



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Área de Conocimiento: Ingeniería de los Procesos de Fabricación

PROYECTO/TRABAJO FIN DE MÁSTER

**CARACTERIZACIÓN DE ALEACIONES METÁLICAS DURAS
SOMETIDAS A DOBLADO EN PROBETAS ELABORADAS
MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA**

Máster en Ingeniería Industrial

Autor: PERALBO CALERO, LUIS

Tutor: MARTÍN FERNANDEZ, FRANCISCO DE SALES

Cotutor GUERRERO VACAS, GUILLERMO

MÁLAGA, SEPTIEMBRE de 2025

RESUMEN

La Fabricación Aditiva es actualmente uno de los procesos más relevantes dentro del ámbito de la fabricación mecánica. La posibilidad de procesar materiales metálicos, cerámicos, compuestos o poliméricos mediante esta tecnología ha permitido ampliar de forma significativa su campo de aplicación en la industria.

El presente trabajo plantea como principal objetivo analizar el comportamiento mecánico a flexión de probetas fabricadas mediante tecnologías de Fabricación Aditiva a partir de aleaciones metálicas de elevada dureza y comportamiento frágil. Se ha evaluado la resistencia a flexión de estas probetas teniendo en cuenta diferentes configuraciones del proceso de fabricación, dentro de las limitaciones propias del equipo.

En particular en este proyecto, se ha empleado la tecnología (ADAM) Atomic Diffusion Additive Manufacturing, implementada mediante la impresora Markforged Metal X. Esta técnica se basa en la extrusión de filamento compuesto por metal y un aglutinante polimérico, que tras la impresión requiere un proceso de lavado y sinterizado para obtener piezas metálicas densas y funcionales. Su principal ventaja radica en la capacidad de fabricar geometrías complejas con una buena resolución dimensional y control de la microestructura, lo que la convierte en una herramienta eficaz para estudios comparativos del comportamiento mecánico según distintos parámetros de impresión.

En el diseño experimental se han considerado cuatro grupos principales de variables relacionadas con el proceso de fabricación aditiva y el ensayo mecánico de flexión. En cuanto a la orientación de impresión, se han utilizado dos configuraciones: posición normal (0°) y posición inclinada a 45° . Los patrones de relleno utilizados han sido: red, triangular y sólido. Respecto a los materiales, se han seleccionado tres tipos de acero: A2, H13 y 17-4 PH. Finalmente, en el ensayo a flexión se han dispuesto las probetas en tres posiciones de carga: horizontal normal, horizontal lateral y las obtenidas con una orientación a 45 grados, con el objetivo de analizar el comportamiento mecánico de las probetas sometidas a distintas condiciones de fabricación y ensayo.

Se concluye que una buena elección de los parámetros de impresión en fabricación aditiva permite mejorar el comportamiento a flexión de las probetas, incluso en materiales frágiles, lo que demuestra el gran potencial de esta tecnología para aplicaciones estructurales.

Palabras clave: Fabricación aditiva, ADAM, flexión, aleaciones metálicas, comportamiento mecánico, parámetros de impresión.

ABSTRACT

Additive Manufacturing is currently one of the most relevant processes within the field of mechanical manufacturing. The ability to process metallic, ceramic, composite or polymeric materials using this technology has significantly broadened its range of industrial applications.

The main objective of this study is to analyse the flexural mechanical behaviour of specimens manufactured through Additive Manufacturing technologies using metal alloys characterised by high hardness and brittle behaviour. The flexural strength of these specimens has been evaluated considering different manufacturing process configurations, within the inherent limitations of the equipment.

This project has employed Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) technology, implemented using the Markforged Metal X printer. This technique is based on the extrusion of a filament composed of metal powder and a polymeric binder, which, after printing, requires a washing and sintering process in order to obtain dense and functional metallic parts. Its main advantage lies in its ability to produce complex geometries with good dimensional resolution and microstructural control, making it an effective tool for comparative studies on mechanical behaviour under varying printing parameters.

The experimental design considered four main groups of variables related to the additive manufacturing process and the flexural mechanical testing. Regarding printing orientation, two configurations were used: normal position (0°) and inclined position at 45° . The infill patterns selected were gyroid, triangular and solid. As for the materials, three types of steel were chosen: A2, H13, and 17-4 PH. Finally, in the flexural test, the specimens were arranged in three loading positions: normal-horizontal, lateral-horizontal, and those produced with a 45-degree orientation, with the aim of analysing the mechanical behaviour of the specimens subjected to different manufacturing and testing conditions.

It is concluded that a suitable selection of printing parameters in additive manufacturing can enhance the flexural performance of the specimens, even when using brittle materials. This demonstrates the great potential of this technology for structural applications.

Keywords: Additive Manufacturing, ADAM, flexural testing, metallic alloys, mechanical behaviour, printing parameters.

AGRADECIMIENTOS

A mis directores del Trabajo Fin de Máster, Francisco De Sales Martín Fernández, María Jesús Martín Sánchez, Guillermo Guerrero Vacas y Óscar Rodríguez Alabanda, por su dedicación, entrega y prestación en todo momento.

A mi familia, por su apoyo incondicional y confianza ciega en todos mis proyectos.

A todos mis compañeros y amigos que me han acompañado a lo largo de la carrera por el apoyo recibido en todos estos años.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|----|
| CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO | 1 |
| 1.1. Introducción | 1 |
| 1.2. Objetivos | 1 |
| CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS, TÉCNICOS Y ESTADO DEL ARTE | 3 |
| 2.1 Técnicas de fabricación de mecánica | 3 |
| 2.2 Fabricación del sustrato por fabricación aditiva | 3 |
| 2.3 Fabricación aditiva de metal | 4 |
| 2.3.1 Fabricación aditiva de metal con filamento de polvo y sinterización | 6 |
| 2.3.2 Otros sistemas comerciales de fabricación aditiva metálica | 6 |
| 2.4 Caracterización de los materiales metálicos utilizados | 7 |
| 2.4.1 Acero para herramientas H13 | 7 |
| 2.4.2 Acero para herramientas A2 | 8 |
| 2.4.3 Acero inoxidable 17-4 PH | 8 |
| 2.5 Ensayo a flexión en metales duros | 9 |
| 2.6 Ensayo de dureza | 10 |
| 2.7 Estado de la técnica | 11 |
| 2.7.1 Fabricación aditiva metálica aplicada a aceros | 11 |
| 2.7.2 Propiedades mecánicas de aceros impresos en 3D | 14 |
| 2.7.3 Ensayos de flexión en aceros endurecidos o frágiles | 16 |
| 2.7.4 Comparación entre tecnologías de impresión y resultados mecánicos | 17 |
| 2.7.5 Avances en la fabricación aditiva de estructuras metálicas multifuncionales | 20 |
| CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 25 |
| 3.1 Probetas | 25 |
| 3.1.1. Identificación | 25 |
| 3.1.2. Caracterización | 28 |
| 3.2 Tecnología de fabricación aditiva utilizada: ADAM con impresora Markforged Metal X | 30 |
| 3.3 Equipos para ensayos | 34 |
| 3.3.1 Máquina universal de ensayos Servosis ME-402 | 34 |
| 3.3.2 Máquina de ensayo de dureza Zwick/Roell ZHU250 Top | 35 |
| 3.3.3 Rugosímetro | 37 |

| | |
|---|----|
| 3.4 Microscopios confocales | 38 |
| 3.5 Estudio estadístico de los resultados | 39 |
| 3.5.1. Análisis de regresión y análisis de varianza (ANOVA) | 39 |
| 3.5.2. Gráfica de efectos principales | 40 |
| 3.5.3. Gráfica de contorno | 40 |
| CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 24 |
| 4.1 Caracterización dimensional y superficial | 41 |
| 4.1.1 Dimensiones de las probetas | 41 |
| 4.1.2 Rugosidad superficial | 42 |
| 4.2 Ensayo de flexión | 44 |
| 4.2.1. Curvas carga-deformación representativas de las probetas con mayor resistencia a flexión HSHN (H13, Solid, Horizontal normal) | 46 |
| 4.2.2 Curvas carga-deformación representativas de las probetas con resistencia media AGHN (A2, Gyroid, Horizontal Normal), 17-4GHL (17-4 PH, Gyroid, Horizontal lateral) y 17-4THN (17-4 PH, Triangular, Horizontal Normal) | 47 |
| 4.2.3 Curvas carga-deformación representativas de las probetas con menor resistencia a flexión AT45 (A2, Triangular, 45 grados), HG45 (H13, Gyroid, 45 grados) y 17-4S45 (17-4 PH, Solid, 45 grados) | 48 |
| 4.3 Ensayo de dureza | 50 |
| 4.4 Observaciones microscópicas de las probetas ensayadas | 52 |
| 4.4.1 Análisis de las fracturas tras el ensayo de flexión | 52 |
| 4.4.2 Cavidades generadas por los ensayos de dureza | 62 |
| 4.5 Estudio estadístico de los resultados | 63 |
| 4.5.1 Resistencia a flexión | 64 |
| 4.5.2 Dureza | 67 |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES | 35 |
| 5.1 Conclusiones generales | 71 |
| 5.2 Conclusiones particulares sobre los resultados | 71 |
| 5.2.1 Ensayo de flexión | 71 |
| 5.2.2 Ensayo de dureza | 72 |
| 5.2.3 Observaciones microscópicas | 73 |
| 5.2.4 Tipo de material | 73 |
| 5.2.5 Tipo de relleno | 73 |
| 5.2.6 Tipo de orientación | 74 |
| 5.3 Competencias adquiridas | 74 |
| 5.4 Posibles líneas de desarrollo futuro | 74 |

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA | 35 |
| CAPÍTULO 7. ANEXOS | 35 |
| 7.1 Anexo 1: Ensayos experimentales | 78 |
| 7.1.1 Medida de las dimensiones de las probetas | 78 |
| 7.1.2 Medida de rugosidad de superficie | 80 |
| 7.1.3 Ensayo de flexión | 84 |
| 7.1.4 Ensayo de dureza | 88 |
| 7.2 Anexo 2: Informes ensayo a flexión | 90 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Tecnologías fabricación aditiva (Additively, 2025). | 3 |
| Figura 2. Impresoras 3D de metal: (a) Studio System 2 de Desktop Metal, (b) MPrint+ de One Click Metal, (c) Optomec CS250 y (d) Metal Jet S100 de HP (All3dp, 2023). | 5 |
| Figura 3. Markforged Metal X (All3DP Pro, 2019). | 6 |
| Figura 4. Fases del ensayo a flexión: deformación y rotura de la probeta. | 10 |
| Figura 5. Pasos del ensayo de dureza Rockwell (ZwickRoell S.L., 2020). | 11 |
| Figura 6. Datos del campo de deformación axial del ensayo de flexión (Henry et al., 2021). | 12 |
| Figura 7. Patrón de relleno triangular (a) y giroide (b) (Basak et al., 2025b). | 12 |
| Figura 8. Estrategias de deposición de la etapa de impresión. (a) Capa teórica. (b) Imagen macroscópica de una capa de la pieza fabricada por ADAM (Rodríguez et al., 2023). | 13 |
| Figura 9. Probetas sinterizadas (a) antes y (b – d) después de los ensayos de tracción: (b) condiciones D0°, (c) D45° y (d) D90° (Bianchi et al., 2024). | 13 |
| Figura 10. Robot láser ABB con 6 cabezales de boquilla utilizado para realizar el proceso DED (Morales et al., 2023). | 14 |
| Figura 11. Principio básico de la tecnología SLM (Véle et al., 2021). | 14 |
| Figura 12. Curvas de flexión de 3 puntos para probetas forjadas, SLM y FFF (García-Hernández et al., 2024). | 16 |
| Figura 13. Representación esquemática del dispositivo utilizado para el ensayo de flexión en tres puntos (Oliveira et al., 2021). | 17 |
| Figura 14. Esquema del pulsador mecánico (Concli et al., 2021). | 17 |
| Figura 15. La placa LCP Ti-6Al-4V impresa por EBM (Liu et al., 2014). | 18 |
| Figura 16. Microestructura de diferentes métodos de preparación del acero H13 (Han et al., 2024). | 19 |
| Figura 17. (a) Polvos para el proceso de fusión selectiva por láser (SLM). (b) Materiales a granel después del proceso SLM. (c) Perfil de las muestras para ensayos de fatiga térmica (TF) (Wang et al., 2020). | 20 |
| Figura 18. (a) Configuración de test de flexión de tres puntos; (b) muestra de flexión utilizada (Bedmar et al., 2021). | 20 |
| Figura 19. Muestras con fractura completa (a), muestras con fractura parcial (b) (Carminati et al., 2022). | 21 |
| Figura 20. Modelo 3D de la probeta diseñado en SolidWorks conforme a la norma ISO 3327:2009 (Elaboración propia). | 25 |
| Figura 21. (a) Conjunto de probetas impresas antes del sinterizado, (b) Probetas dispuestas en bandeja cerámica justo antes de entrar al horno Sinter-2 y (c) Probetas tras el proceso de sinterizado (Elaboración propia). | 26 |

| | |
|---|----|
| Figura 22. Tipos de relleno usados en este trabajo: (a) Solid, (b) Triangular y (c) Gyroid (Elaboración propia). | 27 |
| Figura 23. Representación gráfica de las tres orientaciones de impresión (a) Horizontal normal, (b) Horizontal lateral y (c) 45 grados (Elaboración propia). | 27 |
| Figura 24. Ejemplo de probeta con nomenclatura identificativa (Elaboración propia). | 28 |
| Figura 25. Croquis técnico de la probeta tipo A creado en SolidWorks, con las dimensiones nominales según la norma ISO 3327:2009 (Elaboración propia). | 29 |
| Figura 26. Dimensiones principales de una probeta mediante microscopio DVM6: (a) Vista de planta y (b) Vista de alzado (Elaboración Propia). | 29 |
| Figura 27. Dimensiones del chaflán de una probeta mediante microscopio DVM6 (Elaboración propia). | 30 |
| Figura 28. Medida de rugosidad superficial (Elaboración propia). | 30 |
| Figura 29. Captura del software Eiger con la configuración de una probeta (Elaboración propia). | 31 |
| Figura 30. Probeta con fallo de impresión por falta de soporte en orientación a 45° (Elaboración propia). | 31 |
| Figura 31. Soportes añadidos en probetas con orientación a 45° (Elaboración propia). | 32 |
| Figura 32. Impresora 3D Markforged Metal X (Elaboración propia). | 32 |
| Figura 33. (a) Estación de lavado Wash-1 (b) Interior de la estación de lavado (Elaboración propia). | 32 |
| Figura 34. Vista frontal (a) y lateral (b) del horno de sinterizado utilizado para el tratamiento térmico de las piezas fabricadas mediante tecnología ADAM (Elaboración propia). | 33 |
| Figura 35. Instalación de gas inerte conectada al horno (Elaboración propia). | 33 |
| Figura 36. Máquina universal de ensayos Servosis ME-402 (Elaboración propia). | 34 |
| Figura 37. (a) Utillaje específico para el ensayo de flexión por tres puntos. (b) Montaje del utillaje según la norma ISO 3327:2009 (Elaboración propia). | 35 |
| Figura 38. Software de adquisición de datos utilizado en el ensayo (Elaboración propia). | 35 |
| Figura 39. Máquina de ensayo de dureza Zwick/Roell ZHU250 Top (Elaboración propia). | 36 |
| Figura 40. Ensayo de dureza (Elaboración propia). | 36 |
| Figura 41. Resultado del ensayo de dureza (Elaboración propia). | 37 |
| Figura 42. Rugosímetro (Elaboración propia). | 37 |
| Figura 43. Microscopio confocal digital Leica DVM6 (Elaboración propia). | 39 |
| Figura 44. Valores de las dimensiones de las probetas siendo la primera sigla el material (A2, H13, 17-4 PH), la segunda referente al relleno (Gyroid, Solid, Triangular), la tercera la orientación de impresión (Horizontal normal, | |

| | |
|--|----|
| Horizontal lateral, 45 grados) y por último el número de la probeta más representativa seleccionada (Elaboración propia). | 41 |
| Figura 45. Valores de la rugosidad Ra, Rz y Rq de las probetas siendo la primera sigla el material (A2, H13, 17-4 PH), la segunda referente al relleno (Gyroid, Solid, Triangular), la tercera la orientación de impresión (Horizontal normal, Horizontal lateral, 45 grados) (Elaboración propia). | 43 |
| Figura 46. Valores de la resistencia a flexión de las probetas siendo la primera sigla el material (A2, H13, 17-4 PH), la segunda referente al relleno (Gyroid, Solid, Triangular), la tercera la orientación de impresión (Horizontal normal, Horizontal lateral, 45 grados) (Elaboración propia). | 45 |
| Figura 47. Curva carga-deformación probeta con la configuración HSHN (H13, Solid, Horizontal Normal) (Elaboración propia). | 46 |
| Figura 48. Secuencia del ensayo de flexión de la probeta HSHN (H13, Solid, Horizontal Normal): (a) Estado inicial sin carga, (b) curvatura máxima antes de la rotura, (c) instante de fractura (Elaboración propia). | 47 |
| Figura 49. Curva carga-deformación probeta con la configuración AGHN (A2, Gyroid, Horizontal Normal) (Elaboración propia). | 48 |
| Figura 50. Secuencia del ensayo de flexión de la probeta AGHN (A2, Gyroid, Horizontal Normal): (a) estado inicial sin carga, (b) flexión progresiva con carga creciente, (c) momento de la rotura de la probeta (Elaboración propia). | 48 |
| Figura 51. Curva carga-deformación probeta con la configuración 17-4S45 (17-4 PH, Solid, 45 Grados) (Elaboración propia). | 49 |
| Figura 52. Secuencia del ensayo de flexión de la probeta 17-4S45 (17-4 PH, Solid, 45 Grados): (a) estado inicial sin carga, (b) deformación progresiva con carga creciente, (c) rotura final de la probeta (Elaboración propia). | 49 |
| Figura 53. Resultados medios del ensayo de dureza Rockwell de las probetas fabricadas con tecnología ADAM (Elaboración propia). | 51 |
| Figura 54. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración 17-4GHL, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia). | 53 |
| Figura 55. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración 17-4S45, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia). | 54 |
| Figura 56. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración 17-4THN, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia). | 55 |
| Figura 57. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración AGHN, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia). | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 58. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración ASHL, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia). | 57 |
| Figura 59. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración AT45, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia). | 58 |
| Figura 60. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración HG45, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia). | 59 |
| Figura 61. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración HSHN, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia). | 60 |
| Figura 62. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración HTHL, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia). | 61 |
| Figura 63. Cavidades generadas por el ensayo de dureza en probetas de 17-4 PH con relleno sólido (Elaboración propia). | 62 |
| Figura 64. Cavidades generadas por el ensayo de dureza en probetas de A2 con relleno sólido (Elaboración propia). | 63 |
| Figura 65. Cavidades generadas por el ensayo de dureza en probetas de H13 con relleno sólido (Elaboración propia). | 63 |
| Figura 66. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la resistencia a flexión. | 65 |
| Figura 67. Gráfica de efectos principales tensión máxima a flexión. | 65 |
| Figura 68. Gráficas de contorno – Resistencia a flexión. a) Material vs. Fill type, b) Fill type vs Orientation, c) Orientation vs. Material. | 66 |
| Figura 69. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la dureza. | 68 |
| Figura 70. Gráfica de efectos principales – Dureza. | 69 |
| Figura 71. Gráficas de contorno – Dureza. a) Material vs. Fill type, b) Fill type vs Orientation, c) Orientation vs. Material. | 69 |
| Figura 72. Ensayos a flexión de las probetas – HG45 1, 2, 3, 4, 5, HSHN 1. | 90 |
| Figura 73. Ensayos a flexión de las probetas – HSHN 2, 3, 4, 5, HTHL 1, 2, 3, 4. | 91 |
| Figura 74. Ensayos a flexión de las probetas – HTHL 5, 174GHL 1, 2, 3, 4, 5, 174S45 1, 2. | 92 |
| Figura 75. Ensayos a flexión de las probetas – 174S45 3, 4, 5, 174THN 1, 2, 3, 4, 5. | 93 |

| | |
|--|----|
| Figura 76. Ensayos a flexión de las probetas – AGHN 1, 2, 3, 4, 5, ASHL 1, 2, 3. | 94 |
| Figura 77. Ensayos a flexión de las probetas – ASHL 4, 5, AT45 1, 2, 3, 4, 5. | 95 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Composición porcentual del acero H13 (Markforged, 2023a) | 8 |
| Tabla 2. Composición porcentual del acero A2. | 8 |
| Tabla 3. Composición porcentual del acero 17-4 PH. | 9 |
| Tabla 4. Fabricación aditiva metálica aplicada a aceros (Elaboración propia). | 22 |
| Tabla 5. Propiedades mecánicas de aceros impresos en 3D (Elaboración propia). | 23 |
| Tabla 6. Ensayos de flexión en aceros endurecidos o frágiles (Elaboración propia). | 23 |
| Tabla 7. Comparación entre tecnologías de impresión y resultados mecánicos (Elaboración propia) | 24 |
| Tabla 8. Avances en la fabricación aditiva de estructuras metálicas multifuncionales (Elaboración propia). | 24 |
| Tabla 9. Clasificación de las probetas utilizadas en el proyecto. | 26 |
| Tabla 10. Medidas principales de las probetas ISO 3327:2009 (Elaboración propia). | 28 |
| Tabla 11. Medidas del chaflán de las probetas ISO 3327:2009. | 29 |
| Tabla 12. Medidas de las dimensiones principales de las probetas (Elaboración propia). | 41 |
| Tabla 13. Medidas de la rugosidad de los sustratos (Elaboración propia). | 43 |
| Tabla 14. Resultados de resistencia a flexión de las probetas (Elaboración propia). | 45 |
| Tabla 15. Resultados del ensayo de dureza. Los valores marcados con * fueron determinados mediante el método Rockwell D (HRD). (Elaboración propia). | 50 |
| Tabla 16. Comparación de la dureza medida en probetas con relleno sólido versus valores esperados según el catálogo de Markforged (Elaboración propia). | 52 |
| Tabla 17. Tabla ANOVA resistencia a flexión (Elaboración propia). | 64 |
| Tabla 18. Tabla ANOVA dureza (Elaboración propia). | 67 |
| Tabla 19. Medidas de las dimensiones principales de las probetas (Elaboración propia). | 79 |
| Tabla 20. Medida de rugosidad de las probetas de A2 (Elaboración propia). | 81 |
| Tabla 21. Medida de rugosidad de las probetas de H13 (Elaboración propia). | 82 |
| Tabla 22. Medida de rugosidad de las probetas de 17-4 PH (Elaboración propia). | 83 |
| Tabla 23. Resultados ensayo de flexión probetas A2 (Elaboración propia). | 85 |
| Tabla 24. Resultados ensayo de flexión probetas H13 (Elaboración propia). | 85 |
| Tabla 25. Resultados ensayo de flexión probetas 17-4 PH (Elaboración propia). | 86 |

| | |
|--|----|
| Tabla 26. Resultados ensayo de dureza probetas A2 (Elaboración propia). | 89 |
| Tabla 27. Resultados ensayo de dureza probetas H13 (Elaboración propia). | 89 |
| Tabla 28. Resultados ensayo de dureza probetas 17-4 PH (Elaboración propia). | 89 |

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

1.1. Introducción

La Fabricación Aditiva (FA), también conocida como impresión 3D, ha supuesto una revolución en el ámbito de la fabricación mecánica gracias a su capacidad para producir geometrías complejas y componentes personalizados con un alto grado de precisión. La evolución de esta tecnología ha permitido el uso de materiales de distinta naturaleza, incluyendo polímeros, cerámicos, compuestos y metales, ampliando considerablemente su campo de aplicación en sectores industriales como la aeronáutica, automoción, medicina o ingeniería de materiales (Gibson, Rosen y Stucker, 2015).

