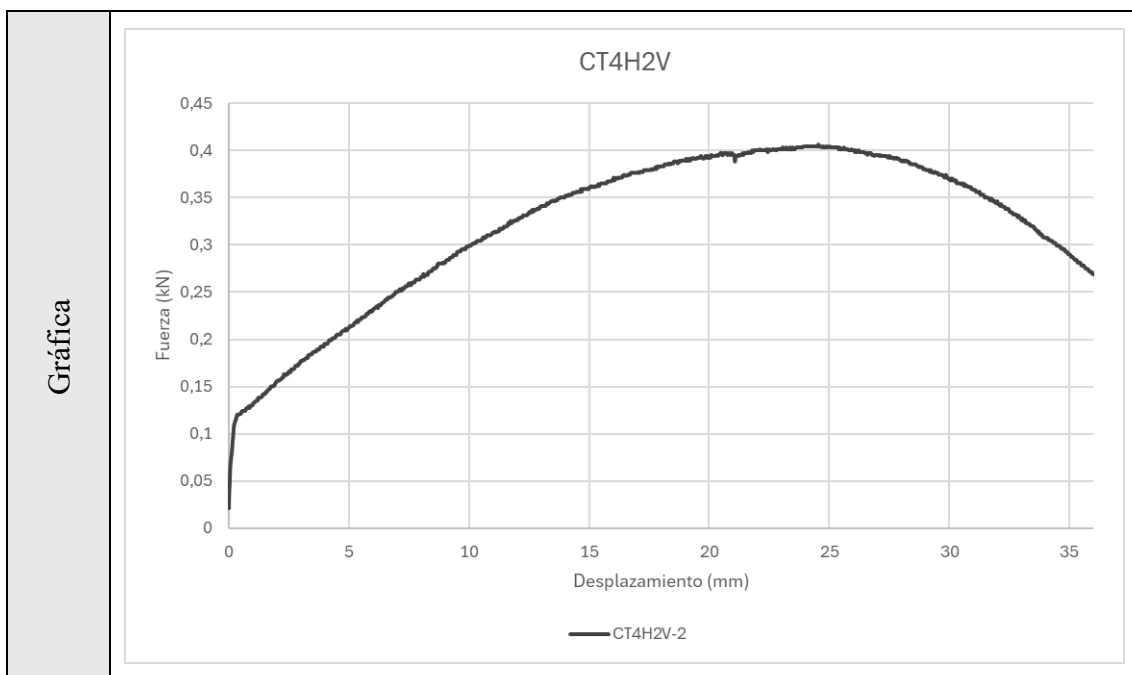
FICHA TÉCNICA

Probeta	CT4H2V-2	Material	Relleno	Capa Exterior
		Cobre	Triangular	4 sup. e inf. 2 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,12 mm	30,34 mm	81,04 mm	6,036 μm	32,352 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	0,406 kN	109,00 °	155,45 MPa