Entre los materiales más complejos de trabajar mediante FA se encuentran las aleaciones metálicas de elevada dureza y comportamiento frágil. La impresión de estos materiales con garantías de calidad mecánica plantea todavía numerosos retos técnicos, tanto en lo relativo a los parámetros de impresión como en lo referente al análisis del comportamiento estructural de las piezas obtenidas (Herzog et al., 2016).

Uno de los ensayos fundamentales para la caracterización de estas piezas es el ensayo a flexión, ya que permite estudiar su respuesta ante esfuerzos de doblado, condición común en múltiples aplicaciones reales. En este proyecto se analiza el comportamiento mecánico a flexión de probetas metálicas fabricadas mediante FA, con el objetivo de estudiar la influencia de distintos parámetros de impresión sobre dicha propiedad. Este análisis resulta especialmente relevante dada la fragilidad inherente de algunas aleaciones metálicas, lo que puede comprometer su aplicación si no se ajustan correctamente las condiciones del proceso de fabricación.

En esta investigación experimental se seleccionarán diferentes configuraciones de impresión, considerando limitaciones técnicas del equipo y del material, y se analizará el efecto de cada una de ellas sobre la resistencia a la flexión de las probetas fabricadas. A partir de los resultados obtenidos se espera poder establecer directrices que permitan optimizar la impresión de este tipo de materiales para mejorar su comportamiento mecánico frente a esfuerzos de flexión.

Trabajos recientes abordan la influencia de la fabricación aditiva en las propiedades de componentes metálicos, pero centrados principalmente en aspectos microestructurales o en otros tipos de ensayos. Por ello, este proyecto pretende aportar valor a través del análisis específico del comportamiento a flexión, considerando de manera sistemática el impacto de las condiciones de impresión.

1.2. Objetivos

La finalidad de este proyecto es la elaboración del Trabajo de Fin de Máster en la titulación de Ingeniería Industrial, el cual se basa en el estudio experimental del comportamiento mecánico de materiales metálicos de elevada fragilidad, en probetas elaboradas mediante Fabricación Aditiva, con especial atención al análisis de su resistencia a la flexión.

Los principales objetivos de este trabajo son los siguientes:

- realizar un estudio sistemático con enfoque investigador sobre el comportamiento a flexión de probetas metálicas obtenidas mediante FA.
- identificar los parámetros más relevantes del proceso de impresión 3D que afectan a la calidad mecánica de las piezas metálicas.

- analizar la influencia de distintas configuraciones de impresión sobre la resistencia a la flexión.
- comparar los resultados obtenidos con referencias teóricas y trabajos previos relacionados con la fabricación convencional y aditiva de aleaciones metálicas.
- realizar ensayos de flexión normalizados sobre las probetas fabricadas, recogiendo datos cuantitativos para su análisis comparativo.
- estudiar la relación entre las condiciones de impresión y la respuesta estructural de los materiales con comportamiento frágil.
- evaluar la viabilidad del uso de determinadas aleaciones metálicas frágiles en aplicaciones reales, en función de su respuesta mecánica bajo esfuerzos de doblado.
- extraer conclusiones sobre la optimización de parámetros de FA con vistas a mejorar las propiedades mecánicas de piezas metálicas fabricadas mediante esta tecnología.

**CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS, TÉCNICOS
Y ESTADO DEL ARTE**

Este capítulo profundizará en los fundamentos teóricos y técnicos de la investigación, proporcionando así un conocimiento amplio de la materia y la creación de los objetivos a conseguir.

Es importante la búsqueda de investigaciones previas para poder tener en cuenta ciertos errores y éxitos que se han cometido a lo largo de la historia, para así, tomar la iniciativa por alguna de las diferentes ramas posibles y tener una cierta seguridad a la hora de realizar ensayos.

2.1 Técnicas de fabricación de mecánica

A la hora de abordar la fabricación de piezas para un proyecto, podemos plantearnos diferentes procesos:

- Conformado por Pulvimetalurgia.
- Conformado por Mecanizado.
- Conformado por Deformación Plástica.
- Conformado por Moldeo.
- Conformado por Fabricación Aditiva.

Cada uno de ellos tiene una serie de ventajas e inconvenientes que deben valorarse cuidadosamente para seleccionar el más adecuado en función de los requisitos específicos de cada aplicación.

En este caso, vamos a centrarnos únicamente en la fabricación aditiva como técnica de producción de piezas metálicas. En la Figura 1, se muestra una comparativa de las distintas tecnologías de fabricación aditiva.

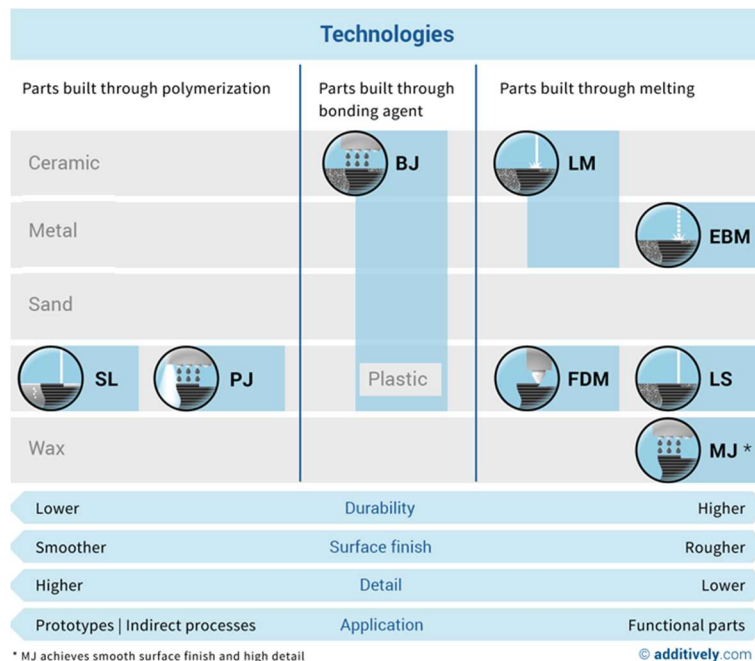


Figura 1. Tecnologías fabricación aditiva (Additively, 2025).

2.2 Fabricación del sustrato por fabricación aditiva

La FA tuvo su origen como una evolución tecnológica inspirada en la impresora de tinta convencional, con el propósito de materializar objetos tridimensionales a partir de información digital. En 1986, Charles Hull presentó un modelo pionero basado en la superposición de capas, sentando las bases de lo que hoy se conoce como fabricación aditiva. Aunque las tecnologías han evolucionado significativamente desde entonces, las

impresoras actuales conservan algunos principios fundamentales de aquellos primeros prototipos. Actualmente, la impresión 3D se ha consolidado como una herramienta versátil y transformadora en múltiples sectores, desde la ingeniería hasta la medicina, permitiendo desde la fabricación de piezas descatalogadas hasta la planificación de intervenciones quirúrgicas, partiendo simplemente de un diseño CAD (Bitfab, 2025a).

El término “fabricación aditiva” (también conocido como manufactura aditiva) engloba un conjunto de tecnologías que permiten la creación de objetos físicos mediante la adición controlada de material, capa a capa. Esta metodología contrasta con los procesos de fabricación sustractivos tradicionales, como el mecanizado CNC, el torneado o el corte por láser, donde se parte de un bloque sólido y se elimina material hasta obtener la geometría deseada (Bitfab, 2025b).

Gracias a su capacidad para producir geometrías complejas, reducir el desperdicio de material y facilitar la personalización, la fabricación aditiva ha adquirido un papel relevante en sectores como el aeroespacial, automotriz, biomédico, joyería o diseño industrial (Edimar, 2020).

A estas ventajas técnicas se suman otros beneficios estratégicos como la producción bajo demanda, la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental, que posicionan a esta tecnología como una alternativa prometedora frente a los retos actuales de la industria manufacturera (Ferrotall, 2021).

2.3 Fabricación aditiva de metal

La fabricación aditiva de metal se basa en la construcción de objetos sólidos mediante la deposición capa a capa de material, que se funde o sinteriza con la aplicación de calor o energía localizada. Este principio, aplicado a metales, permite fabricar piezas metálicas con geometrías complejas y altas prestaciones mecánicas (Interempresas, 2022).

Actualmente, existen diversas tecnologías que permiten la impresión 3D en metal. A continuación, se describen algunas de las más empleadas:

- **Sinterización Selectiva por Láser (SLS):** Consiste en la utilización de un láser de alta potencia para sinterizar de forma selectiva capas de polvo metálico. Tras completar cada capa, se deposita una nueva capa de polvo y se repite el proceso hasta formar la pieza completa (3D Systems, 2025).
- **Fusión Selectiva por Láser (SLM):** Similar al SLS, esta tecnología emplea un láser para fundir completamente el polvo metálico, obteniendo piezas de elevada densidad y resistencia. La principal diferencia respecto al SLS radica en que el proceso SLM implica una fusión total de las partículas (BCN3D Technologies, 2022).
- **Deposición de Energía Dirigida (DED):** Esta técnica utiliza una fuente de energía, como un láser o un arco eléctrico, para fundir y depositar simultáneamente el material metálico en forma de alambre o polvo. Es una solución adecuada para la fabricación o reparación de componentes de gran tamaño (Dassault Systèmes®, 2025).
- **Binder Jetting:** En este caso, se emplea un aglutinante líquido para unir selectivamente partículas de polvo metálico capa a capa. Posteriormente, la pieza se somete a un proceso de sinterización térmica para consolidar la estructura final (3Dnatives, 2023).

- Modelado por Deposición Fundida (FDM/FFF): Esta tecnología se basa en la extrusión de un filamento termoplástico fundido, que se deposita capa a capa siguiendo una trayectoria determinada. Aunque originalmente se desarrolló para polímeros, su adaptación al ámbito metálico ha dado lugar a variantes como ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing), en la cual el filamento contiene partículas metálicas que, tras un posterior proceso de desaglomerado y sinterización, permiten obtener piezas metálicas funcionales. Este enfoque híbrido combina la facilidad de impresión del FDM con las ventajas mecánicas del metal sinterizado (Markforged, 2025).

Cada tecnología presenta ventajas y limitaciones específicas, y su elección depende de múltiples factores, como la geometría y tamaño de la pieza, los requisitos de precisión, la aplicación final y las propiedades mecánicas deseadas.

En cuanto a los materiales utilizados en fabricación aditiva metálica, especialmente con tecnologías como ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) empleada por el sistema Markforged Metal X, destacan principalmente distintos tipos de aceros y superaleaciones. Entre ellos, se incluyen aceros como 17-4 PH, H13 y A2, que combinan una buena resistencia mecánica con una adecuada trabajabilidad y propiedades térmicas, haciéndolos especialmente adecuados para aplicaciones estructurales, funcionales y de utillaje.

Además del acero, otros materiales comúnmente utilizados en fabricación aditiva metálica incluyen el Inconel 625, una superaleación con excelente resistencia a la corrosión y altas temperaturas, ideal para entornos exigentes como el aeroespacial o la industria química. También se emplean aleaciones de cobalto-cromo, particularmente en aplicaciones médicas y odontológicas debido a su biocompatibilidad y alta dureza. Por otro lado, el titanio es muy valorado por su relación resistencia-peso y resistencia a la corrosión, siendo ampliamente utilizado en el ámbito biomédico y aeroespacial. (3Dnatives, 2025b).

En la Figura 2, podemos observar algunas de las mejores impresoras 3D para metal de la actualidad, que serán analizadas en el apartado siguiente.

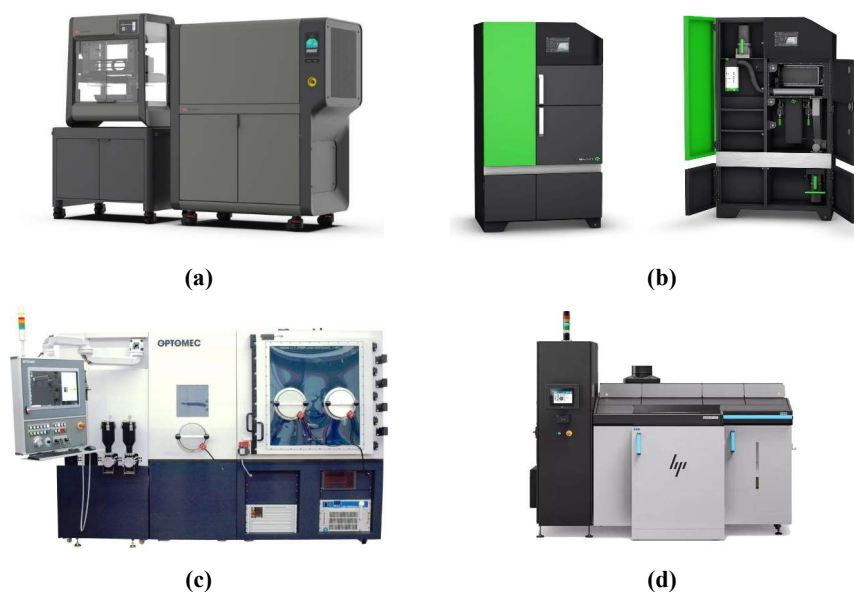


Figura 2. Impresoras 3D de metal: (a) Studio System 2 de Desktop Metal, (b) MPrint+ de One Click Metal, (c) Optomec CS250 y (d) Metal Jet S100 de HP (All3dp, 2023).

2.3.1 Fabricación aditiva de metal con filamento de polvo y sinterización

El equipo empleado para la fabricación de los sustratos metálicos mediante tecnología de fabricación aditiva ha sido la impresora MarkForged Metal X (Figura 3), desarrollada por la empresa estadounidense MarkForged, especializada en soluciones avanzadas de impresión 3D metálica. Este sistema utiliza la tecnología ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing), un proceso patentado que combina la extrusión de filamentos compuestos por una mezcla de polvo metálico, polímero y cera.

Durante el proceso de impresión, el filamento se deposita capa a capa y posteriormente se somete a un tratamiento térmico en el que se eliminan los materiales aglutinantes mediante un sinterizado. Como resultado, se obtiene una pieza metálica con una densidad aproximada del 97%, lo que le proporciona unas propiedades mecánicas muy similares a las obtenidas mediante procesos convencionales.

La MarkForged Metal X cuenta con una cámara cerrada y calefactada, lo cual permite un control riguroso del entorno de impresión y mejora la estabilidad dimensional de las piezas. Además, en sus últimas versiones, incorpora una unidad de escaneado 3D integrada, con una precisión de 1 micrómetro y una resolución de 50 micrómetros, que permite verificar la calidad geométrica de cada capa durante el proceso.



Figura 3. Markforged Metal X (All3DP Pro, 2019).

El material base más comúnmente utilizado con esta impresora es el acero inoxidable 17-4 PH, una aleación conocida por su elevada resistencia mecánica y a la corrosión. No obstante, la máquina es compatible con otros metales como aceros para herramientas, Inconel, cobre puro, lo que amplía significativamente el abanico de aplicaciones potenciales en distintos sectores industriales (Innovación y Tecnología, 2021).

2.3.2 Otros sistemas comerciales de fabricación aditiva metálica

Además de la Markforged Metal X, existen numerosos sistemas comerciales para la fabricación aditiva de metales, cada uno con particularidades tecnológicas, capacidades materiales y aplicaciones industriales diferenciadas. A continuación, se describen brevemente algunos de los equipos más representativos:

- Desktop Metal - Studio System 2: Este sistema es una nueva versión y utiliza un proceso similar al de la Markforged Metal X, basado en la extrusión de filamentos con polvo metálico y posterior sinterizado. No requiere de atmósferas controladas ni sistemas complejos de manipulación de polvo, lo que lo convierte en una opción segura y accesible para entornos no industriales como puede ser en trabajos de investigación. Su principal ventaja es la facilidad de uso y la posibilidad de fabricar piezas metálicas funcionales sin necesidad de equipos auxiliares complejos (3Dnatives, 2025a)

- One Click Metal – MPrint +: Esta impresora emplea tecnología de fusión láser sobre lecho de polvo (LPBF). Se caracteriza por ser una solución compacta y económica dentro del ámbito de la fusión por láser, lo que la hace adecuada para pequeñas y medianas empresas. Es compatible con aceros inoxidable, aceros para herramientas y aleaciones de titanio. Su arquitectura de módulos permite integrar el sistema de impresión, recogida de polvo y software de preparación de archivos en un único entorno simplificado (One click metal, 2023).
- HP-Metal Jet S100: Utiliza tecnología de binder jetting, en la que se deposita un aglutinante sobre polvo metálico capa a capa, seguido de un proceso de sinterizado. Está diseñada para la producción en masa de componentes metálicos, ofreciendo altas tasas de producción y bajos costes por pieza. HP destaca por su enfoque industrial, orientado al sector automotriz, médico y de bienes de consumo (HP, 2025).
- Optomec - CS250 (LENS): Basada en la tecnología DED (Directed Energy Deposition), este sistema utiliza un láser de alta potencia para fundir polvo metálico suministrado mediante boquillas, mientras se deposita de forma controlada sobre una base. Es ideal para la fabricación y reparación de componentes metálicos grandes o con geometrías complejas. Se emplea habitualmente en sectores como el aeroespacial, defensa y energético (Optomec, 2020).
- Meltio – M450 / Engine CNC Integration: Los sistemas desarrollados por Meltio combinan la tecnología de Directed Energy Deposition (DED) con alimentación por hilo metálico (wire-laser metal deposition). La Meltio M450 es una impresora metálica compacta que utiliza láser de fibra para fundir hilo metálico, permitiendo la fabricación de piezas sin polvo y con costes operativos reducidos. Su sistema también puede integrarse en máquinas CNC o brazos robóticos (Engine CNC Integration), habilitando procesos híbridos de fabricación y reparación. Es compatible con materiales como acero inoxidable, acero herramienta, Inconel o titanio, y se emplea tanto en prototipado como en aplicaciones industriales exigentes en sectores como la automoción, aeroespacial o defensa (Meltio3D, 2024).

Cada uno de estos equipos representa una solución tecnológica con un enfoque específico, que va desde la accesibilidad y facilidad de uso en entornos no industriales, hasta la producción en serie o la reparación de piezas de gran tamaño. La elección de un sistema u otro depende en gran medida de los requisitos del proyecto, las propiedades del material deseadas, el volumen de producción y las limitaciones económicas y espaciales del entorno de fabricación.

2.4 Caracterización de los materiales metálicos utilizados

2.4.1 Acero para herramientas H13

En el caso del acero para herramientas H13, es un material de alta resistencia térmica y mecánica, capaz de mantener sus propiedades incluso a temperaturas elevadas. Se trata de un acero más duro que el inoxidable 17-4 PH, lo que lo hace especialmente indicado para aplicaciones donde se requiere una elevada dureza, resistencia al desgaste y estabilidad térmica.

El H13 desarrollado por Markforged para fabricación aditiva puede someterse a tratamiento térmico alcanzando una dureza de hasta 45 HRC, con una resistencia a la tracción (UTS) de aproximadamente 1500 MPa. Debido a estas propiedades, se utiliza

comúnmente en la fabricación de utillaje de soldadura, moldes, troqueles y otros componentes que requieren resistencia al calor o al impacto repetitivo (Markforged, 2023a).

En la Tabla 1, se muestra la composición química del acero H13:

Tabla 1. Composición porcentual del acero H13 (Markforged, 2023a)

| SUSTRATO | CR | MO | SI | V | C | MN | C | P | S | FE |
|----------|----|-----|----|---|------|------|-----|------|------|-------|
| H13 | 5 | 1.5 | 1 | 1 | 0.35 | 0.30 | 0.3 | 0.03 | 0.03 | Resto |

2.4.2 Acero para herramientas A2

Por otro lado, el acero A2 se destaca por su equilibrada combinación de resistencia mecánica, tenacidad y buena resistencia a la corrosión, lo que lo convierte en un material versátil para múltiples aplicaciones industriales. Aunque no alcanza el nivel de resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable austeníticos como el 1.4301 / 1.4307, el acero A2 ofrece una resistencia moderada a la corrosión, suficiente para aplicaciones en ambientes ligeramente agresivos o donde se requiere una durabilidad superior al acero al carbono estándar (Markforged, 2023b).

Este tipo de acero se utiliza frecuentemente en aplicaciones que requieren una alta resistencia al desgaste y buena estabilidad dimensional tras el tratamiento térmico, como, por ejemplo:

- Fabricación de herramientas de corte y matrices (troqueles, punzones, cortadores).
- Componentes de moldeo por inyección de plásticos.
- Partes estructurales de maquinaria expuestas a carga cíclica.
- Industria automotriz, aeronáutica y de manufactura de precisión.

En la Tabla 2, se muestra la composición química del acero A2:

Tabla 2. Composición porcentual del acero A2.

| SUSTRATO | CR | MO | SI | V | C | MN | C | P | S | FE |
|----------|----|----|-----|-----|---|----|-----|------|------|-------|
| A2 | 5 | 1 | 0.3 | 0.2 | 1 | 1 | 0.3 | 0.03 | 0.03 | Resto |

2.4.3 Acero inoxidable 17-4 PH

El tercero de los materiales, acero inoxidable 17-4 PH, es un acero martensítico endurecible por precipitación que combina una alta resistencia mecánica, buena tenacidad y una resistencia a la corrosión superior a la de los aceros al carbono y aleados convencionales. Es ampliamente utilizado en sectores industriales que requieren piezas con alto rendimiento mecánico, estabilidad dimensional y resistencia en ambientes corrosivos moderados.

En su versión optimizada para impresión 3D mediante la tecnología Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) de Markforged, este material conserva la mayoría de sus propiedades tradicionales, lo que lo hace apto para la fabricación de componentes funcionales directamente desde diseño digital.

El 17-4 PH de Markforged puede alcanzar una dureza de 36 HRC mediante tratamiento térmico y presenta una resistencia a la forja del 95% en comparación con el material forjado tradicional, lo que lo convierte en una excelente alternativa para prototipos

funcionales y piezas finales que requieren alta resistencia mecánica, buena resistencia a la corrosión y tolerancia a cargas elevadas (Markforged, 2023c)

Este acero se emplea comúnmente en aplicaciones como:

- Aeronáutica (componentes estructurales y fijaciones).
- Industria médica (instrumental quirúrgico, dispositivos ortopédicos).
- Industria energética y nuclear (válvulas, bombas y elementos estructurales).
- Sector marino y automoción (piezas expuestas a ambientes corrosivos y cargas dinámicas).

En la Tabla 3, se presenta la composición química del acero 17-4 PH:

Tabla 3. Composición porcentual del acero 17-4 PH.

| SUSTRATO | CR | NI | SI | CU | C | MN | NB | P | S | FE |
|----------|----|-----|----|----|------|----|-----|------|------|-------|
| 17-4 PH | 16 | 4.5 | 1 | 4 | 0.07 | 1 | 0.3 | 0.04 | 0.02 | Resto |

2.5 Ensayo a flexión en metales duros

El ensayo a flexión es uno de los tipos de sollicitación más utilizados en la práctica, por lo que resulta de gran importancia para la caracterización mecánica de una amplia variedad de materiales, incluyendo metales, plásticos, maderas, cerámicas, etc.

La resistencia a flexión se refiere a la capacidad que tiene un material para resistir cargas aplicadas de forma perpendicular a su eje longitudinal. El propósito del ensayo de flexión es obtener información sobre el comportamiento mecánico del material, específicamente en lo que respecta a los esfuerzos máximos, las deformaciones (o flechas) que se producen antes de la rotura, y el cálculo del módulo elástico en flexión. Para ello, se considera la distancia entre los apoyos, la cual se determina en función del espesor de la probeta utilizada. Este tipo de ensayo se lleva a cabo en una máquina universal de ensayos, la misma que se emplea para realizar pruebas de tracción o compresión. Sin embargo, para realizar el ensayo de flexión es necesario adaptar los elementos del equipo, utilizando apoyos y un útil de carga adecuados. Durante el procedimiento, la probeta se coloca sobre dos apoyos y se le aplica una carga desde la parte superior, en dirección perpendicular a su eje longitudinal, hasta alcanzar la rotura o el límite de deformación del material (AENOR, 2010).

En el presente proyecto, el ensayo a flexión se ha utilizado con el objetivo de analizar el comportamiento mecánico de piezas metálicas fabricadas mediante impresión 3D. Se buscó evaluar la resistencia a flexión, la deformación máxima y la rigidez del material en diferentes condiciones de fabricación, con especial atención a la influencia de la orientación de impresión, el tipo de acero utilizado (H13, A2, 17-4PH) y el tratamiento térmico aplicado.

El ensayo se realizó mediante el método de flexión en tres puntos, colocando las probetas sobre dos apoyos separados una distancia fija y aplicando una carga en el centro mediante un útil adaptado a la máquina universal de ensayos. Durante la prueba, se registraron la carga aplicada y el desplazamiento vertical de la probeta hasta su rotura o deformación permanente. Se utilizaron probetas con dimensiones normalizadas según las recomendaciones de Markforged para materiales metálicos fabricados por ADAM.

A partir del ensayo, se obtuvo:

- La carga máxima soportada antes de la rotura.

- La flecha máxima o deformación central.
- El módulo elástico en flexión, calculado en el tramo lineal de la curva carga-desplazamiento.
- El comportamiento dúctil o frágil de las piezas según el tipo de acero y su densidad.

En la Figura 4, se pueden observar las distintas fases por las que pasa la probeta sometida al ensayo a flexión.

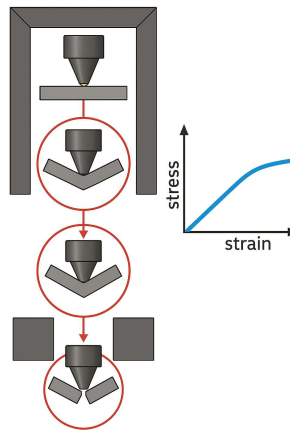


Figura 4. Fases del ensayo a flexión: deformación y rotura de la probeta.

2.6 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza Rockwell es un método ampliamente utilizado para determinar la dureza de materiales metálicos mediante la medición de la profundidad de una indentación producida por un indentador bajo condiciones controladas de carga y tiempo. Este ensayo es especialmente útil para caracterizar materiales duros y frágiles, como las aleaciones metálicas empleadas en fabricación aditiva.

A diferencia de otros métodos de dureza como Brinell, Vickers o Knoop, que requieren la medición óptica del tamaño o diámetro de la huella dejada por el indentador, el ensayo Rockwell basa su medición exclusivamente en la profundidad de la indentación. Esto permite un procedimiento más rápido, sencillo y automatizado, ideal para ensayos repetitivos y control de calidad en producción (ZwickRoell S.L., 2020).

El principio fundamental del ensayo Rockwell es que la profundidad de penetración del indentador está inversamente relacionada con la dureza del material: cuanto más profunda es la indentación, menor es la dureza. Para medir esto, el procedimiento consta de dos etapas principales de carga (Figura 5):

- Precarga o carga menor: Se aplica una carga inicial pequeña para asentar el indentador en la superficie de la muestra, minimizando la influencia de irregularidades superficiales, como rugosidades, oxidaciones o pequeñas imperfecciones. Esta etapa también ayuda a eliminar errores relacionados con el juego mecánico de la máquina.
- Carga principal: Se incrementa la carga hasta un valor preestablecido, manteniéndola durante un tiempo específico para permitir la deformación plástica de la superficie. Posteriormente, se retira esta carga principal, pero se mantiene la precarga, y se mide la profundidad residual de la indentación, que es la base para calcular el valor de dureza Rockwell. (ZwickRoell S.L., 2020).

Existen varias escalas dentro del ensayo Rockwell, que varían según el tipo de indentador (esfera de acero, cono de diamante) y las cargas aplicadas, permitiendo evaluar diferentes tipos de materiales y rangos de dureza. En este proyecto, se ha utilizado la escala más adecuada para aceros duros y aleaciones metálicas tratadas térmicamente.

El ensayo se realiza mediante un durómetro Rockwell, que consta de un indentador, un sistema de carga y un dispositivo de medición de desplazamiento muy preciso. Los resultados permiten obtener un valor numérico de dureza Rockwell (HR), que se correlaciona directamente con las propiedades mecánicas del material, como resistencia al desgaste, tenacidad y resistencia a la deformación plástica.

En el contexto de este proyecto, el ensayo de dureza Rockwell ha sido fundamental para evaluar el efecto de los diferentes parámetros de fabricación aditiva (orientación de impresión, tipo de acero, tratamiento térmico) sobre la dureza final de las probetas. De esta forma, se puede determinar la uniformidad y calidad del material producido, así como su aptitud para aplicaciones estructurales que requieren alta dureza y resistencia al desgaste.

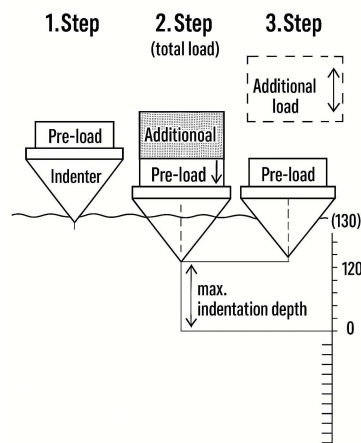


Figura 5. Pasos del ensayo de dureza Rockwell (ZwickRoell S.L., 2020).

2.7 Estado de la técnica

En este apartado se revisarán diversos estudios que abordan temáticas similares a la del presente Trabajo de Fin de Máster.

2.7.1 Fabricación aditiva metálica aplicada a aceros

En este apartado se recopilan y analizan diversos estudios recientes que abordan la fabricación aditiva de aceros, con especial énfasis en las tecnologías más utilizadas, como ADAM, SLM, DED y otras técnicas emergentes. El criterio seguido para la revisión se basa en seleccionar trabajos que aporten datos relevantes sobre las características de los aceros metálicos fabricados mediante estos procesos, considerando tanto variables de fabricación —como parámetros de impresión, orientación y diseño interno— como su influencia en las propiedades mecánicas y microestructurales. Este enfoque permite contextualizar el presente estudio dentro del estado actual de la investigación y resaltar las principales tendencias y retos en la fabricación aditiva metálica aplicada a aceros.

En 2021 se llevó a cabo la evaluación del comportamiento a flexión del acero 17-4PH fabricado mediante el proceso ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing), utilizando la impresora Markforged Metal X. Realizaron ensayos de flexión en tres puntos sobre probetas con distintas orientaciones de impresión en capas (Figura 6). De forma

notable, observaron que el comportamiento a flexión fue prácticamente independiente de la orientación de impresión, lo que contrasta con la sensibilidad que suelen presentar otros procesos aditivos, como SLM o PBF-LB. Estos resultados aportan una base comparativa importante para el presente trabajo, donde también se analiza el efecto de la orientación y otras variables de impresión sobre el comportamiento a flexión de materiales metálicos fabricados por ADAM. (Henry et al., 2021)

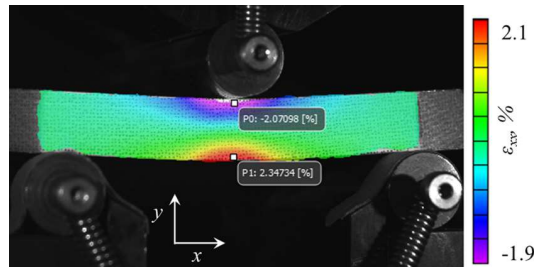


Figura 6. Datos del campo de deformación axial del ensayo de flexión (Henry et al., 2021).

Un estudio reciente investigó cómo el tipo de relleno (triangular y giroide) (Figura 7) y el espesor de la carcasa afectan la precisión dimensional, la rugosidad superficial y las propiedades mecánicas de muestras impresas mediante el proceso ADAM en acero inoxidable 17-4 PH. Se observó que el espesor de la carcasa influye significativamente en la resistencia a la tracción (hasta 1049,1 MPa) y en la dureza (290 HRB), debido al aumento de densidad del material y una mayor eficacia en la sinterización. Por el contrario, el tipo de relleno mostró efectos menores, aunque el patrón triangular logró una mayor resistencia, mientras que el giroide ofreció un mayor alargamiento. La rugosidad superficial y la precisión dimensional se mantuvieron estables entre configuraciones. El análisis microestructural reveló porosidad interna significativa, lo cual puede explicar la limitación de las propiedades mecánicas observadas. Este estudio resalta la importancia del diseño interno y los parámetros de impresión en la optimización de piezas ADAM metálicas (Basak et al., 2025a).

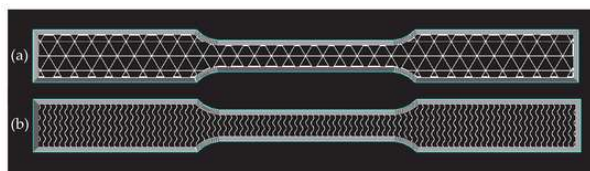


Figura 7. Patrón de relleno triangular (a) y giroide (b) (Basak et al., 2025b).

En este trabajo se analizó el impacto de distintas estrategias de deposición (Figura 8) en las propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante la tecnología ADAM, utilizando filamentos de acero inoxidable 17-4 PH. Los resultados mostraron que las propiedades mecánicas, especialmente en ensayos de tracción y fatiga, dependen fuertemente de la orientación de fabricación, destacándose un mejor desempeño en muestras con orientación horizontal. Además, se evaluó el efecto del post procesamiento mediante torneado, el cual no generó mejoras significativas en la resistencia a la tracción, pero sí tuvo un efecto positivo en la vida útil a fatiga, incrementándola entre dos y cuatro veces dentro del rango de tensiones ensayado. En general, las piezas presentaron propiedades comparables a las obtenidas mediante otras tecnologías más maduras de fabricación aditiva, lo que refuerza el potencial del proceso ADAM como alternativa viable en aplicaciones funcionales (Rodríguez et al., 2023).

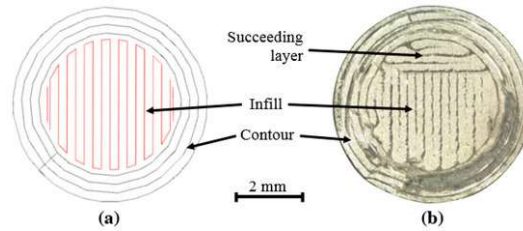


Figura 8. Estrategias de deposición de la etapa de impresión. (a) Capa teórica. (b) Imagen macroscópica de una capa de la pieza fabricada por ADAM (Rodríguez et al., 2023).

Este trabajo estudia cómo afectan el ángulo de orientación de impresión (0° , 45° y 90°) y el tratamiento térmico H900 a las propiedades mecánicas y la microestructura del acero inoxidable 17-4 PH impreso mediante inyección de aglutinante. Las muestras fueron ensayadas en condición sinterizada y tratada térmicamente, evaluando resistencia a la tracción (Figura 9), dureza y fractografía mediante microscopía electrónica y EDS. Los resultados muestran que el ángulo de impresión no influye significativamente en las propiedades mecánicas, mientras que el tratamiento térmico H900 mejora notablemente tanto la microestructura como el rendimiento mecánico de las piezas. Se observó una reducción en los defectos microscópicos y una mejor cohesión entre capas, lo que refuerza la viabilidad de este proceso para aplicaciones de herramientas rápidas donde se requiere alta resistencia mecánica (Bianchi et al., 2024).

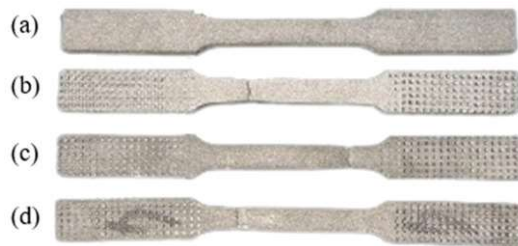


Figura 9. Probetas sinterizadas (a) antes y (b – d) después de los ensayos de tracción: (b) condiciones $D0^\circ$, (c) $D45^\circ$ y (d) $D90^\circ$ (Bianchi et al., 2024).

La deposición directa de energía (DED) es un proceso de fabricación aditiva ampliamente aceptado y una posible alternativa a los procesos de fabricación sustractiva gracias a su alta flexibilidad para la fabricación de nuevas piezas 3D (Figura 10). La DED permite la fabricación de piezas complejas sin necesidad de utilizar procesos convencionales costosos y laboriosos, a pesar de que los parámetros de construcción requieren una determinación precisa. En la presente investigación, se investigó el efecto de diferentes parámetros de proceso en las características geométricas, la calidad, la microestructura y la microdureza de pistas individuales de acero inoxidable 17-4 PH depositadas sobre un sustrato de acero inoxidable AISI 316L. Se seleccionaron cuatro conjuntos de parámetros de proceso, considerando diferentes valores de potencia láser, velocidad de escaneo y velocidad de alimentación de polvo, para la estrategia de fabricación. Las muestras extraídas de cada deposición de pista individual se analizaron mediante estereomicroscopía, microscopía óptica (OM), microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) y difracción de rayos X (DRX). Los resultados muestran que las características geométricas optimizadas de la pista, junto con las mejores propiedades microestructurales y de dureza, se obtuvieron con los valores más altos de la energía láser de entrada (Morales et al., 2023).



Figura 10. Robot láser ABB con 6 cabezales de boquilla utilizado para realizar el proceso DED (Morales et al., 2023).

Este estudio analiza el efecto de los parámetros tecnológicos del proceso SLM (Figura 11), específicamente la velocidad de escaneo y la potencia del láser, sobre la porosidad y la dureza del acero para herramientas AISI H13. Utilizando un diseño de experimentos (DOE) factorial completo, se fabricaron muestras cúbicas con distintas combinaciones de parámetros, y se evaluaron mediante ensayos metalográficos. Los resultados permitieron establecer un modelo fenomenológico para predecir comportamientos no ensayados. Se determinó que una densidad de energía mínima de $100,3 \text{ J/mm}^2$ es necesaria para alcanzar estructuras densas con una dureza satisfactoria. Este trabajo proporciona una herramienta útil para reducir el número de pruebas experimentales en futuras aplicaciones, y refuerza la importancia de una calibración precisa del haz láser y la estrategia de escaneo en el procesamiento SLM de aceros (Véle et al., 2021).

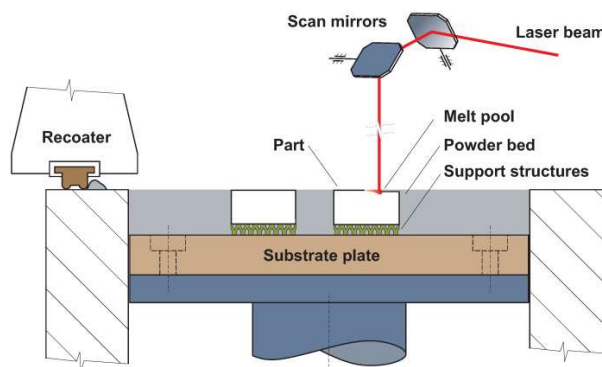


Figura 11. Principio básico de la tecnología SLM (Véle et al., 2021).

2.7.2 Propiedades mecánicas de aceros impresos en 3D

Este apartado se centra en la revisión de estudios que analizan las propiedades mecánicas obtenidas en aceros fabricados mediante diversas tecnologías de impresión 3D metálica. Se examinan aspectos clave como la resistencia a la tracción, dureza, tenacidad, resistencia a la fatiga y comportamiento bajo cargas específicas, considerando también el efecto de variables como la orientación de impresión, los tratamientos térmicos postprocesado y las condiciones de fabricación. El análisis permite identificar las limitaciones y potenciales de los aceros obtenidos mediante fabricación aditiva para aplicaciones estructurales y funcionales.

En el estudio realizado por Mower y Long, se compararon diversas aleaciones metálicas obtenidas mediante fabricación aditiva por lecho de polvo fundido por láser (PBF-LB) — específicamente acero inoxidable 316L, acero 17-4PH y titanio Ti6Al4V— con sus equivalentes fabricados por métodos convencionales. El objetivo fue analizar diferencias en propiedades mecánicas clave como el módulo elástico en flexión y la resistencia a fatiga por flexión, así como estudiar el efecto que tienen la orientación de impresión y los tratamientos térmicos de post-procesado sobre dichas propiedades. Los resultados mostraron que las probetas impresas presentan anisotropía mecánica significativa, especialmente cuando no se aplican tratamientos de normalización o envejecimiento. En particular, para el acero inoxidable 17-4PH, se observó una mejora sustancial en la resistencia a fatiga por flexión tras un tratamiento térmico adecuado, equiparando su comportamiento al del material forjado. Este trabajo demuestra que, si bien los materiales metálicos obtenidos mediante fabricación aditiva pueden presentar propiedades mecánicas inferiores en determinadas orientaciones de impresión, estas pueden optimizarse mediante procesos posteriores, permitiendo su utilización en aplicaciones estructurales exigentes (Mower & Long, 2016).

En este estudio se analiza experimentalmente la tenacidad, dureza y propiedades de impacto del acero para herramientas AISI H13 fabricado mediante fusión selectiva por láser (SLM). Este tipo de acero, habitual en aplicaciones de trabajo en caliente como moldes para la industria automotriz, fue sometido a ensayos mecánicos tras tratamientos térmicos postimpresión. Los resultados se compararon con los obtenidos en acero H13 laminado en caliente, con el fin de evaluar el rendimiento del material fabricado aditivamente frente al convencional. Se observó que el material procesado mediante SLM mostró un comportamiento más frágil, atribuible a la naturaleza del acero H13 y a las rápidas tasas de fusión y solidificación del proceso SLM. Este estudio subraya la importancia de considerar el comportamiento a impacto y tenacidad en materiales metálicos procesados por SLM, especialmente en aplicaciones sometidas a cargas elevadas (Ackermann et al., 2018).

Este estudio analiza el efecto del tipo de gas de protección (argón o nitrógeno) sobre las propiedades mecánicas del acero inoxidable 17-4 PH procesado mediante fusión por láser en lecho de polvo (L-PBF). A través de simulaciones numéricas, se evaluaron las diferencias térmicas en los entornos de construcción, como la temperatura media, el gradiente térmico y la velocidad de enfriamiento. Los resultados se correlacionaron con ensayos de tracción y microdureza realizados sobre las piezas fabricadas. Se demostró que el tipo de gas influye en el comportamiento térmico durante el proceso, lo que a su vez impacta en las características mecánicas finales. El argón, con menor conductividad térmica que el nitrógeno, generó diferencias notables en la solidificación, afectando la microestructura y la resistencia del material. Este trabajo subraya la importancia de controlar el entorno gaseoso en procesos L-PBF para garantizar resultados mecánicos consistentes en aceros inoxidables impresos (Dastranjy Nezhadfar et al., 2018).

Este estudio analiza el impacto del precalentamiento aplicado durante el proceso de fusión selectiva por láser (SLM) en las propiedades del acero para herramientas AISI H13, comúnmente utilizado en moldes y matrices de trabajo en caliente. Se realizaron análisis de fase y microestructura mediante difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB), así como ensayos de tracción a alta temperatura. Los resultados muestran que el precalentamiento mejora notablemente la homogeneidad microestructural y la resistencia mecánica: la resistencia a tracción aumentó de 1066 MPa a 1183 MPa y el alargamiento total de 5,7 % a 8,1 %. Aunque el alargamiento fue menor que en materiales H13 comerciales tratados, la resistencia fue superior, lo que demuestra

el potencial del precalentamiento como estrategia para optimizar piezas SLM sometidas a entornos térmicos exigentes (Wang et al., 2018).

2.7.3 Ensayos de flexión en aceros endurecidos o frágiles

En este apartado se recopilan y analizan estudios enfocados en la evaluación del comportamiento a flexión de aceros con características de alta dureza o fragilidad, tales como aceros para herramientas y aceros endurecidos. Se incluyen investigaciones que emplean ensayos de flexión por tres puntos y otras metodologías para determinar propiedades mecánicas críticas como el módulo de elasticidad, la resistencia a la flexión y la tenacidad, así como la influencia de la microestructura y los procesos de fabricación sobre el modo de fractura. Este análisis es fundamental para comprender el desempeño y las limitaciones de estos materiales bajo cargas de flexión, especialmente cuando son fabricados mediante tecnologías aditivas o procesos convencionales.

En 2024, García-Hernández realizó un análisis de flexión por tres puntos sobre probetas de acero 17-4PH fabricadas mediante tecnología SLM (Selective Laser Melting) y piezas fabricadas por deposición fundida de material (FFF). Sus resultados incluyen curvas de flexión y valores cuantitativos como el módulo de elasticidad y la resistencia a flexión. Para las probetas fabricadas por SLM, reportaron esfuerzos máximos a flexión de aproximadamente 2200 MPa, cifra cercana a los 2300 MPa obtenidos en el acero forjado convencional. No obstante, observaron que las probetas fabricadas por SLM experimentaron fracturas a deflexiones relativamente cortas (~3 mm), lo que indica un comportamiento frágil bajo flexión (Figura 12). Estos resultados son relevantes para el presente estudio, que también evalúa el comportamiento a flexión de aceros fabricados por técnicas aditivas, permitiendo comparar la influencia del método de fabricación sobre las propiedades mecánicas y el modo de fractura (García-Hernández et al., 2024)

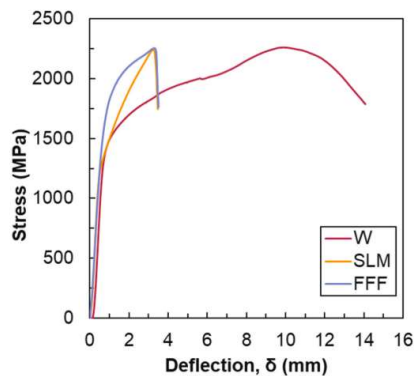


Figura 12. Curvas de flexión de 3 puntos para probetas forjadas, SLM y FFF (García-Hernández et al., 2024).