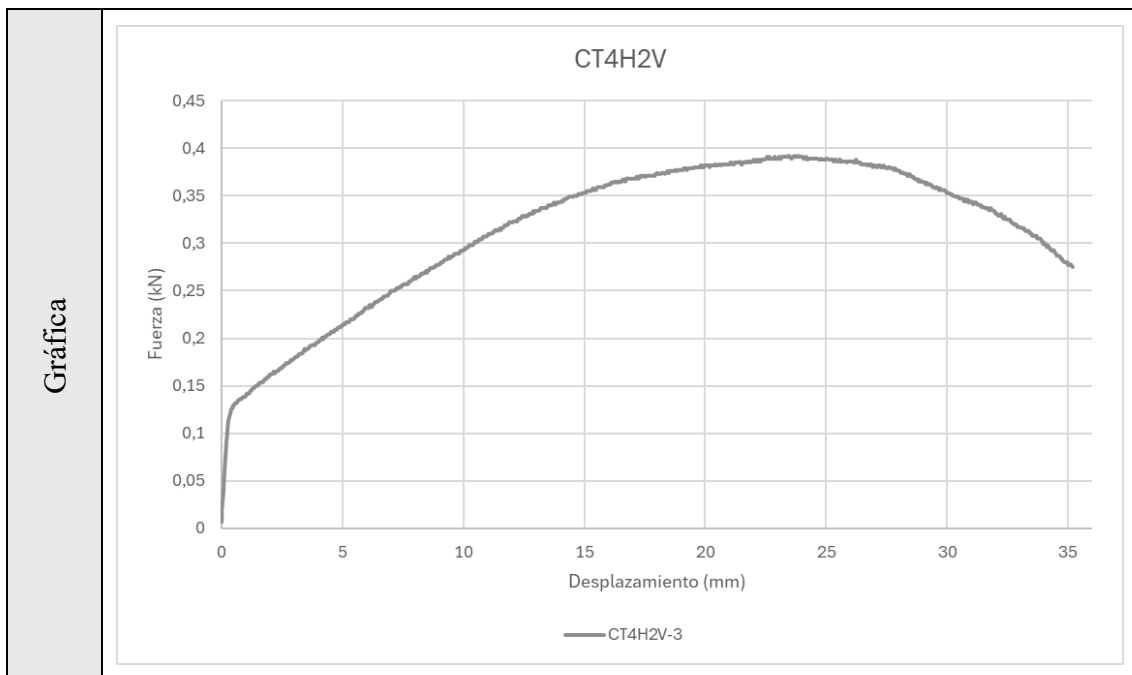
FICHA TÉCNICA

Probeta	CT4H2V-3	Material	Relleno	Capa Exterior
		Cobre	Triangular	4 sup. e inf. 2 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,10 mm	30,27 mm	81,11 mm	6,721 μm	35,730 μm





Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	0,392 kN	103,40 °	150,29 MPa



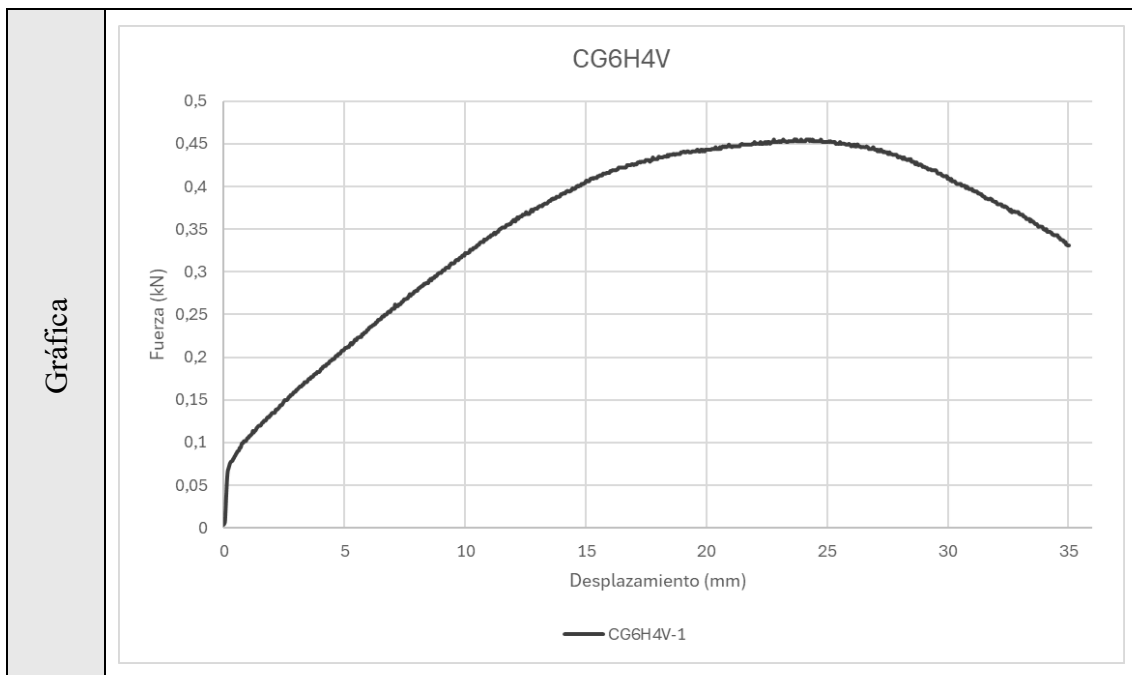
FICHA TÉCNICA

Probeta	CG6H4V-1	Material	Relleno	Capa Exterior
		Cobre	Gyroid	6 sup. e inf. 4 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,10 mm	30,30 mm	81,14 mm	2,147 μm	13,530 μm