En 2021 se llevó a cabo una investigación del comportamiento a flexión del acero H13 (Figura 13) fabricado mediante la tecnología de fusión en lecho de polvo por láser (PBF-LB), centrándose en la influencia de la densidad energética del láser utilizada durante la fabricación. Observaron que las probetas impresas con una densidad energética de aproximadamente 400 J/mm³ presentaban una densidad relativa elevada y alcanzaban los mayores valores de esfuerzo de flexión. Por otro lado, con valores más altos (~600 J/mm³), se redujeron los defectos internos y se obtuvo una mayor deformación antes de la fractura, aunque con una ligera disminución en la resistencia. Los autores concluyeron que la resistencia a flexión del material está fuertemente condicionada por la microestructura generada durante el proceso, especialmente por la cantidad de austenita retenida y la porosidad. Estos hallazgos refuerzan la importancia de los parámetros de fabricación aditiva sobre el comportamiento mecánico, en línea con el objetivo del

presente TFM, que busca analizar la influencia de variables de impresión como la orientación y el patrón de relleno en el rendimiento a flexión de probetas metálicas impresas en 3D (Oliveira et al., 2021).

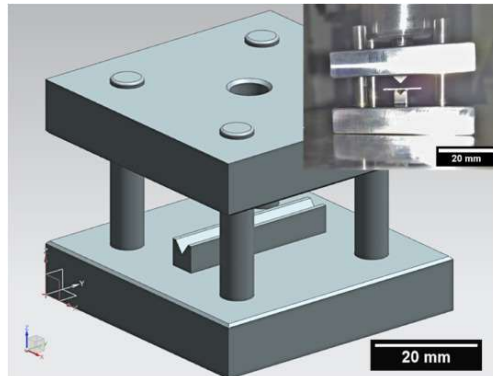


Figura 13. Representación esquemática del dispositivo utilizado para el ensayo de flexión en tres puntos (Oliveira et al., 2021).

Este estudio presenta los resultados de ensayos de fatiga por flexión realizados sobre engranajes fabricados mediante fusión láser en lecho de polvo (PBF-LB/M) utilizando acero inoxidable 17-4 PH. Las pruebas se llevaron a cabo mediante el método de fatiga por flexión de diente único (STBF) en un pulsador mecánico (Figura 14), y se analizaron los datos mediante dos enfoques estadísticos (Dixon y Little) para determinar el límite de fatiga. Los resultados obtenidos se compararon con los valores normativos ISO para aceros de características similares, mostrando un comportamiento competitivo. Además, se realizó caracterización microestructural por SEM para detectar defectos internos responsables de las fallas observadas. Este trabajo destaca la necesidad de generar datos experimentales específicos para componentes críticos fabricados aditivamente, y refuerza la importancia de validar el comportamiento en fatiga en aplicaciones funcionales reales (Concli et al., 2021).

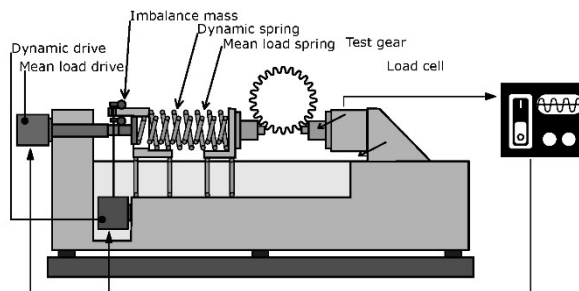


Figura 14. Esquema del pulsador mecánico (Concli et al., 2021).

2.7.4 Comparación entre tecnologías de impresión y resultados mecánicos

En esta sección se examinan estudios que comparan diversas tecnologías de fabricación aditiva metálica, tales como fusión selectiva por láser (SLM), deposición de energía dirigida (DED), electron beam melting (EBM) y otras técnicas emergentes. Se analiza cómo las diferencias en los procesos afectan la microestructura, la porosidad, la dureza, la resistencia mecánica y otros parámetros relevantes de los materiales fabricados. Este contraste permite identificar las ventajas y limitaciones específicas de cada tecnología en términos de calidad y comportamiento mecánico, proporcionando una visión global que facilita la selección del método más adecuado según la aplicación industrial o funcional deseada.

En el trabajo de Yang, se analizaron placas de aleación Ti-6Al-4V fabricadas mediante Electron Beam Melting (EBM), destinadas a aplicaciones clínicas ortopédicas (Figura 15). Estas se compararon con placas convencionales mecanizadas mediante ensayos de flexión en cuatro puntos. Los resultados mostraron que las placas fabricadas por EBM presentaban una rigidez aproximadamente un 87 % superior y una resistencia a flexión un 190 % mayor que las placas comerciales tradicionales. Este incremento significativo en el comportamiento mecánico se atribuyó a la estructura de grano fino y a la orientación favorable del material durante el proceso de fabricación aditiva. El estudio aporta evidencia sólida de que la fabricación aditiva metálica no solo iguala, sino que puede superar en rendimiento mecánico a procesos convencionales en determinadas condiciones de carga (Liu et al., 2014).



Figura 15. La placa LCP Ti-6Al-4V impresa por EBM (Liu et al., 2014).

El presente estudio compara la microestructura y las propiedades mecánicas del acero para herramientas H13 (Figura 16) fabricado mediante fusión selectiva por láser (SLM) y fusión por haz de electrones (EBM).

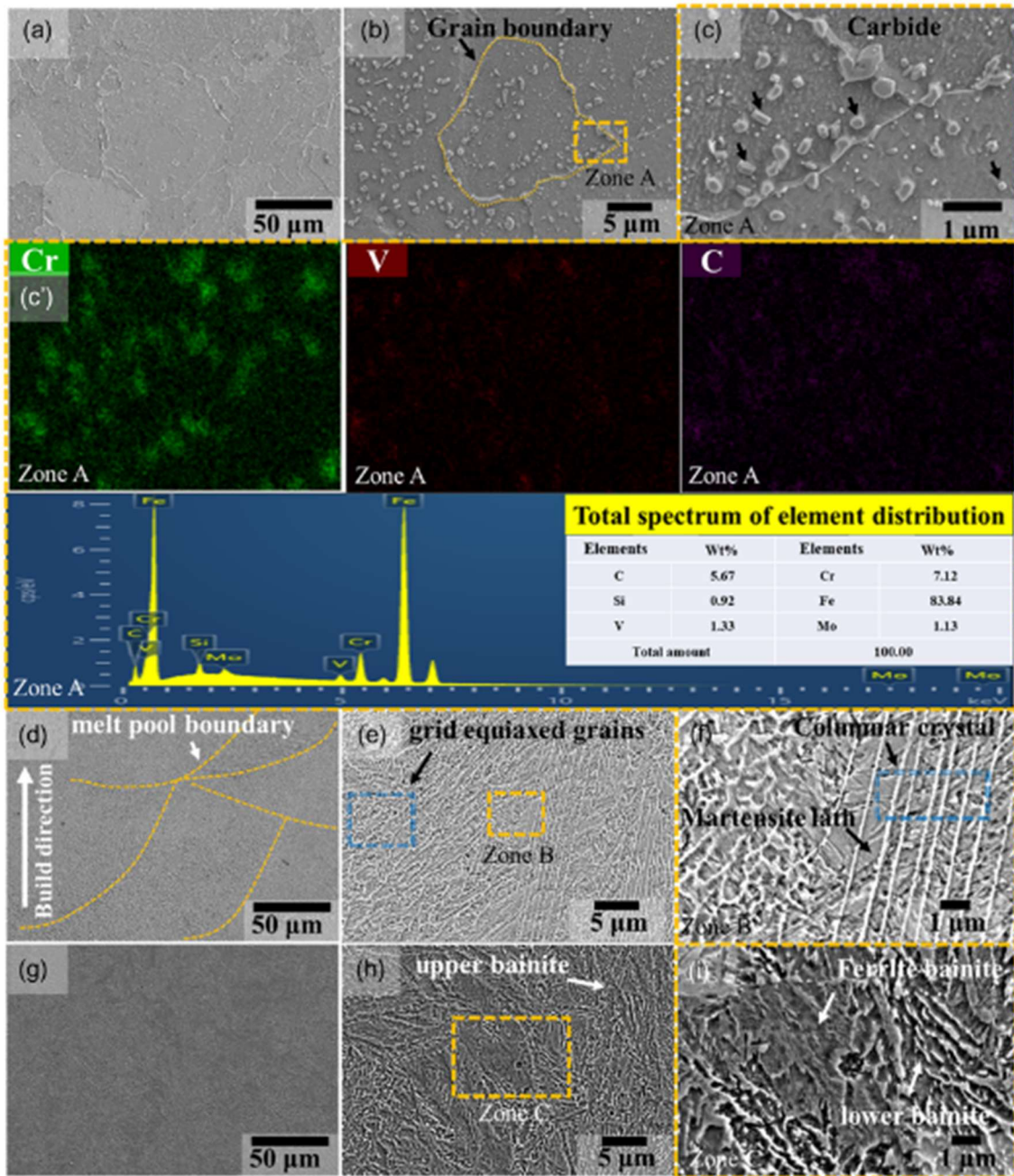


Figura 16. Microestructura de diferentes métodos de preparación del acero H13(Han et al., 2024).

El material producido por SLM mostró una microestructura más refinada, con martensita fina, austenita residual y carburos nanométricos, mientras que el obtenido por EBM presentó una microestructura más gruesa, dominada por fases bainíticas y ferríticas. En cuanto al comportamiento mecánico, el acero SLMed alcanzó mayor dureza (617,4 HV0,5), resistencia a la tracción (UTS: 1412,2 MPa) y límite elástico (1241,1 MPa), frente a los valores más bajos obtenidos por EBM. Además, SLM demostró mejor resistencia al desgaste, con menor profundidad y pista de desgaste, aunque con un coeficiente de fricción algo más elevado. Las diferencias en las pistas de desgaste, observadas mediante microscopía confocal, resaltan el efecto directo de la tecnología de fabricación sobre la respuesta tribológica del material (Han et al., 2024).

Este estudio evalúa las propiedades de fatiga térmica (TF) del acero para herramientas H13 fabricado mediante fusión selectiva por láser (SLM) (Figura 17) en estado de

suministro (As-SLMed), tratado térmicamente (T-SLMed) y forjado. Se realizaron ensayos cíclicos entre 650 °C y 30 °C simulando condiciones reales de trabajo en caliente, típicas en moldes de inyección o fundición. Los resultados mostraron que el H13 As-SLMed presentó la mayor resistencia a TF, con menor longitud de grieta total y la mayor dureza (687 ± 12 HV5), seguido por el T-SLMed, mientras que el H13 forjado mostró el peor desempeño. La superioridad del material SLM se atribuyó a su microestructura refinada, mayor cantidad de austenita retenida y subestructuras celulares típicas del proceso láser. Este estudio subraya el potencial del SLM para aplicaciones exigentes térmicamente, incluso sin requerir tratamientos térmicos adicionales (Wang et al., 2020).

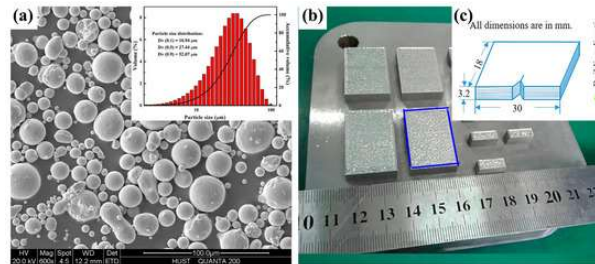


Figura 17. (a) Polvos para el proceso de fusión selectiva por láser (SLM). (b) Materiales a granel después del proceso SLM. (c) Perfil de las muestras para ensayos de fatiga térmica (TF) (Wang et al., 2020).

Este estudio compara tres tecnologías de fabricación aditiva aplicadas al acero inoxidable AISI 316L utilizando el mismo polvo metálico: deposición directa por láser (DLD), SLM con láser de fibra y SLM con láser de CO₂. Se analizaron propiedades mecánicas como dureza, resistencia a flexión (Figura 18) y deformación por fractura, así como la microestructura y porosidad generadas. Las muestras producidas por SLM con láser de fibra presentaron la mayor dureza, pero menor resistencia a flexión, mientras que el uso del láser de CO₂ mostró mayor resistencia en ciertas condiciones, pero con problemas de porosidad y falta de fusión. Las muestras DLD mostraron mayor deformación antes de fractura manteniendo una resistencia considerable. El análisis fractográfico permitió identificar los mecanismos de fractura, y los resultados se interpretaron en función de una metodología de parámetros normalizados. Este estudio demuestra la fuerte influencia del tipo de láser y del proceso AM en el desempeño mecánico final, incluso utilizando el mismo material base (Bedmar et al., 2021).

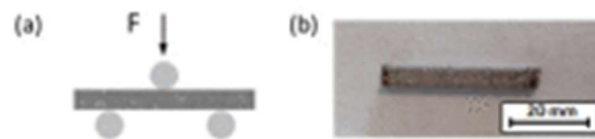


Figura 18. (a) Configuración de test de flexión de tres puntos; (b) muestra de flexión utilizada (Bedmar et al., 2021).

2.7.5 Avances en la fabricación aditiva de estructuras metálicas multifuncionales

En este apartado se revisan los desarrollos recientes en la fabricación aditiva orientados a la creación de estructuras metálicas multifuncionales, que combinan diversas propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas o químicas en un solo componente. Se analizan innovaciones en técnicas de impresión que permiten la integración de materiales distintos, el diseño de geometrías complejas con funcionalidades mejoradas, y el uso de procesos avanzados para optimizar interfaces y microestructuras. Estos avances potencian aplicaciones en sectores como el aeroespacial, defensa, automoción y energía, donde la multifuncionalidad y la eficiencia de los materiales son cada vez más demandadas.

Este estudio investiga la viabilidad de fabricar estructuras bimetálicas compuestas por acero inoxidable 17-4 PH y acero para herramientas D2 mediante el proceso ADAM con el equipo Metal X de Markforged. Las muestras cilíndricas se imprimieron por capas y se procesaron en orientación vertical para optimizar la interfaz de unión entre materiales, seguidas de los procesos de desaglomerado y sinterización. Se evaluaron propiedades como densidad (logrando un 95,4%), microestructura (SEM/EDS/MAP), dureza y fase cristalina (DRX). Los resultados mostraron una buena compatibilidad entre ambos materiales, sin evidencias significativas de delaminación o defectos críticos en la interfaz. Este trabajo demuestra la capacidad de la tecnología ADAM para producir componentes metálicos híbridos con potencial en aplicaciones funcionales de alto rendimiento en sectores como defensa, aeroespacial y automoción (Taşcı, 2025).

Este estudio analiza las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316L producido mediante extrusión de material (ME), una técnica de fabricación aditiva metálica que utiliza una mezcla de polvos metálicos sinterizables y un sistema aglutinante multicomponente. A diferencia de tecnologías como la fusión por lecho de polvo o la deposición de energía dirigida, ME representa una alternativa más económica y de menor consumo energético. Las muestras fabricadas mostraron una resistencia máxima a la tracción de $426,6 \pm 23,7$ MPa (Figura 19) y un alargamiento del 36 %, además de un comportamiento simétrico en tracción y compresión (150 MPa de límite elástico en ambos casos). Las pruebas de dureza Rockwell B y Vickers confirmaron la homogeneidad del material, y el análisis DRX evidenció una estructura cristalográfica coherente con el acero monolítico. Se concluye que la ME metálica es adecuada para fabricar piezas no estructurales con geometrías complejas, manteniendo buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, lo que la hace viable para aplicaciones como instrumental médico, tanques químicos o intercambiadores de calor (Carminati et al., 2022).

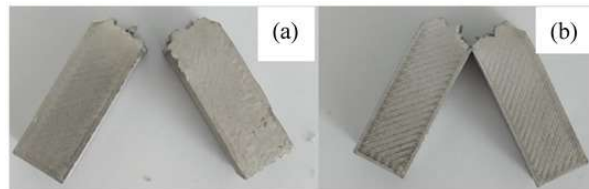


Figura 19. Muestras con fractura completa (a), muestras con fractura parcial (b) (Carminati et al., 2022).

Este estudio, desarrollado por ORNL y Carpenter, analiza el comportamiento del acero para herramientas H13 procesado mediante fabricación aditiva por chorro de aglutinante (Binder Jetting), enfocándose en el efecto de distintas distribuciones de tamaño de polvo metálico. Se observó que el tamaño de partícula influye directamente en los parámetros de deposición y en la eficiencia de sinterización, un aspecto crítico para lograr piezas densas y funcionales. También se identificó que la captación de carbono durante la sinterización depende principalmente de la atmósfera y la temperatura de eliminación del aglutinante. A pesar de estas variaciones en el proceso, no se encontraron diferencias significativas en la evolución microestructural del H13 en función del tamaño de partícula. Este trabajo destaca el potencial del Binder Jetting como técnica económica para fabricar herramientas metálicas con geometrías complejas, aunque la optimización del proceso de sinterización sigue siendo un desafío clave para lograr componentes funcionales (Nandwana, 2020).

Tras el análisis de los antecedentes y referencias técnicas revisadas, y basándose en las principales ideas extraídas de dichos estudios, este trabajo tiene como objetivo principal la caracterización del comportamiento a flexión de probetas metálicas fabricadas

mediante tecnologías de fabricación aditiva. En concreto, se emplea la impresora Markforged Metal X, utilizando aleaciones metálicas como A2, H13 y 17-4 PH.

El proyecto se centra en evaluar cómo influyen variables como la orientación de impresión y el patrón de relleno en las propiedades mecánicas de las piezas, empleando ensayos de flexión por tres puntos según la norma ISO 3327:2009. Además, se complementa el estudio con ensayos de dureza Rockwell para obtener una visión más completa del rendimiento mecánico de las muestras producidas.

Para facilitar la comparación entre los estudios analizados y ofrecer una visión estructurada de los enfoques previos, se han incluido las siguientes tablas, las cuales recogen los aspectos más relevantes de cada trabajo en relación con el presente estudio.

Tabla 4. Fabricación aditiva metálica aplicada a aceros (Elaboración propia).

| AUTOR/ AÑO | ALEACIÓN | TECNOLOGÍA AM | TIPO DE ENSAYO | VARIABLES ESTUDIADAS | RESULTADOS CLAVE | APLICACIÓN |
|---------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|---|--|--|
| Henry et al., 2021 | 17-4 PH | ADAM | Flexión 3 puntos | Orientación de impresión | Comportamiento a flexión independiente de la orientación | ADAM competitivo frente a otras tecnologías |
| Basak et al., 2025a, b | 17-4 PH | ADAM | Tracción, dureza | Tipo de relleno y espesor de carcasa | Mayor resistencia con mayor carcasa; giroide mejora alargamiento | Optimización geométrica en piezas ADAM |
| Rodríguez et al., 2023 | 17-4 PH | ADAM | Tracción, fatiga | Estrategias de deposición y postprocesado | Mejor desempeño horizontal; torneado mejora la fatiga | ADAM viable para piezas funcionales |
| Bianchi et al., 2024 | 17-4 PH | Inyección de aglutinante | Tracción, dureza | Orientación + tratamiento térmico H900 | H900 mejora significativamente propiedades y microestructura | Apto para herramientas rápidas |
| Morales et al., 2023 | 17-4 PH / 316L | DED | Dureza, microestructura | Parámetros del proceso | Mejores propiedades con mayor energía láser | Optimización de DED mediante ajuste de parámetros |
| Véle et al., 2021 | H13 | SLM | Dureza, porosidad | Velocidad y potencia del láser | Energía mínima de 100,3 J/mm ² para buena densidad | Modelo útil para predecir condiciones óptimas de SLM |

Tabla 5. Propiedades mecánicas de aceros impresos en 3D (Elaboración propia).

| AUTOR/ AÑO | ALEACIÓN | TECNOLOGÍA AM | TIPO DE ENSAYO | VARIABLES ESTUDIADAS | RESULTADOS CLAVE | APLICACIÓN |
|--|---------------------------|------------------|---|--|--|--|
| Mower & Long, 2016 | 17-4 PH, 316L, Ti6Al4V | PBF-LB | Fatiga, módulo elástico | Orientación + tratamiento térmico | Tratamientos mejoran propiedades equiparándolas al forjado | Viabilidad estructural tras post-procesado |
| Ackermann et al., 2018 | H13 | SLM | Tenacidad, impacto | Comparación con H13 convencional | Material SLM más frágil y con menor tenacidad | Relevancia de tenacidad en SLM para trabajo en caliente |
| Dastranjy Nezhadfar et al., 2018 | 17-4 PH | L-PBF | Tracción, microdureza, simulaciones | Gas de protección (Ar vs N ₂) | Argón cambia solidificación y microestructura | Control de entorno gaseoso para consistencia mecánica |
| Wang et al., 2018 | H13 | SLM | Tracción alta T ^o , microestructura | Pre calentamiento durante fabricación | Pre calentado mejora resistencia y microestructura | Clave para moldes y piezas expuestas a calor |

Tabla 6. Ensayos de flexión en aceros endurecidos o frágiles (Elaboración propia).

| AUTOR/ AÑO | ALEACIÓN | TECNOLOGÍA AM | TIPO DE ENSAYO | VARIABLES ESTUDIADAS | RESULTADOS CLAVE | APLICACIÓN |
|--------------------------------------|----------|------------------|-----------------------|--|---|---|
| García- Hernández et al., 2024 | 17-4 PH | SLM y FFF | Flexión 3 puntos | Comparativa con forja | SLM alta resistencia, pero fractura frágil | Comparación directa SLM, FFF y convencional |
| Oliveira et al., 2021 | H13 | PBF-LB | Flexión | Densidad energética | Mayor densidad reduce defectos; microestructura crítica | Mejora con control energético |
| Concli et al., 2021 | 17-4 PH | PBF-LB/M | Fatiga por flexión | Carga cíclica + fractografía SEM | Límite de fatiga competitivo, defectos internos identificados | Validación para piezas críticas |

Tabla 7. Comparación entre tecnologías de impresión y resultados mecánicos (Elaboración propia)

| AUTOR/ AÑO | ALEACIÓN | TECNOLOGÍA AM | TIPO DE ENSAYO | VARIABLES ESTUDIADAS | RESULTADOS CLAVE | APLICACIÓN |
|------------------------|----------|--|----------------------------------|---|--|---|
| Liu et al., 2014 | Ti6Al4V | EBM | Flexión 4 puntos | Comparativa con piezas convencionales | Rigidez +87%, resistencia +190% frente a mecanizado | Fabricación superior en implantes ortopédicos |
| Han et al., 2024 | H13 | SLM vs EBM | Tracción, desgaste, dureza | Tecnología de fabricación | SLM mejor dureza y resistencia que EBM | Influencia directa de tecnología sobre tribología |
| Wang et al., 2020 | H13 | SLM vs forjado | Fatiga térmica | Tratamiento y microestructura | SLM sin tratamiento supera a forjado | Apto para moldes de fundición e inyección |
| Bedmar et al., 2021 | 316L | DLD, SLM (fibra y CO ₂) | Dureza, flexión, fractura | Tipo de láser y estrategia | DLD más ductilidad; CO ₂ más resistencia en ciertas condiciones | Comparación completa entre tecnologías |

Tabla 8. Avances en la fabricación aditiva de estructuras metálicas multifuncionales (Elaboración propia).

| AUTOR/ AÑO | ALEACIÓN | TECNOLOGÍA AM | TIPO DE ENSAYO | VARIABLES ESTUDIADAS | RESULTADOS CLAVE | APLICACIÓN |
|---------------------------|--------------|------------------|---|---|---|--|
| Taşcı, 2025 | 17-4 PH + D2 | ADAM | Densidad, dureza, SEM, DRX | Compatibilidad entre materiales | Densidad 95,4%; buena unión sin delaminación | Piezas híbridas para defensa, aeroespacial y automoción |
| Carminati et al., 2022 | 316L | ME | Tracción, compresión, dureza, DRX | Comportamiento mecánico completo | Buen alargamiento y resistencia simétrica | ME viable para piezas no estructurales complejas |
| Nandwana, 2020 | H13 | Binder Jetting | Sinterización, microestructura | Tamaño de partícula, captación carbono | Captación carbono depende de atmósfera; sin diferencias estructurales notables | Binder Jetting prometedor, depende del postproceso |

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Probetas

3.1.1. Identificación

Para la realización de este estudio, se fabricaron un total de 45 probetas metálicas con geometría de prisma rectangular ($5 \times 5 \times 35$ mm), con las aristas longitudinales achaflanadas, conforme a la norma ISO 3327:2009. La selección de esta norma se justifica a partir de los ensayos preliminares realizados sobre los posibles materiales seleccionados para el estudio, los cuales permitieron comprobar el carácter frágil del comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante tecnologías de fabricación aditiva metálica. Como resultado de dicha evaluación, se seleccionaron tres materiales: acero A2, acero H13 y acero inoxidable 17-4 PH, por presentar un comportamiento frágil y adecuado para el análisis comparativo propuesto.

La Figura 20 muestra el modelo CAD de la probeta diseñado en SolidWorks, que sirvió como base para la fabricación aditiva mediante tecnología ADAM. Esta geometría responde a las recomendaciones de la norma ISO 3327:2009 y se ajusta a las condiciones de impresión impuestas por el sistema.

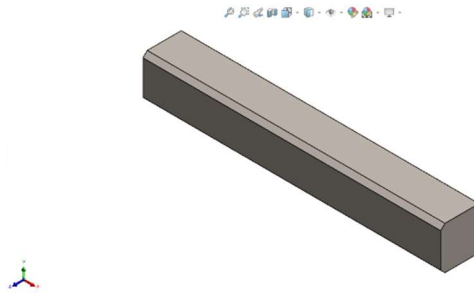


Figura 20. Modelo 3D de la probeta diseñado en SolidWorks conforme a la norma ISO 3327:2009 (Elaboración propia).

Las probetas se obtuvieron mediante tecnología ADAM con la impresora Markforged Metal X (Markforged Inc., Watertown, EE.UU.), clasificándolas en nueve grupos de cinco unidades cada uno. La agrupación responde a la combinación de tres variables principales del estudio: el material utilizado (acero A2, H13 y 17-4 PH), el patrón de relleno interno (sólido, triangular y gyroid) y la orientación de impresión (horizontal normal, horizontal lateral y a 45°). Cada probeta se identificó con un código alfanumérico único y se numeró del 1 al 5 dentro de cada grupo, garantizando la trazabilidad de los resultados durante todas las fases del análisis.

Dado que la combinación total de variables posibles asciende a 27 ($3 \times 3 \times 3$), se optó por reducir la carga experimental recurriendo a un diseño de tipo Taguchi, basado en una matriz ortogonal de 9 combinaciones, complementado con el enfoque de un Cuadrado Latino. Esta metodología permite cubrir de forma eficiente todas las variables sin necesidad de realizar las 27 combinaciones posibles, manteniendo un equilibrio en la representación de los niveles de cada factor. Así, se obtuvo un conjunto de 9 configuraciones representativas, que fueron replicadas cinco veces cada una, dando lugar al total de 45 probetas.

En la Figura 21, se presenta el conjunto de probetas en las diferentes fases del proceso: antes del sinterizado, durante su colocación en el horno, y tras completar el ciclo térmico. Durante esta etapa, las piezas experimentan una contracción controlada debida a la pérdida de aglutinantes, lo que permite incrementar la densidad del metal y alcanzar las dimensiones finales definidas en el diseño CAD.

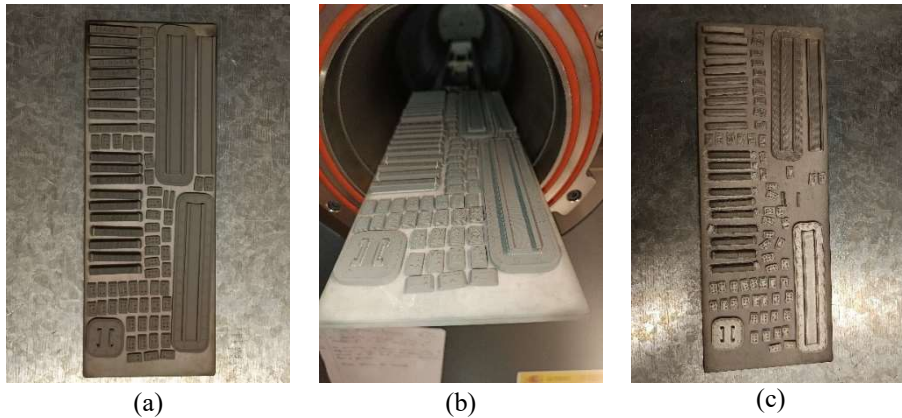


Figura 21. (a) Conjunto de probetas impresas antes del sinterizado, (b) Probetas dispuestas en bandeja cerámica justo antes de entrar al horno Sinter-2 y (c) Probetas tras el proceso de sinterizado (Elaboración propia).

Además, se observa un cambio notable en el aspecto superficial: antes del sinterizado, las probetas presentan un acabado gris mate oscuro, mientras que tras el tratamiento térmico adquieren un aspecto metálico más brillante con tonalidad gris claro, característico del acero sinterizado. Cabe señalar que, con el objetivo de optimizar la carga del horno, junto a las 45 probetas de este estudio también se introdujeron otras piezas no relacionadas con el trabajo, únicamente para completar al máximo su capacidad.

En la Tabla 9, se muestra la clasificación de las probetas utilizadas en el proyecto.

Tabla 9. Clasificación de las probetas utilizadas en el proyecto.

| GRUPO | MATERIAL | RELLENO | ORIENTACIÓN | PROBETAS |
|-------|----------|------------|-------------|----------|
| 1 | H13 | SOLID | H-NORMAL | 1-5 |
| 2 | H13 | TRIANGULAR | H-LATERAL | 1-5 |
| 3 | H13 | GYROID | 45- DEG | 1-5 |
| 4 | A2 | SOLID | H-LATERAL | 1-5 |
| 5 | A2 | TRIANGULAR | 45-DEG | 1-5 |
| 6 | A2 | GYROID | H-NORMAL | 1-5 |
| 7 | 17-4 PH | SOLID | 45-DEG | 1-5 |
| 8 | 17-4 PH | TRIANGULAR | H-NORMAL | 1-5 |
| 9 | 17-4 PH | GYROID | H-LATERAL | 1-5 |

Los sustratos se han dividido en nueve grupos con distintas configuraciones. Los tres primeros grupos corresponden al acero H13, mientras que los tres siguientes están fabricados con acero A2 y los tres últimos son de acero 17-4 PH.

En cuanto a los rellenos, se han empleado tres tipos: sólido (Solid), triangular (Triangular) y en forma de giroide (Gyroid), distribuidos de manera que cada conjunto de tres grupos incluye los tres tipos de relleno. En la Figura 22, se ilustran visualmente estos patrones de relleno empleados en la fabricación de las probetas.

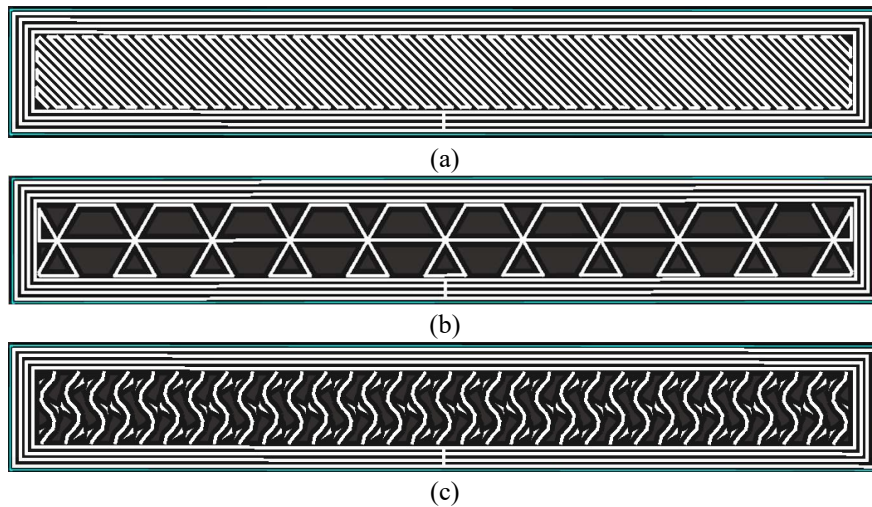


Figura 22. Tipos de relleno usados en este trabajo: (a) Solid, (b) Triangular y (c) Gyroid (Elaboración propia).

Por último, cabe destacar que cada grupo combina una orientación de impresión distinta H-NORMAL, que corresponde a la posición de impresión original; H-LATERAL en la que la probeta se gira 90 grados con respecto a la posición normal sobre la arista longitudinal; y 45-DEG, donde la probeta se realiza con una inclinación de 45 grados con respecto a la horizontal (Figura 23).

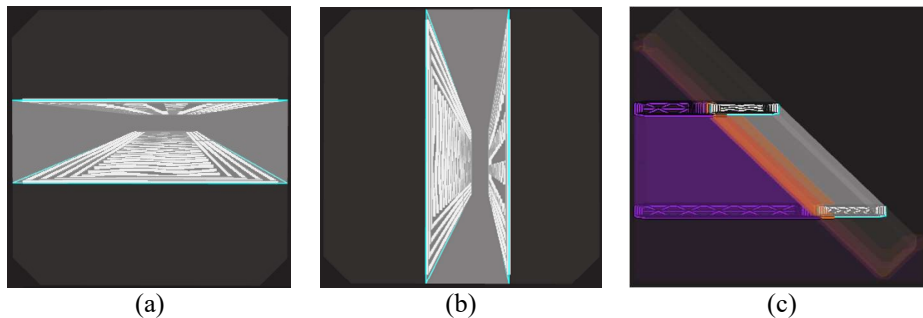


Figura 23. Representación gráfica de las tres orientaciones de impresión (a) Horizontal normal, (b) Horizontal lateral y (c) 45 grados (Elaboración propia).

Para facilitar la correcta trazabilidad y organización de las probetas, se han establecido unos patrones de nomenclatura que consiste en identificarlas mediante la primera inicial de cada una de las tres variables del presente estudio en el siguiente orden:

- Material: H (H13), A (A2) o 17-4 (17-4PH).
- Relleno: S (Solid), T (Triangular) o G (Gyroid).
- Orientación: HN (Horizontal-Normal), HL (Horizontal-Lateral) o 45 (Inclinación 45°).
- Número: del 1 al 5, correspondiente a la unidad dentro del grupo.

En la Figura 24, podemos ver perfectamente la identificación de la probeta con el sistema de nomenclatura que he descrito anteriormente: HTHL3 (H13, relleno Triangular, Horizontal Lateral, unidad 3).

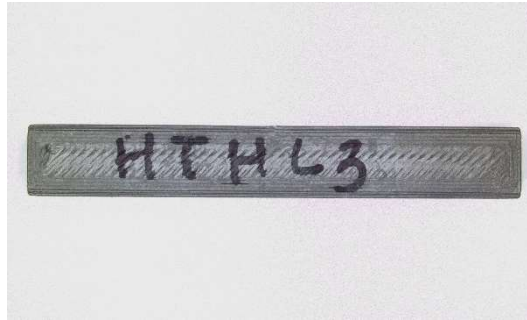


Figura 24. Ejemplo de probeta con nomenclatura identificativa (Elaboración propia).

Esta división en grupos y configuraciones permitirá evaluar y comparar el efecto de variables como el material, el patrón de relleno y la orientación de impresión sobre el comportamiento a flexión de las probetas metálicas fabricadas mediante fabricación aditiva.

3.1.2. Caracterización

Además de la identificación y clasificación de las probetas, se llevó a cabo la caracterización de estas tanto de manera dimensional como superficial, con el fin de evaluar si se cumplen las tolerancias de la norma ISO 3327:2009 para realizar los ensayos mecánicos correspondientes.

3.1.2.1 Caracterización dimensional

En primer lugar, se procedió a medir las dimensiones de las probetas utilizando un microscopio óptico con sistema de medición integrado. Se verificaron las tres cotas principales de cada probeta (longitud, anchura y altura) reiterando en varios puntos de la probeta comprobando así la precisión del proceso de fabricación aditiva. Los valores obtenidos se comparan con las dimensiones teóricas establecidas por la norma ISO 3327:2009 para probetas de tipo A, recogidas en la Tabla 10 (AENOR, 2010).

Tabla 10. Medidas principales de las probetas ISO 3327:2009 (Elaboración propia).

| TIPO | LONGITUD (mm) | ANCHURA (mm) | ALTURA (mm) |
|------|---------------|----------------|-----------------|
| A | 35 ± 1 | $5 \pm 0,25$ | $5 \pm 0,25$ |
| B | 20 ± 1 | $6,5 \pm 0,25$ | $5,25 \pm 0,25$ |
| C | 25 ± 5 | $3,3 \pm 0,5$ | – |

Con el fin de representar las dimensiones teóricas de referencia y facilitar la comprensión de las mediciones realizadas, se ha elaborado un croquis técnico (Figura 25) de la probeta tipo A conforme a la norma ISO 3327:2009. Esta representación, generada a partir del diseño original en SolidWorks, muestra las cotas principales: longitud, anchura y altura, que posteriormente se han verificado experimentalmente mediante el microscopio digital.

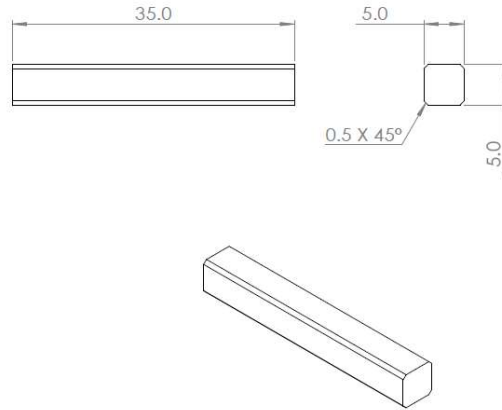


Figura 25. Croquis técnico de la probeta tipo A creado en SolidWorks, con las dimensiones nominales según la norma ISO 3327:2009 (Elaboración propia).

En la Figura 26, se pueden observar las distintas dimensiones de una de las probetas ensayada en este proyecto. Las mediciones fueron realizadas con el microscopio digital Leica DVM6, que permite capturar imágenes de alta resolución y tomar medidas sobre ellas con alta precisión.

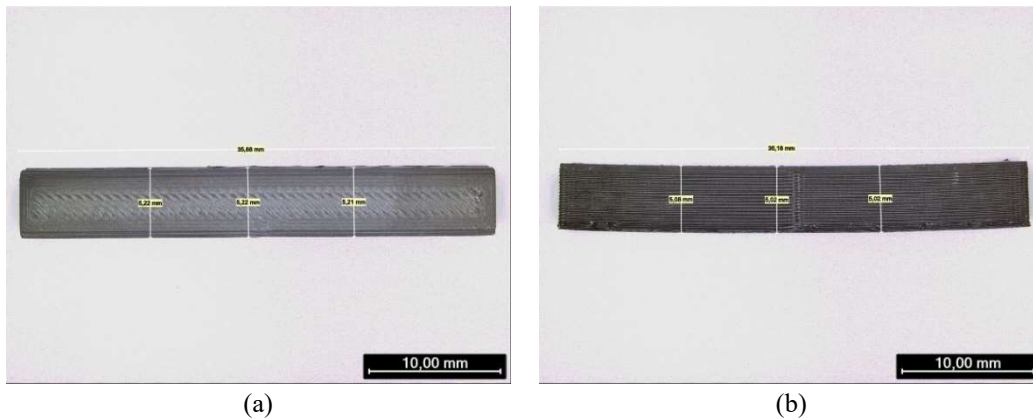


Figura 26. Dimensiones principales de una probeta mediante microscopio DVM6: (a) Vista de planta y (b) Vista de alzado (Elaboración Propia).

Además de las cotas principales, también se comprobaron las dimensiones del chaflán de las aristas longitudinales. Para ello, se capturaron imágenes de perfil de la probeta, lo que permitió medir con precisión los chaflanes y confirmar que cumplen con las especificaciones establecidas por la norma ISO 3327:2009 (Tabla 11).

Tabla 11. Medidas del chaflán de las probetas ISO 3327:2009.

| TIPO DE PROBETA | CHAFLÁN (mm) |
|-----------------|--------------|
| A | 0,4 a 0,5 |
| A | 0,15 a 0,2 |
| B | 0,4 a 0,5 |
| B | 0,15 a 0,2 |

En la Figura 27, se muestran las distintas dimensiones del chaflán de una de las probetas ensayada en este proyecto.

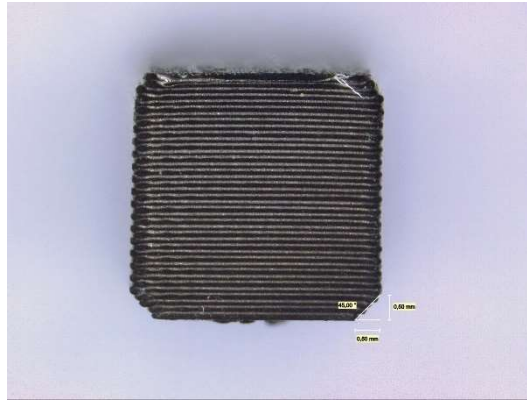


Figura 27. Dimensiones del chaflán de una probeta mediante microscopio DVM6 (Elaboración propia).

3.1.2.2 Caracterización superficial

La evaluación de la rugosidad superficial se llevó a cabo mediante el rugosímetro portátil con palpador extraíble SJ-201 (Mitutoyo Corporation, Kawasaki-Shi, Japón) se muestra en la Figura 28, siguiendo las especificaciones establecidas por la norma ISO 4287. En cada probeta se realizaron dos reiteraciones sobre la cara superior, con el objetivo de obtener valores representativos de la superficie generada mediante fabricación aditiva. Se recogen tres parámetros fundamentales de rugosidad:

- Ra: rugosidad media aritmética, que representa el promedio absoluto de las desviaciones respecto a la línea media.
- Rz: rugosidad cuadrática media, que proporciona una medida más sensible a los picos y valles.
- Rq: rugosidad máxima, calculada como la diferencia entre el pico más alto y el valle más profundo dentro del área de medición.



Figura 28. Medida de rugosidad superficial (Elaboración propia).

La caracterización previa de las probetas permitió verificar que todas las muestras seleccionadas cumplían tanto con los requisitos dimensionales como de acabado superficial, garantizando así la validez y repetibilidad de los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos.

3.2 Tecnología de fabricación aditiva utilizada: ADAM con impresora Markforged Metal X

La fabricación de las probetas objeto de este estudio se llevó a cabo mediante la tecnología ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing), empleando una impresora Markforged Metal X ubicada en el laboratorio de fabricación aditiva de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga. Este sistema se basa en la extrusión

de un filamento compuesto por polvo metálico, una cera y un aglutinante polimérico. Tras la impresión de la geometría deseada, las piezas pasan por dos etapas adicionales: un lavado químico para eliminar parcialmente el aglutinante, y un posterior sinterizado térmico en horno, donde el metal se densifica y alcanza su forma final.

La preparación de las trayectorias de impresión se realizó mediante el software Eiger, desarrollado por Markforged. Este entorno permite configurar parámetros como el material, el tipo de relleno, la orientación de impresión y las características de soporte. En la Figura 29, se muestra una captura del entorno de trabajo de Eiger con la disposición de una de las probetas empleadas.

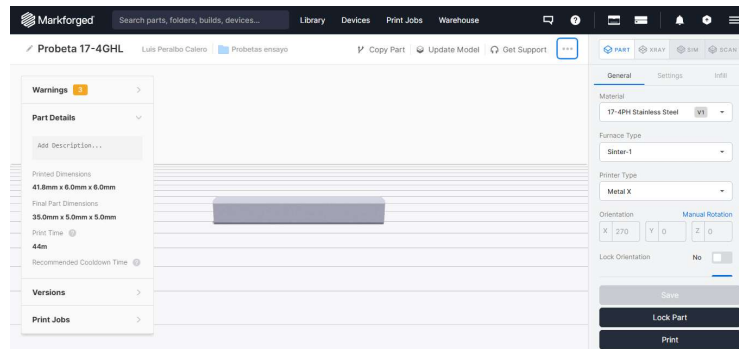


Figura 29. Captura del software Eiger con la configuración de una probeta (Elaboración propia).

Durante el proceso de planificación, se observó que las probetas orientadas a 45° respecto al plano de impresión presentaban problemas de estabilidad durante la fabricación. Inicialmente, se consideró que no sería necesario añadir estructuras de soporte, pero en la práctica, al comenzar la impresión, las capas superiores se desplazaban o colapsaban parcialmente, provocando fallos en las piezas. La Figura 30 muestra una imagen de una probeta malformada debido a la falta de soporte.

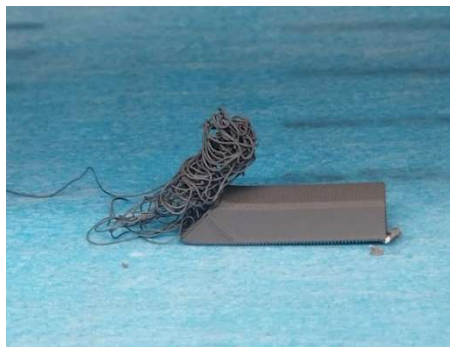


Figura 30. Probeta con fallo de impresión por falta de soporte en orientación a 45° (Elaboración propia).

Finalmente, se optó por incorporar soportes adicionales en estas configuraciones para garantizar la correcta deposición de material, tal y como se observa en la Figura 31, donde se representan los soportes añadidos específicamente para las probetas a 45° .