Imagen antes del ensayo	
Imagen después del ensayo	

Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	0,455 kN	100,12 °	174,38 MPa



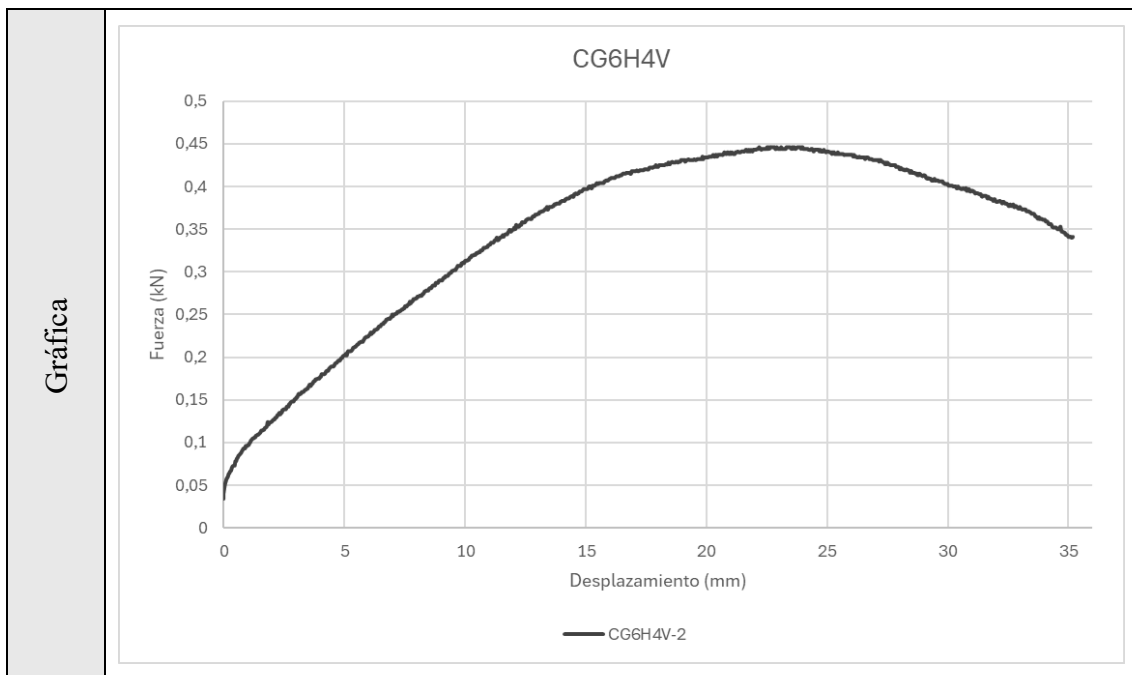
FICHA TÉCNICA

Probeta	CG6H4V-2	Material	Relleno	Capa Exterior
		Cobre	Gyroid	6 sup. e inf. 4 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,10 mm	30,27 mm	81,10 mm	1,801 μm	11,379 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	0,446 kN	96,99 °	170,94 MPa



FICHA TÉCNICA

Probeta	CG6H4V-3	Material	Relleno	Capa Exterior
		Cobre	Gyroid	6 sup. e inf. 4 lateral

Caracterización	Espesor	Anchura	Longitud	Rugosidad Media	Rugosidad Máxima
	3,10 mm	30,28 mm	80,83 mm	1,695 μm	11,364 μm



Resultados	Carga máxima	Grado de Curvatura	Resistencia Rotura
	0,458 kN	101,51 °	175,53 MPa