Figura 31. Soportes añadidos en probetas con orientación a 45° (Elaboración propia).

La fabricación de todas las piezas se realizó con la impresora Metal X (Figura 32), utilizando bobinas de filamento metálico específicas para cada tipo de acero.



Figura 32. Impresora 3D Markforged Metal X (Elaboración propia).

Una vez impresas, las probetas se sometieron a un proceso de lavado en la estación Wash-1, cuyo aspecto se muestra en la Figura 33. Este equipo emplea un disolvente para eliminar parte del aglutinante polimérico de forma controlada.

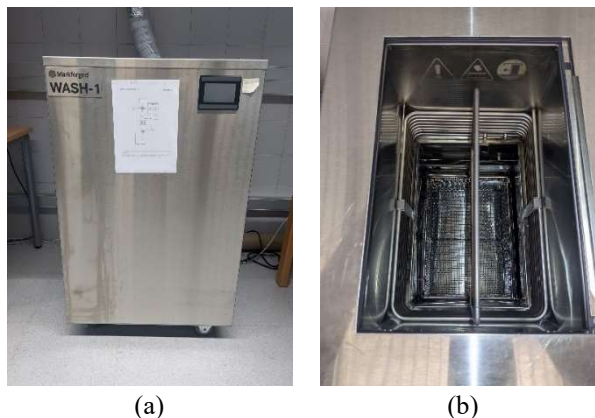


Figura 33. (a) Estación de lavado Wash-1 (b) Interior de la estación de lavado (Elaboración propia).

Posteriormente, las piezas fueron introducidas en el horno de sinterizado Sinter-2 (Figura 34), donde, mediante una atmósfera inerte controlada, se logró la compactación del polvo metálico hasta obtener la geometría final.

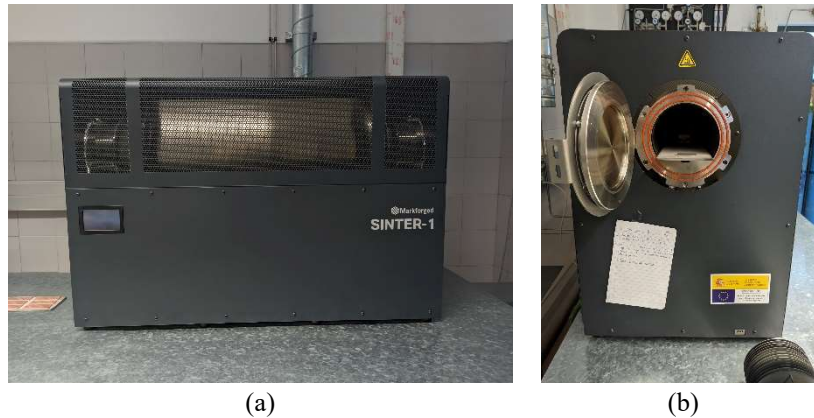


Figura 34. Vista frontal (a) y lateral (b) del horno de sinterizado utilizado para el tratamiento térmico de las piezas fabricadas mediante tecnología ADAM (Elaboración propia).

El horno está alimentado por una instalación de gas inerte (habitualmente argón), cuya infraestructura puede verse en la Figura 35, imprescindible para garantizar una correcta sinterización sin oxidación del material.



Figura 35. Instalación de gas inerte conectada al horno (Elaboración propia).

Las características de impresión de las probetas fabricadas por la Universidad de Málaga son las siguientes:

- Diámetro boquilla: 0,4 mm.
- Altura de capa: 0,125 mm.
- Capas superiores e inferiores: 4 (100% relleno).
- Capas laterales: 4 (100% relleno).
- Tipo de relleno: Triangular/ Gyroid/ Solid.
- Sin Raft (base de adhesión a cama de impresión).
- Dimensiones finales (tras sinterizado): 35 x 5 x 5 (mm).
- Tiempo de impresión (unidad): 1h 30 min.
- Tiempo de lavado (unidad): 4 h.
- Tiempo de secado (unidad): 1 h.
- Tiempo de sinterizado (ciclo): 30 - 40 h (dependiendo del material)
- Peso pieza: 4,21 g

- Volumen pieza: 1 cm³.
- Soporte adicional: Incluido únicamente en las probetas inclinadas a 45°.

De este modo, quedaron establecidas las condiciones de fabricación para todas las probetas analizadas.

3.3 Equipos para ensayos

3.3.1 Máquina universal de ensayos Servosis ME-402

El equipo con el que se ha realizado el ensayo de flexión por tres puntos es fundamental en el desarrollo de este proyecto, ya que permite evaluar la resistencia de las probetas metálicas hasta el punto de rotura. Para ello, se utilizó la máquina universal de ensayos ME-402 (Servosis S.L., Madrid, España) (Figura 36), instalada en el Departamento de Mecánica en un laboratorio del área de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Córdoba.



Figura 36. Máquina universal de ensayos Servosis ME-402 (Elaboración propia).

Este equipo permite aplicar cargas de forma controlada y precisa, midiendo el comportamiento fuerza-desplazamiento durante todo el ensayo. Para la ejecución de los ensayos de flexión por tres puntos, se empleó un utillaje compuesto por tres cilindros, tal como especifica la norma ISO 3327:2009. Dos de estos cilindros se utilizaron como apoyos fijos, colocados de forma paralela entre sí y separados una distancia de $30 \pm 0,5$ mm, correspondiente al vano requerido para probetas tipo A. El tercer cilindro, alineado en el centro del vano, es el que actúa como punto de aplicación de la carga, transmitiendo la fuerza vertical de forma controlada hasta provocar la fractura de la probeta.

Todos los rodillos son cilíndricos, de 6 mm de diámetro, fabricados en carburo de wolframio, un material altamente resistente que no sufre deformaciones visibles durante el ensayo. Además, la rugosidad superficial de los rodillos se mantiene por debajo de $0,63 \mu\text{m Ra}$, cumpliendo los requisitos de calidad superficial exigidos por la norma.

Esta configuración garantiza que la fuerza se aplica de manera uniforme y progresiva, permitiendo una medición precisa de los parámetros mecánicos, como el módulo de elasticidad en flexión y la resistencia a la fractura. En la Figura 37, se muestran los rodillos utilizados en el ensayo de flexión.

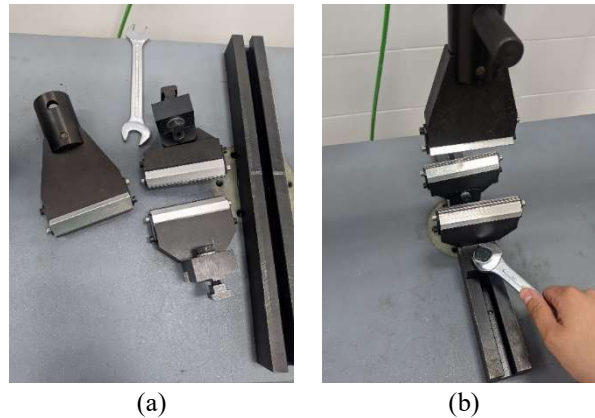


Figura 37. (a) Utillaje específico para el ensayo de flexión por tres puntos. (b) Montaje del utillaje según la norma ISO 3327:2009 (Elaboración propia).

La máquina está equipada con un sistema de adquisición de datos conectado a un software de control, que permitió registrar con detalle las curvas de flexión para cada probeta. A partir de estos datos, se determinaron parámetros clave como el módulo de elasticidad en flexión, la carga máxima soportada y el desplazamiento en el momento de la fractura. En la Figura 38, se muestra la interfaz del software empleado durante la adquisición de datos.

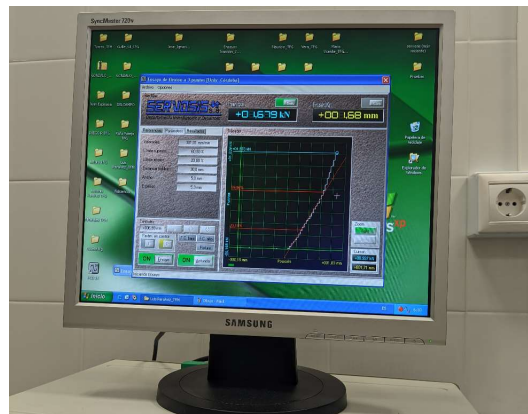


Figura 38. Software de adquisición de datos utilizado en el ensayo (Elaboración propia).

Gracias a su precisión, capacidad de carga y versatilidad, esta máquina ha permitido obtener resultados fiables y consistentes, garantizando la calidad de la caracterización mecánica llevada a cabo en este trabajo.

3.3.2 Máquina de ensayo de dureza Zwick/Roell ZHU250 Top

Para la evaluación de la dureza de las probetas metálicas fabricadas mediante tecnología ADAM, se empleó una máquina de ensayos de dureza ZHU250 Top (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Alemania) (Figura 39), ubicada en el laboratorio de materiales de la Universidad de Córdoba. Este equipo es un instrumento de alta precisión diseñado para realizar ensayos de dureza según diferentes escalas, en este caso bajo el método Rockwell conforme a la norma ISO 6508-1:2005.



Figura 39. Máquina de ensayo de dureza Zwick/Roell ZHU250 Top (Elaboración propia).

El método Rockwell consiste en medir la profundidad que alcanza un indentador sometido a una carga determinada. En este trabajo, se ha utilizado un indentador cónico con punta de diamante tipo Brale y dos escalas distintas en función del tipo de acero, la orientación de impresión y el patrón de relleno:

- Escala Rockwell C (HRC): aplicada a todas las probetas fabricadas en acero H13 y acero A2, aplicando una precarga de 10 kgf y una carga principal de 150 kgf, conforme a la norma. Esta escala es la más adecuada para materiales duros y templados.
- Escala Rockwell D (HRD): empleada exclusivamente para las probetas de acero 17-4 PH, que presentan características mecánicas ligeramente diferentes, especialmente en cuanto a tenacidad y ductilidad.

En cada probeta se realizaron cuatro mediciones sobre la cara previamente ensayada a flexión (Figura 40), y se tomó como resultado el valor medio de todas las lecturas.



Figura 40. Ensayo de dureza (Elaboración propia).

El equipo cuenta con un sistema de lectura automática y registro digital de los valores de dureza (Figura 41), lo que asegura una mayor fiabilidad y precisión en los resultados. Además, incorpora un sistema de alineación automática del indentador y ajuste de altura, facilitando el proceso de medida sobre probetas de geometría reducida como las empleadas en este trabajo.



Figura 41. Resultado del ensayo de dureza (Elaboración propia).

La información obtenida a partir de estos ensayos complementa el análisis mecánico del material, ya que permite evaluar el grado de compactación del interior de la pieza, la homogeneidad del proceso de sinterizado y la posible presencia de zonas más débiles o blandas debido a defectos internos.

3.3.3 Rugosímetro

La rugosidad superficial de las probetas fue evaluada mediante el rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201 (Figura 42), un dispositivo ampliamente utilizado en entornos de laboratorio para caracterizar la calidad superficial de piezas metálicas. Este equipo opera conforme a la norma ISO 4287:1997 y permite la obtención de distintos parámetros que describen el perfil de la superficie.



Figura 42. Rugosímetro (Elaboración propia).

Los parámetros más representativos medidos por el rugosímetro son:

- Ra (rugosidad media aritmética): representa la media de las desviaciones absolutas del perfil respecto a la línea central a lo largo de una longitud de evaluación. Es uno de los indicadores más utilizados para cuantificar la textura superficial.

La expresión de Ra se muestra en la ecuación (1):

$$Ra = \left(\frac{1}{N}\right) \times \Sigma|Yi| \quad (1)$$

Donde:

- Ra es la rugosidad media aritmética.
- N es el número total de mediciones.
- Σ representa la suma de todas las desviaciones del perfil ($|Yi|$) con respecto a la línea media.
- Rz (rugosidad de altura máxima del perfil): indica la suma de la altura máxima del perfil y la profundidad del valle más pronunciado en la longitud evaluada, siendo sensible a defectos puntuales en la superficie.

Rz se calcula sumando la altura máxima (Rp) y la altura mínima (Rv) dentro de la longitud de evaluación, se muestra en la ecuación (2):

$$Rz = Rp + Rv \quad (2)$$

Donde:

- Rz es la rugosidad de máxima altura del perfil.
- Z_{max} es la altura máxima medida dentro de la longitud de evaluación.
- Z_{min} es la altura mínima medida dentro de la longitud de evaluación.
- Rq (rugosidad cuadrática media): proporciona una medida estadística de la rugosidad considerando la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las desviaciones del perfil, siendo más sensible a los picos extremos que Ra.

La expresión de Rq se muestra en la ecuación (3):

$$Rq = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \times \Sigma(Yi^2)} \quad (3)$$

Donde:

- Rq es la rugosidad cuadrática media.
- N es el número total de mediciones.
- Σ representa la suma de los cuadrados de las desviaciones del perfil (Yi) respecto a la línea media.

3.4 Microscopios confocales

Para la obtención de imágenes detalladas de las probetas, así como para medir sus dimensiones, se emplea el microscopio confocal digital Leica DVM6 (Figura 43). Este equipo ofrece una ampliación variable y permite capturar imágenes de alta resolución, facilitando un análisis minucioso tanto de la superficie de las probetas como de las secciones de rotura de las piezas y las indentaciones resultantes del ensayo de dureza. Gracias a su función de zoom y enfoque automático, el Leica DVM6 proporciona imágenes precisas que son fundamentales para la caracterización y evaluación del comportamiento de las probetas.

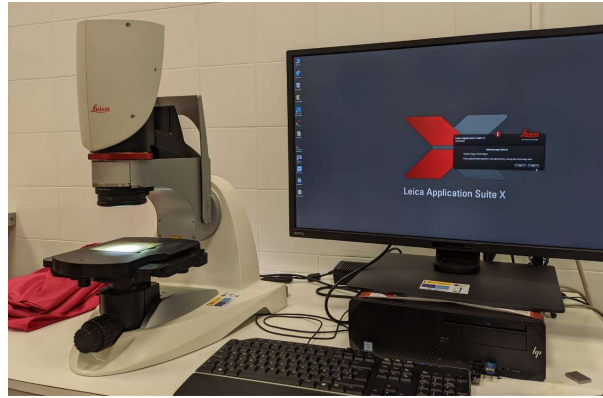


Figura 43. Microscopio confocal digital Leica DVM6 (Elaboración propia).

El DVM6 (Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Alemania) no solo captura imágenes detalladas, sino que también permite obtener rápidamente datos sobre la rugosidad superficial mediante parámetros como S_a , S_q y S_z . Estos indicadores resultan esenciales para caracterizar la topografía y evaluar con precisión la calidad de la superficie. Por ello, este microscopio se constituye como una herramienta eficaz para el análisis y evaluación de la rugosidad superficial (Leica Microsystems, 2025).

Para la adquisición y procesamiento de los datos e imágenes, el microscopio se conecta a un ordenador que ejecuta el software Leica Mountains, tal como se muestra en la Figura 43. Este programa permite controlar y ajustar parámetros clave del microscopio, como el enfoque y la iluminación, además de ofrecer funcionalidades avanzadas para el análisis y medición precisa de la superficie. Entre estas mediciones se incluyen los parámetros de rugosidad mencionados, que ayudan a obtener una caracterización exhaustiva de la superficie analizada. Así, el software Leica Mountains constituye una plataforma integral para el procesamiento de imágenes y la interpretación de los datos obtenidos mediante el microscopio.

3.5 Estudio estadístico de los resultados

Para llevar a cabo el análisis estadístico de los resultados obtenidos en los ensayos de flexión y dureza realizados sobre las probetas metálicas fabricadas mediante fabricación aditiva, se ha empleado el software Minitab (Minitab LLC, State College, EE. UU.). Esta herramienta proporciona un entorno para el tratamiento y la interpretación de datos experimentales, permitiendo al usuario realizar un análisis preliminar, identificar tendencias, establecer relaciones entre variables y aplicar modelos estadísticos como regresiones o análisis de varianza (ANOVA) (Minitab, 2025).

En este estudio, se analizaron los efectos individuales y combinados de tres factores categóricos —material, tipo de relleno y orientación de impresión— sobre diversas variables de salida, como la resistencia a flexión y la dureza superficial. Para ello, se utilizaron distintas funciones estadísticas del programa, tales como el análisis de varianza multifactorial (ANOVA), las gráficas de efectos principales y otras herramientas gráficas complementarias que han permitido evaluar la influencia relativa de cada parámetro de fabricación en las propiedades mecánicas y superficiales obtenidas.

3.5.1. Análisis de regresión y análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de regresión es una herramienta estadística que permite examinar la relación entre una variable dependiente y una o varias variables independientes, con el objetivo de establecer un modelo matemático que describa esta relación y posibilite la predicción de

resultados. Las variables independientes pueden ser continuas, como por ejemplo la densidad de relleno, o categóricas, como el tipo de material o el patrón de impresión.

La calidad del ajuste del modelo se evalúa mediante el coeficiente de determinación R^2 , que puede variar entre 0 y 1. Un valor cercano a 0 indica que el modelo no explica la variación de la variable dependiente, mientras que un valor próximo a 1 significa que el modelo explica en gran medida dicha variabilidad. Además del valor de R^2 , se verifica la adecuación del modelo analizando gráficos de probabilidad normal y residuos estandarizados, con el objetivo de detectar posibles datos atípicos que puedan influir negativamente en el ajuste.

Este modelo, construido a partir de las variables de entrada y los resultados experimentales obtenidos, permite predecir los valores que deberían adoptar las variables independientes para alcanzar un valor deseado en la variable de respuesta. Paralelamente, el análisis de varianza (ANOVA) se emplea para determinar la influencia que cada variable de entrada ejerce sobre la variable dependiente analizada.

3.5.2. Gráfica de efectos principales

La gráfica de efectos principales representa las medias de cada categoría dentro de una variable independiente, uniendo mediante líneas los puntos correspondientes a cada grupo. Este tipo de gráfico permite identificar qué factores influyen de manera significativa en la variable dependiente y cuantificar la magnitud de su efecto, siendo más pronunciado cuanto mayor sea la pendiente de la línea que conecta los diferentes niveles del factor.

3.5.3. Gráfica de contorno

La gráfica de contorno ilustra la relación entre una variable de respuesta y dos variables predictoras, mediante líneas que unen puntos con los mismos valores de respuesta. Esta representación bidimensional facilita la visualización de zonas donde la variable dependiente permanece constante. Este tipo de gráfico resulta especialmente útil para identificar las condiciones óptimas de operación y analizar cómo varía la respuesta en función de combinaciones de dos variables, generando una superficie de respuesta simplificada.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización dimensional y superficial

4.1.1 Dimensiones de las probetas

Para analizar la precisión dimensional alcanzada mediante el proceso de fabricación aditiva, se midieron las tres dimensiones principales —largo, alto y ancho— de una probeta representativa de cada uno de los nueve grupos definidos en este estudio. Las mediciones se realizaron utilizando el microscopio digital Leica DVM6, con el objetivo de comparar los valores reales con las dimensiones nominales establecidas por la norma ISO 3327:2009 para probetas tipo A ($5 \times 5 \times 35$ mm) (AENOR, 2010).

A continuación, se presentan en la Tabla 12 los resultados obtenidos, que permiten evaluar el grado de precisión con el que se han obtenido las probetas mediante fabricación aditiva, así como detectar posibles desviaciones asociadas al material, al patrón de relleno o a la orientación de impresión. Estos datos son muy importantes para valorar la calidad geométrica de las probetas y su adecuación a las tolerancias establecidas por la norma ISO 3327:2009 (AENOR, 2010).

Tabla 12. Medidas de las dimensiones principales de las probetas (Elaboración propia).

| MATERIAL | RELLENO | ORIENTACIÓN | LARGO (MM) | ALTO (MM) | ANCHO (MM) |
|----------|------------|-------------|------------------|-----------------|-----------------|
| A2 | GYROID | NORMAL | $35,38 \pm 0,27$ | $5,06 \pm 0,04$ | $5,13 \pm 0,09$ |
| A2 | SOLID | LATERAL | $35,76 \pm 0,53$ | $5,11 \pm 0,08$ | $5,05 \pm 0,04$ |
| A2 | TRIANGULAR | 45 DEG | $35,85 \pm 0,60$ | $5,05 \pm 0,04$ | $5,07 \pm 0,05$ |
| H13 | GYROID | 45 DEG | $35,73 \pm 0,52$ | $5,10 \pm 0,07$ | $5,06 \pm 0,04$ |
| H13 | SOLID | NORMAL | $35,59 \pm 0,42$ | $5,06 \pm 0,04$ | $5,08 \pm 0,05$ |
| H13 | TRIANGULAR | LATERAL | $35,32 \pm 0,22$ | $5,08 \pm 0,06$ | $5,07 \pm 0,05$ |
| 17-4 PH | GYROID | LATERAL | $35,43 \pm 0,30$ | $5,22 \pm 0,15$ | $5,04 \pm 0,03$ |
| 17-4 PH | SOLID | 45 DEG | $34,77 \pm 0,17$ | $4,92 \pm 0,05$ | $5,06 \pm 0,04$ |
| 17-4 PH | TRIANGULAR | NORMAL | $34,96 \pm 0,03$ | $5,09 \pm 0,07$ | $5,06 \pm 0,04$ |

Con el fin de representar visualmente las variaciones en las dimensiones de las probetas, se han elaborado tres gráficas (Figura 44), correspondientes a las medidas del largo, alto y ancho, respectivamente. En ellas se muestran los valores promedio obtenidos para cada grupo, acompañados de indicadores del error que representan la desviación típica de cada dimensión.

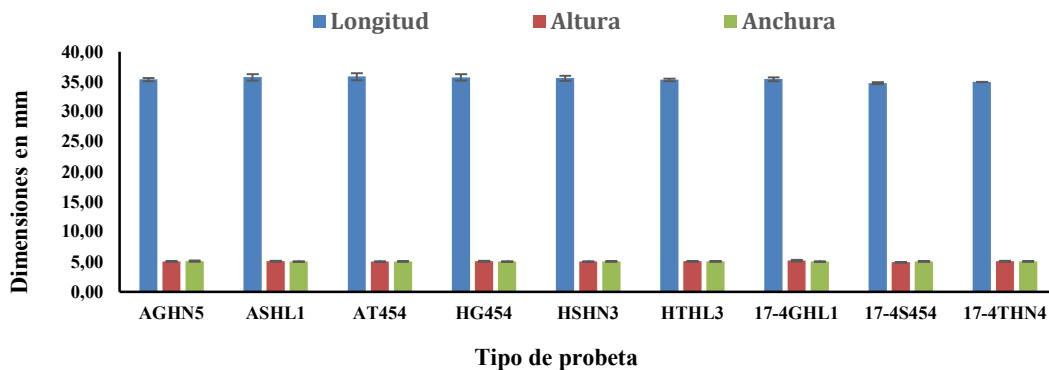


Figura 44. Valores de las dimensiones de las probetas siendo la primera sigla el material (A2, H13, 17-4 PH), la segunda referente al relleno (Gyroid, Solid, Triangular), la tercera la orientación de impresión (Horizontal normal, Horizontal lateral, 45 grados) y por último el número de la probeta más representativa seleccionada (Elaboración propia).

Se puede observar que las dimensiones medidas en las probetas son muy similares a las medidas teóricas establecidas por la norma ISO 3327:2009 (AENOR, 2010), con pequeñas desviaciones que pueden atribuirse a distintos factores como son:

- **Propiedades del material:** Las aleaciones metálicas usadas (A2, H13, 17-4 PH) tienen características térmicas y mecánicas distintas que pueden influir durante el proceso de procesado y sinterizado, a las dimensiones finales.
- **Patrón de relleno:** La estructura interna del relleno (Gyroid, Solid, Triangular) condiciona el comportamiento dimensional durante el sinterizado y postprocesado, lo que puede originar variaciones en las dimensiones finales.
- **Orientación de impresión:** La dirección en la que se imprime la pieza afecta a su comportamiento térmico y mecánico durante la fabricación, pudiendo generar diferencias en la contracción y deformación. Por ejemplo, la orientación de impresión a 45 grados ha influido notablemente, ya que, al requerir soporte durante el proceso, se han producido pequeñas variaciones dimensionales adicionales.
- **Precisión y control del proceso de impresión:** A pesar de su complejidad, la tecnología ADAM puede presentar ligeras debilidades en el proceso de deposición y compactación del material. Esto se observa especialmente al utilizar distintas aleaciones metálicas y patrones de relleno variados como es el caso de este proyecto.
- **Tolerancias de fabricación:** Las desviaciones encontradas se encuentran dentro de los márgenes aceptables establecidos para piezas impresas en metal, lo que confirma la capacidad del proceso para fabricar probetas con dimensiones adecuadas para los ensayos mecánicos planificados.

En conjunto, estos factores contribuyen a que las dimensiones obtenidas sean consistentes y comparables entre los diferentes grupos estudiados, permitiendo asegurar que las probetas son representativas y adecuadas para los ensayos de flexión y dureza posteriores. Esta caracterización dimensional es fundamental para garantizar la validez y reproducibilidad de los resultados mecánicos analizados en este trabajo.

4.1.2 Rugosidad superficial

En esta sección se presentan los valores promedio de los parámetros de rugosidad superficial R_a , R_z y R_q obtenidos para las probetas metálicas fabricadas mediante tecnología ADAM, según las diferentes configuraciones de patrón de relleno y orientación de impresión definidas en este estudio. Las mediciones se realizaron siguiendo el procedimiento detallado en el Capítulo 3, utilizando el rugosímetro Mitutoyo SJ-201, que garantiza resultados repetibles y precisos.

La Tabla 13 muestra los valores medios y desviaciones típicas de R_a , R_z y R_q para cada grupo representativo de probetas.

Tabla 13. Medidas de la rugosidad de los sustratos (Elaboración propia).

| MATERIAL | RELLENO | ORIENTACIÓN | Ra (μm) | Rz (μm) | Rq (μm) |
|----------|------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| A2 | GRID | NORMAL | $2,77 \pm 0,52$ | $17,53 \pm 3,70$ | $3,63 \pm 0,72$ |
| A2 | SOLID | LATERAL | $12,39 \pm 0,92$ | $52,36 \pm 2,74$ | $14,49 \pm 0,90$ |
| A2 | TRIANGULAR | 45 DEG | $14,23 \pm 0,29$ | $65,61 \pm 2,03$ | $16,76 \pm 0,28$ |
| H13 | GRID | 45 DEG | $13,55 \pm 0,99$ | $64,51 \pm 5,89$ | $15,98 \pm 1,28$ |
| H13 | SOLID | NORMAL | $10,09 \pm 1,54$ | $50,03 \pm 8,87$ | $11,90 \pm 4,14$ |
| H13 | TRIANGULAR | LATERAL | $10,72 \pm 0,63$ | $46,82 \pm 2,36$ | $12,79 \pm 0,66$ |
| 17-4 PH | GRID | LATERAL | $9,42 \pm 0,84$ | $41,12 \pm 2,62$ | $11,28 \pm 0,89$ |
| 17-4 PH | SOLID | 45 DEG | $13,06 \pm 0,58$ | $64,64 \pm 2,76$ | $15,73 \pm 0,64$ |
| 17-4 PH | TRIANGULAR | NORMAL | $3,87 \pm 2,38$ | $21,37 \pm 9,37$ | $4,95 \pm 2,81$ |

En la Figura 45, se representa un diagrama de barras con el análisis de los parámetros de rugosidad obtenidos para cada uno de los nueve grupos de probetas estudiados. Tal como se indica en la leyenda, las barras de color azul corresponden a los valores de rugosidad media aritmética (Ra), las barras rojas a la rugosidad de altura máxima (Rz) y las verdes a la rugosidad cuadrática media (Rq).

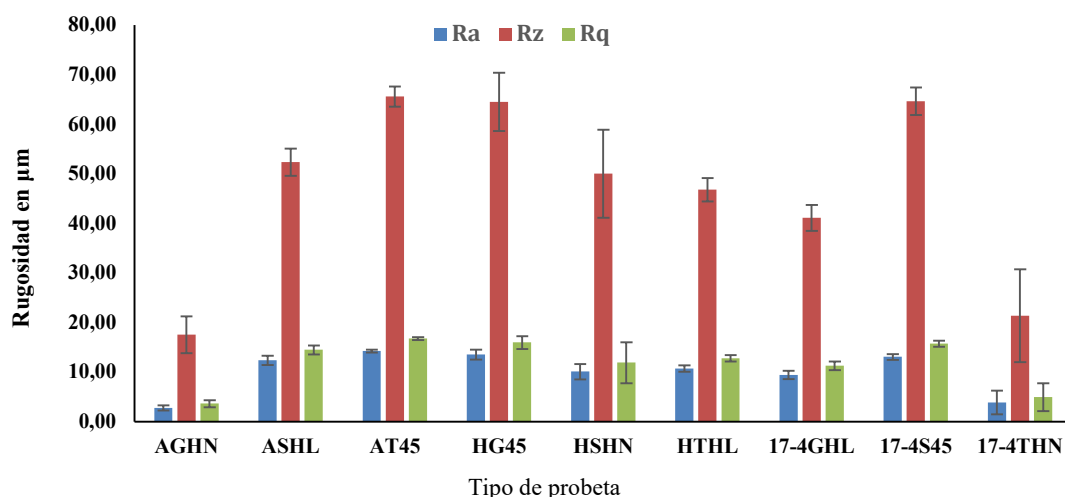


Figura 45. Valores de la rugosidad Ra, Rz y Rq de las probetas siendo la primera sigla el material (A2, H13, 17-4 PH), la segunda referente al relleno (Gyroid, Solid, Triangular), la tercera la orientación de impresión (Horizontal normal, Horizontal lateral, 45 grados) (Elaboración propia).

Los datos representados en la gráfica proceden de las mediciones descritas en la Tabla 13 y permiten visualizar de forma comparativa las variaciones de rugosidad superficial entre las distintas configuraciones de impresión. Se observa una gran dispersión en los valores, con algunas configuraciones como AT45 (A2, Triangular, 45 grados), HG45 (H13, Gyroid, 45 grados) y 17-4S45 (17-4 PH, Solid, 45 grados) que presentan valores de rugosidad considerablemente superiores al resto, tanto en Ra como en Rz y Rq.

En general, los valores de Ra oscilan entre aproximadamente 2,8 μm para las probetas más lisas como AGHN (A2, Gyroid, Horizontal Normal) o 17-4THN (17-4 PH, Triangular, Horizontal Normal), y valores superiores a 14 μm en los casos con más rugosidad. Esta variabilidad puede deberse a múltiples factores ya comentados, como la orientación de impresión, el tipo de relleno o el comportamiento de cada aleación metálica durante el postprocesado y el sinterizado.

El análisis gráfico permite identificar aquellas configuraciones que, previsiblemente, tendrán mayor influencia en la calidad superficial final y, por tanto, en el comportamiento mecánico de las probetas. Dado que la rugosidad puede afectar tanto al inicio de concentraciones de tensión como al contacto con los útiles de ensayo, esta caracterización resulta fundamental para comprender y contextualizar los resultados de los ensayos de flexión y dureza que se presentan en los apartados siguientes.

4.2 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión por tres puntos es una técnica ampliamente utilizada para evaluar la resistencia mecánica de materiales sometidos a esfuerzos de flexión, permitiendo determinar propiedades como la resistencia máxima a flexión y el módulo de elasticidad (o de Young). En este trabajo, dicho ensayo se ha empleado para caracterizar el comportamiento de las probetas metálicas fabricadas mediante la tecnología ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing), conforme a lo establecido en la norma ISO 3327:2009 (AENOR, 2010).

Durante el ensayo, cada probeta se coloca sobre dos apoyos cilíndricos de 6 mm de diámetro separados a una distancia de 30 mm y se aplica una carga en el centro de la probeta a una velocidad constante, hasta alcanzar su rotura. Esta configuración genera un estado de esfuerzos donde las fibras superiores están sometidas a compresión y las inferiores a tracción, lo que permite evaluar la resistencia del material frente a sollicitaciones de flexión.

La fuerza máxima soportada por la probeta y sus dimensiones geométricas permiten calcular la resistencia a flexión (σ) utilizando la ecuación (4):

$$\sigma = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times d^2} \quad (4)$$

Donde:

- F es la carga máxima aplicada (en N).
- L la distancia entre apoyos (mm).
- b el ancho de la probeta (mm).
- d el espesor de la probeta (mm).

Los ensayos se han realizado en una máquina universal de ensayos, y los datos obtenidos incluyen tanto la carga de rotura como la gráfica carga-deformación correspondiente del ensayo. Con estos datos y otros vistos en secciones anteriores, se ha procedido al cálculo de la resistencia a flexión para cada una de las probetas, agrupadas en nueve configuraciones distintas según el material, el patrón de relleno y la orientación de impresión. En la Tabla 14 se muestran los valores promedio y desviaciones típicas para cada grupo:

Tabla 14. Resultados de resistencia a flexión de las probetas (Elaboración propia).

| MATERIAL | RELLENO | ORIENTACIÓN | RESISTENCIA |
|----------|------------|-------------|------------------|
| A2 | GYROID | NORMAL | 1128,38 ± 32,69 |
| A2 | SOLID | LATERAL | 1383,83 ± 109,32 |
| A2 | TRIANGULAR | 45 DEG | 664,11 ± 52,08 |
| H13 | GYROID | 45 DEG | 680,75 ± 24,01 |
| H13 | SOLID | NORMAL | 2659,99 ± 64,63 |
| H13 | TRIANGULAR | LATERAL | 1841,62 ± 70,96 |
| 17-4 PH | GYROID | LATERAL | 1188,35 ± 43,43 |
| 17-4 PH | SOLID | 45 DEG | 733,07 ± 91,34 |
| 17-4 PH | TRIANGULAR | NORMAL | 1181,74 ± 7,56 |

A continuación, se presenta en la Figura 46 un diagrama de barras donde se representa visualmente la resistencia a flexión media de cada tipo de probeta, incluyendo barras de error que reflejan su dispersión.

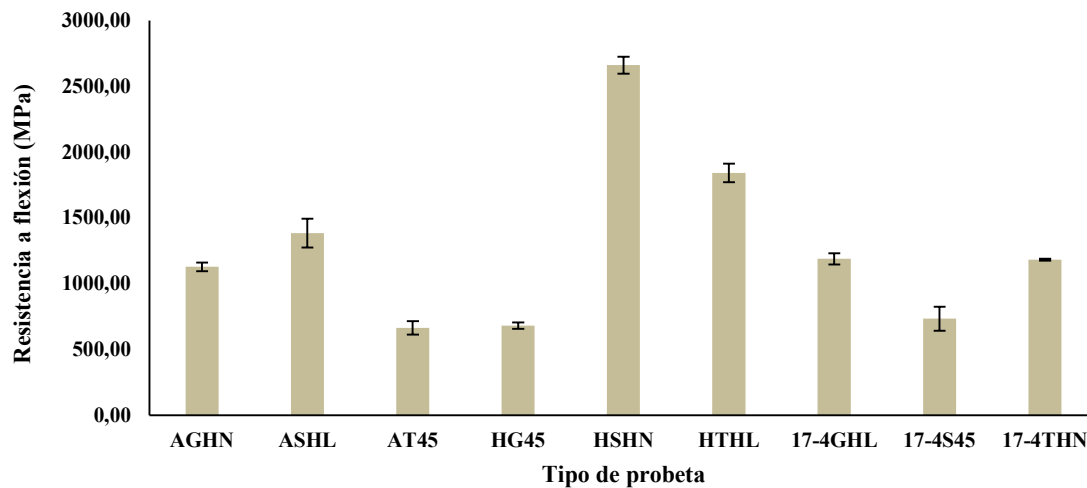


Figura 46. Valores de la resistencia a flexión de las probetas siendo la primera sigla el material (A2, H13, 17-4 PH), la segunda referente al relleno (Gyroid, Solid, Triangular), la tercera la orientación de impresión (Horizontal normal, Horizontal lateral, 45 grados) (Elaboración propia).

En la gráfica se observa que las probetas HSHN (H13, Solid, Horizontal normal) presentan la mayor resistencia a flexión, alcanzando valores superiores a 2600 MPa. Este resultado puede atribuirse tanto a la aleación utilizada, caracterizada por su elevada dureza y resistencia, como a la configuración de relleno compacto y la orientación de impresión favorable, que minimiza las discontinuidades internas.

Le siguen las probetas HTHL (H13, Triangular, Horizontal lateral), con valores superiores a 1800 MPa, lo cual refuerza la influencia positiva del material H13, aunque el patrón de relleno triangular presenta una resistencia ligeramente inferior al solid.

En contraposición, las probetas con orientación a 45 grados AT45 (A2, Triangular; 45 grados), HG45 (H13, Gyroid, 45 grados), 17-4S45 (17-4 PH, Solid, 45 grados) muestran los valores más bajos de resistencia a flexión, situándose por debajo de los 800 MPa. Esta disminución puede relacionarse con la necesidad de soportes adicionales durante la impresión en dicha orientación, lo que puede generar zonas de unión más débiles o efectos de anisotropía más marcados tras el sinterizado.

Por su parte, las probetas fabricadas con acero 17-4 PH presentan una resistencia intermedia, con diferencias notables según el patrón de relleno y orientación. La configuración 17-4GHL (17-4 PH, Gyroid, Horizontal lateral) y 17-4THN (17-4 PH, Triangular, Horizontal normal) rondan los 1150 MPa, mostrando un comportamiento similar al de probetas A2 con configuración gyroid.

En conjunto, los resultados confirman que tanto el tipo de aleación como el patrón de relleno y la orientación de impresión influyen significativamente en la resistencia a flexión de las piezas fabricadas mediante tecnología ADAM. La caracterización obtenida resulta fundamental para seleccionar combinaciones óptimas en función de los requisitos estructurales de la aplicación final.

Para complementar el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo de flexión, se han seleccionado gráficas carga-deformación representativas de algunas de las configuraciones de probeta analizadas. Estas curvas permiten analizar el comportamiento mecánico del material durante el ensayo, destacando las diferencias en términos de rigidez inicial, capacidad de deformación y carga máxima alcanzada antes de la rotura.

Dado que se trata de aceros endurecidos fabricados mediante tecnología ADAM, el comportamiento general observado es típicamente elástico-frágil, es decir, presentan una fase inicial de alta rigidez con una pendiente pronunciada, seguida de una rotura repentina sin apenas deformación plástica. Esto es característico de materiales metálicos con alta dureza y baja tenacidad frente a flexión.

A continuación, se muestran algunas de las curvas más representativas:

4.2.1. Curvas carga-deformación representativas de las probetas con mayor resistencia a flexión HSHN (H13, Solid, Horizontal normal)

En la Figura 47 se presenta la curva correspondiente a la configuración que alcanzó la mayor carga de rotura, superior a los 7,6 kN, con una deformación máxima de 3,45 mm. Esta curva muestra una pendiente inicial muy pronunciada, reflejo de una elevada rigidez, seguida de una rotura abrupta sin apenas deformación plástica, lo que es característico de materiales duros y frágiles. La elevada resistencia observada se asocia a la configuración estructural más favorable —como el relleno sólido y orientación normal— y al uso de aleaciones con buena cohesión interna tras el sinterizado.

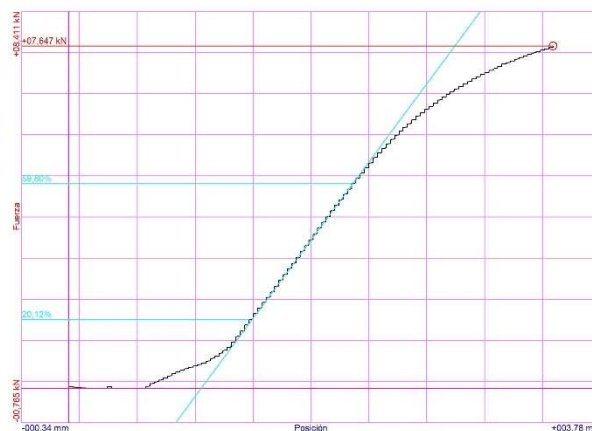


Figura 47. Curva carga-deformación probeta con la configuración HSHN (H13, Solid, Horizontal Normal) (Elaboración propia).

Además del análisis numérico mediante la curva carga-deformación, se ha incorporado en la Figura 48 una secuencia visual obtenida a partir del vídeo del ensayo de la probeta HSHN. La imagen (a) corresponde al estado inicial, sin carga aplicada. En la imagen (b), puede observarse una notable flexión en la probeta provocada por el incremento progresivo de la carga, reflejando la elevada rigidez del material. Finalmente, la imagen (c) capta el momento de la rotura súbita, donde la probeta, incapaz de soportar la carga máxima, se fractura de forma violenta y sale despedida. Esta secuencia ilustra claramente el comportamiento frágil del material, sin apenas deformación plástica previa a la fractura.

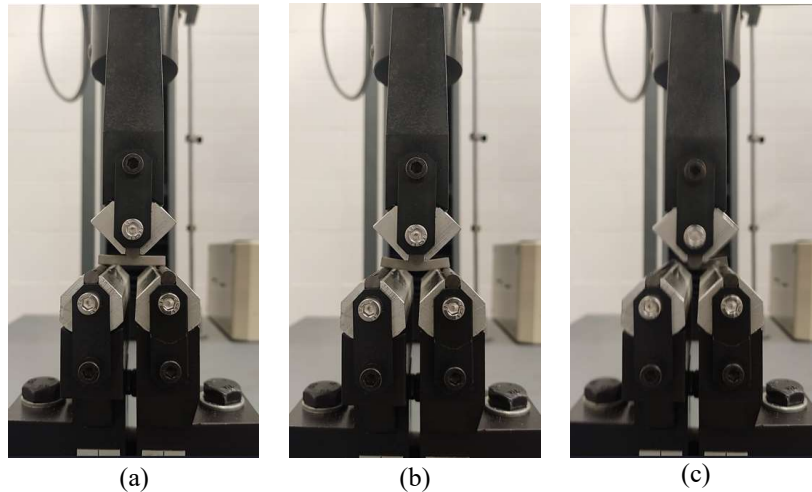


Figura 48. Secuencia del ensayo de flexión de la probeta HSHN (H13, Solid, Horizontal Normal): (a) Estado inicial sin carga, (b) curvatura máxima antes de la rotura, (c) instante de fractura (Elaboración propia).

4.2.2 Curvas carga-deformación representativas de las probetas con resistencia media AGHN (A2, Gyroid, Horizontal Normal), 17-4GHL (17-4 PH, Gyroid, Horizontal lateral) y 17-4THN (17-4 PH, Triangular, Horizontal Normal)

Las curvas presentadas en la Figura 49 corresponden a configuraciones con valores intermedios de resistencia a flexión, con una carga de rotura de 3,3kN y una deformación máxima de 1,31 mm. Se observan pendientes iniciales más moderadas en comparación con las del grupo anterior, así como una rotura que, si bien continúa siendo frágil, muestra cierta capacidad de deformación previa al fallo. Estos perfiles de respuesta podrían estar influidos por una combinación de factores como el tipo de relleno menos denso (Gyroid o Triangular), la orientación de impresión y el material utilizado (principalmente A2 y 17-4 PH). En general, estas probetas presentan un equilibrio entre rigidez y resistencia aceptable para aplicaciones mecánicas de exigencia moderadas.

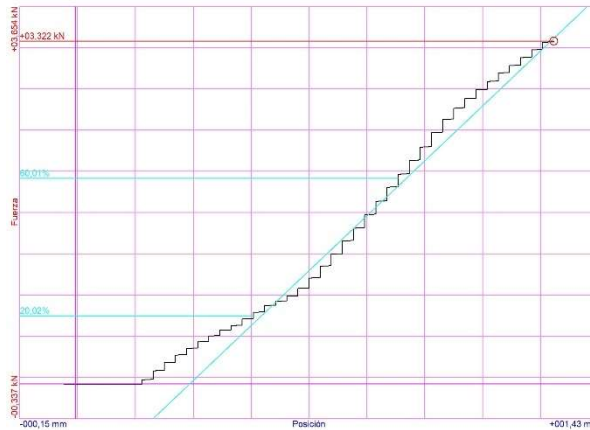


Figura 49. Curva carga-deformaci6n probeta con la configuraci6n AGHN (A2, Gyroid, Horizontal Normal) (Elaboraci6n propia).

Para complementar la interpretaci6n de este grupo de resistencia intermedia, se incluye en la Figura 50 una secuencia del ensayo realizado sobre la probeta AGHN. En la imagen (a) se observa el estado inicial antes de la aplicaci6n de carga, sin presencia de deformaci6n. La imagen (b) muestra una fase intermedia donde se empieza a detectar una flexi6n moderada, indicando una cierta capacidad de absorci6n de energa. Finalmente, la imagen (c) representa el instante de la rotura, que ocurre con una deformaci6n algo menor que la del grupo m1s resistente, pero superior a la del menos resistente, lo que indica un comportamiento intermedio en t6rminos de ductilidad. Esta secuencia es coherente con la curva obtenida, que refleja un equilibrio entre rigidez y capacidad de deformaci6n, acorde con los resultados esperados para configuraciones de relleno m1s complejas y materiales de dureza media.

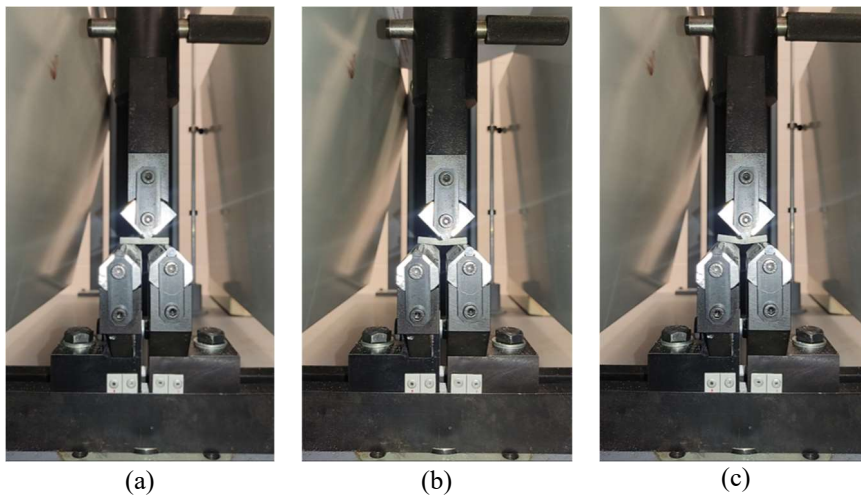


Figura 50. Secuencia del ensayo de flexi6n de la probeta AGHN (A2, Gyroid, Horizontal Normal): (a) estado inicial sin carga, (b) flexi6n progresiva con carga creciente, (c) momento de la rotura de la probeta (Elaboraci6n propia).

4.2.3 Curvas carga-deformaci6n representativas de las probetas con menor resistencia a flexi6n AT45 (A2, Triangular, 45 grados), HG45 (H13, Gyroid, 45 grados) y 17-4S45 (17-4 PH, Solid, 45 grados)

Las probetas con peor comportamiento alcanzan cargas m1ximas de 1,6 kN, pero curiosamente registran una deformaci6n mayor que el grupo intermedio, llegando a 1,77 mm (Figura 51). Esto refleja una menor rigidez y mayor deformaci6n antes de la rotura, lo que indica un comportamiento m1s d1ctil pero mucho menos resistente. Este patr6n puede deberse a deficiencias estructurales introducidas por la orientaci6n de impresi6n a

45°, que aumenta la necesidad de soporte y puede comprometer la integridad del material en el plano de carga. Este grupo evidencia claramente la influencia negativa que ciertas combinaciones de orientación y patrón de relleno ejercen sobre las propiedades mecánicas.

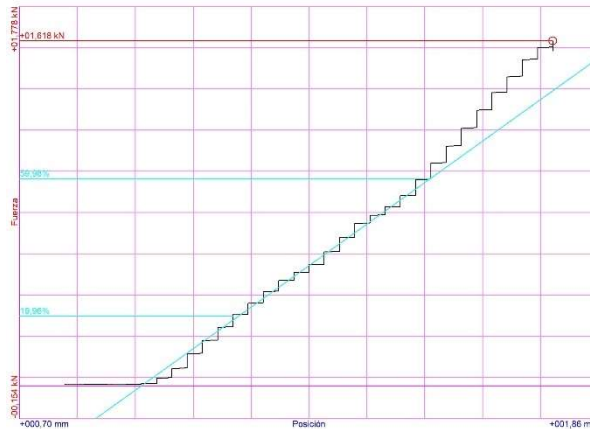


Figura 51. Curva carga-deformación probeta con la configuración 17-4S45 (17-4 PH, Solid, 45 Grados) (Elaboración propia).

Para ilustrar visualmente el comportamiento mecánico de este grupo de baja resistencia, se ha añadido en la Figura 52 una secuencia correspondiente al ensayo de la probeta 17-4S45. La imagen (a) muestra el estado inicial sin carga aplicada. En la imagen (b), se observa una deformación progresiva de la probeta a medida que aumenta la carga, con una curvatura más suave respecto al grupo de mayor resistencia, reflejo de su menor rigidez. Finalmente, en la imagen (c), se aprecia el momento de la rotura, que se produce de forma más gradual y menos violenta que en configuraciones más frágiles. Este comportamiento es coherente con las curvas obtenidas, donde se evidencia una mayor deformabilidad, pero una capacidad de carga notablemente inferior.

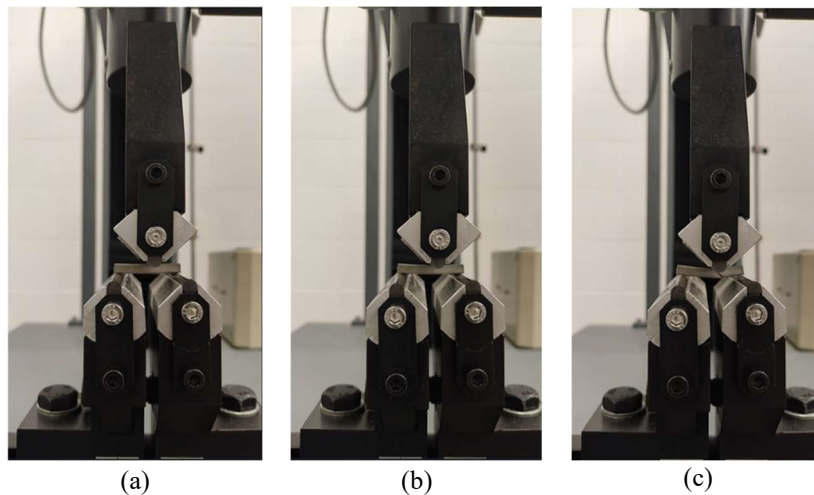


Figura 52. Secuencia del ensayo de flexión de la probeta 17-4S45 (17-4 PH, Solid, 45 Grados): (a) estado inicial sin carga, (b) deformación progresiva con carga creciente, (c) rotura final de la probeta (Elaboración propia).

En definitiva, los resultados del ensayo a flexión confirman la influencia combinada del material, el patrón de relleno y la orientación de impresión en el comportamiento mecánico de las probetas fabricadas mediante tecnología ADAM, proporcionando información clave para la optimización de parámetros en futuras aplicaciones estructurales.

4.3 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza es una técnica fundamental en la caracterización mecánica de materiales, ya que permite evaluar la resistencia que ofrece una superficie frente a la penetración de un indentador bajo una carga determinada. En este trabajo, se ha llevado a cabo un análisis comparativo de la dureza de las probetas metálicas fabricadas mediante tecnología ADAM, con diferentes configuraciones de material, relleno y orientación de impresión, con el fin de valorar la influencia de estos parámetros en la resistencia superficial de las piezas.

Para la determinación de la dureza se ha empleado principalmente el método Rockwell C (HRC), adecuado para materiales de elevada dureza. No obstante, debido a que algunas probetas presentaban valores bajos que se situaban fuera del rango de sensibilidad del escalón HRC, se recurrió al uso del método Rockwell D (HRD), más apropiado para materiales de dureza media-baja. Concretamente, las configuraciones 17-4S45 y 17-4THN fueron evaluadas mediante HRD, mientras que el resto de las probetas se ensayaron con el procedimiento HRC.

Por tanto, las configuraciones evaluadas mediante el método HRD fueron exclusivamente 17-4S45 (17-4 PH, Solid, 45°) y 17-4THN (17-4 PH, Triangular, Horizontal Normal), cuyas durezas aparecen marcadas con un asterisco en la Tabla 15.

Las mediciones se realizaron utilizando un durómetro Rockwell calibrado, aplicando la carga correspondiente a cada escala de ensayo. Para cada configuración se realizaron varias mediciones y se calculó el valor medio y la desviación típica, con el objetivo de obtener resultados representativos y valorar la homogeneidad de la dureza en las piezas fabricadas.

En la Tabla 15 se muestran los resultados medios obtenidos para cada una de las configuraciones analizadas:

Tabla 15. Resultados del ensayo de dureza. Los valores marcados con * fueron determinados mediante el método Rockwell D (HRD). (Elaboración propia).

| MATERIAL | RELLENO | ORIENTACIÓN | DUREZA |
|----------|------------|-------------|---------------|
| A2 | GYROID | NORMAL | 17,51 ± 1,10 |
| A2 | SOLID | LATERAL | 45,78 ± 3,02 |
| A2 | TRIANGULAR | 45 DEG | 34,52 ± 2,82 |
| H13 | GYROID | 45 DEG | 35,93 ± 0,95 |
| H13 | SOLID | NORMAL | 46,26 ± 2,30 |
| H13 | TRIANGULAR | LATERAL | 42,53 ± 0,99 |
| 17-4 PH | GYROID | LATERAL | 20,35 ± 4,27 |
| 17-4 PH | SOLID | 45 DEG | 33,47 ± 6,87* |
| 17-4 PH | TRIANGULAR | NORMAL | 20,88 ± 5,08* |

Con el fin de visualizar mejor los resultados, en la Figura 53 se presenta un diagrama de barras donde aparecen los valores promedio de dureza obtenidos y las barras de error correspondientes a la desviación típica. Las configuraciones evaluadas 17-4S45 (17-4 PH, Solid, 45 grados) y 17-4THN (17-4 PH, Triangular, Horizontal Normal) con el método HRD se han representado con un sombreado gris para destacar la diferencia de escala.

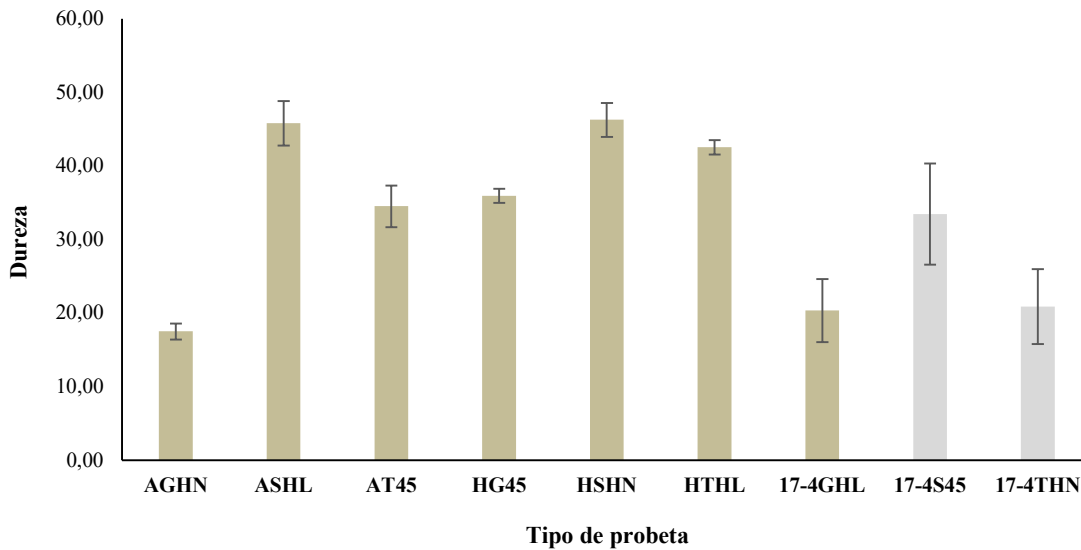


Figura 53. Resultados medios del ensayo de dureza Rockwell de las probetas fabricadas con tecnología ADAM (Elaboración propia).

En la gráfica se observa que las probetas fabricadas con acero H13 presentan los valores más altos de dureza, especialmente la configuración HSHN (H13, Solid, Horizontal normal), que alcanza una media superior a 47 HRC. Esto concuerda con su excelente comportamiento en el ensayo de flexión, confirmando la elevada resistencia mecánica de este material combinado con un patrón de relleno sólido y orientación normal.

Las configuraciones del acero A2 muestran durezas intermedias, con una ligera mejora en la orientación lateral y relleno sólido, mientras que las probetas de acero 17-4 PH presentan los valores más bajos de dureza, en especial las orientadas a 45 grados y con relleno sólido 17-4S45 (17-4 PH, Solid, 45 grados), lo que justificó el uso del método HRD para su evaluación.

En conjunto, los resultados del ensayo de dureza confirman la influencia del material base, el patrón de relleno y la orientación de impresión sobre la calidad superficial de las piezas fabricadas mediante tecnología ADAM. Esta información es clave para seleccionar configuraciones óptimas en función de los requisitos de resistencia al desgaste o contacto de los componentes diseñados.

Además de representar visualmente los resultados, es de gran importancia comparar los mismos con los valores de dureza indicados en el catálogo de materiales de Markforged, con el objetivo de evaluar si el proceso de fabricación ADAM cumple con las propiedades esperadas tras el sinterizado. Los valores típicos de dureza son:

- A2 Tool Steel: 55 HRC.
- H13 Tool Steel: 45 HRC.
- 17-4 PH Stainless Steel: 36 HRC.

Para interpretar los resultados obtenidos, se ha comparado la dureza media de las probetas con relleno sólido (Tabla 16), el más adecuado para este análisis por su estructura homogénea con los valores indicados en el catálogo de materiales de Markforged para piezas sinterizadas.

Tabla 16. Comparación de la dureza medida en probetas con relleno sólido versus valores esperados según el catálogo de Markforged (Elaboración propia).

| MATERIAL | RELLENO | ORIENTACIÓN | DUREZA MEDIDA | MÉTODO | DUREZA ESPERADA (MARKFORGED) |
|----------|---------|-------------|---------------|--------|------------------------------|
| A2 | SOLID | LATERAL | 45,78 ± 3,02 | HRC | Hasta 50 HRC |
| H13 | SOLID | NORMAL | 46,26 ± 2,30 | HRC | 40–45 HRC |
| 17-4 PH | SOLID | 45 DEG | 33,47 ± 6,87 | HRD | 37 HRC (equivalente ~34 HRD) |

- A2 (Solid, Horizontal Lateral): presenta una dureza media de 45,78 HRC, valor cercano al límite superior indicado por Markforged (hasta 50 HRC). Esto sugiere una buena consolidación del material y una densificación adecuada tras el postprocesado.
- H13 (Solid, Horizontal Normal): alcanza 46,26 HRC, ligeramente por encima del rango teórico (40–45 HRC). Este resultado indica un sinterizado exitoso y una alta cohesión interna, coherente con los buenos resultados obtenidos en el ensayo de flexión.
- 17-4 PH (Solid, 45°): fue ensayado mediante el método Rockwell D (HRD) debido a su menor dureza. El valor medio de 33,47 HRD está algo por debajo del esperado (equivalente a unos 37 HRC o ~34 HRD), lo que puede deberse a una orientación de impresión desfavorable o a una menor eficacia del proceso de sinterizado en este tipo de acero inoxidable.

En conjunto, los resultados del ensayo de dureza permiten concluir que existe una buena concordancia entre los valores medidos experimentalmente y los proporcionados por el fabricante, especialmente en las probetas con relleno sólido, que muestran mayor homogeneidad y estabilidad en la respuesta del material frente a la penetración. Las ligeras desviaciones observadas pueden atribuirse tanto a la variabilidad inherente al proceso de fabricación aditiva como a las limitaciones del método de ensayo en zonas no completamente densas. Esta caracterización resulta clave para validar la viabilidad de las piezas fabricadas mediante tecnología ADAM en aplicaciones que requieran propiedades mecánicas bien definidas y repetibles.

4.4 Observaciones microscópicas de las probetas ensayadas

4.4.1 Análisis de las fracturas tras el ensayo de flexión

Para complementar el análisis cuantitativo realizado en el ensayo de flexión, se han capturado imágenes microscópicas de los extremos fracturados de las probetas una vez finalizado el ensayo. Estas observaciones permiten examinar de forma cualitativa la morfología de la rotura y obtener información adicional sobre el tipo de fractura, la homogeneidad del material y posibles defectos internos asociados al proceso de fabricación aditiva.

Las imágenes obtenidas con el microscopio digital Leica DVM6 muestran, de forma consistente en la mayoría de las configuraciones, superficies de rotura limpias y sin signos evidentes de deformación plástica, lo que es indicativo de un comportamiento frágil. Este tipo de rotura es característico de materiales duros y poco tenaces, como los aceros tratados térmicamente o sinterizados tras fabricación aditiva.

En probetas fabricadas con relleno sólido, se aprecia una mayor uniformidad en la superficie de fractura, sin grandes irregularidades o zonas de colapso diferenciado. Por el contrario, en probetas con relleno tipo gyroid o triangular, se observan regiones internas

huecas o parcialmente colapsadas, que indican cómo el tipo de relleno influye en la propagación de la grieta durante el ensayo.

También se aprecian ciertas diferencias según la orientación de impresión. En configuraciones orientadas a 45 grados, algunas fracturas parecen seguir planos de menor resistencia, posiblemente relacionados con las capas de deposición, lo que sugiere un comportamiento anisotrópico del material.

Estas observaciones refuerzan la conclusión de que tanto el patrón de relleno como la orientación de impresión afectan no solo a las propiedades mecánicas cuantitativas, sino también al modo en que las piezas fallan bajo sollicitación de flexión.

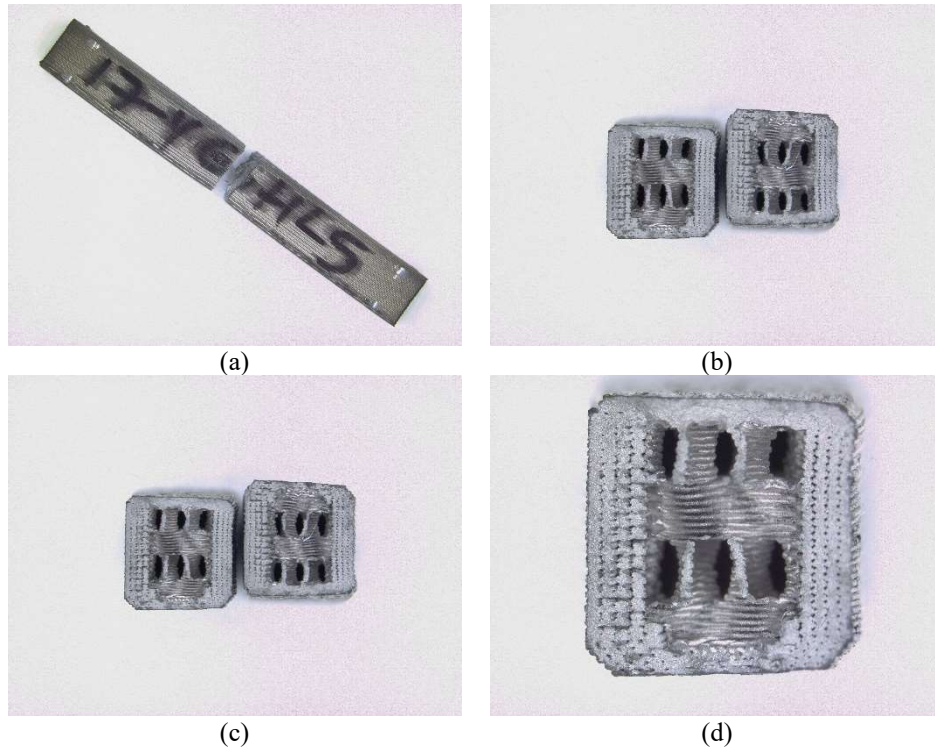


Figura 54. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración 17-4GHL, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia).

La Figura 54 muestra una de las probetas tras el ensayo de flexión, permitiendo observar directamente la fractura y parte de la estructura interna. En la imagen se aprecia una rotura limpia en la zona central de la probeta, sin presencia de deformación plástica apreciable, lo que es indicativo de un comportamiento frágil. Este tipo de fallo es característico de materiales metálicos endurecidos, como los utilizados en este estudio, especialmente tras el proceso de sinterizado propio de la tecnología ADAM.

Asimismo, se observan detalles del patrón de relleno interno. En este caso concreto, correspondiente a la configuración 17-4GHL (17-4 PH, Gyroid, Horizontal lateral), la estructura tipo gyroid queda expuesta, lo que permite identificar la existencia de zonas parcialmente huecas y la posible ruta seguida por la fractura a través de los puntos de menor sección. Esta visualización respalda la influencia del tipo de relleno en el mecanismo de rotura, ya que configuraciones no macizas tienden a generar trayectorias de propagación menos homogéneas y mayor dispersión en los resultados.

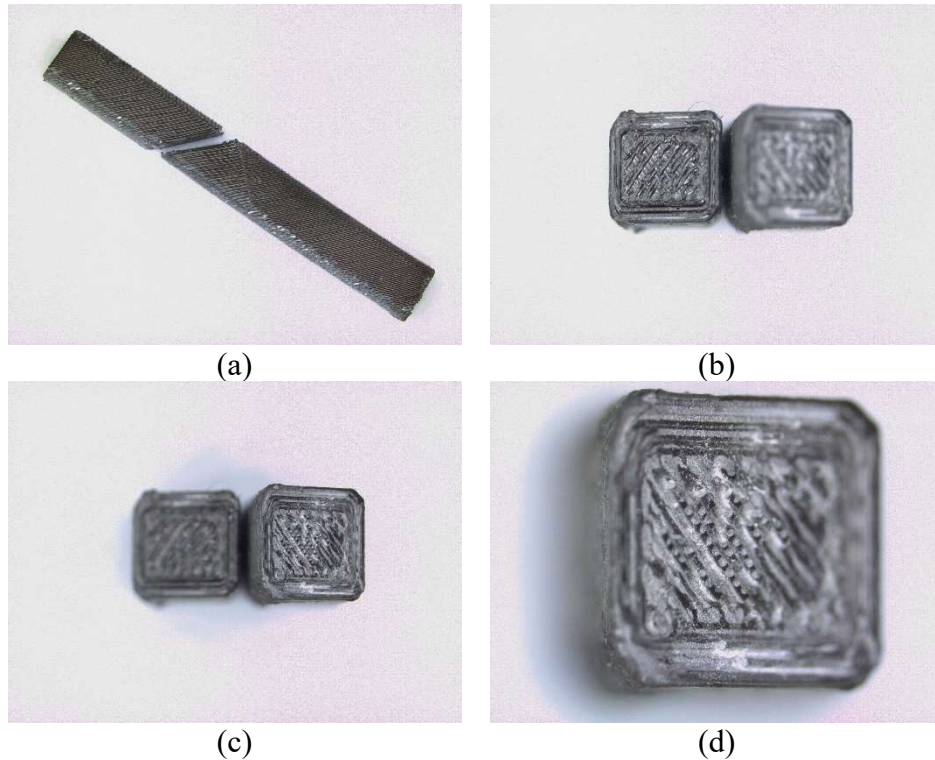


Figura 55. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración 17-4S45, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia).

La Figura 55 muestra otra probeta sometida a ensayo de flexión, correspondiente a la configuración 17-4S45 (17-4 PH, Solid, 45 grados). De forma similar a lo observado en la figura anterior, se aprecia una fractura en la zona central de la probeta alargada, sin presencia de deformación plástica visible, lo cual es indicativo de un comportamiento frágil del material, como cabe esperar en aleaciones metálicas endurecidas y sinterizadas.

Un aspecto especialmente relevante en esta probeta es que la fractura parece haberse producido por separación entre capas de impresión, lo que sugiere un fallo por delaminación. Este fenómeno pone de manifiesto la influencia de la orientación de las capas depositadas durante la impresión 3D, especialmente en configuraciones inclinadas como la utilizada en esta probeta. La interfaz entre capas puede actuar como plano de debilidad estructural, favoreciendo la propagación de grietas en esa dirección y reduciendo la resistencia global frente a esfuerzos de flexión.

Además, en la imagen pueden observarse cortes transversales de la probeta que permiten identificar la disposición de las capas internas, lo que confirma visualmente que el material tiene un comportamiento diferente según la dirección, debido al proceso de fabricación por capas. Aunque el relleno es sólido, la geometría de deposición a 45° introduce discontinuidades internas que pueden comprometer la cohesión entre capas y reducir la tenacidad frente a esfuerzos perpendiculares a las mismas.

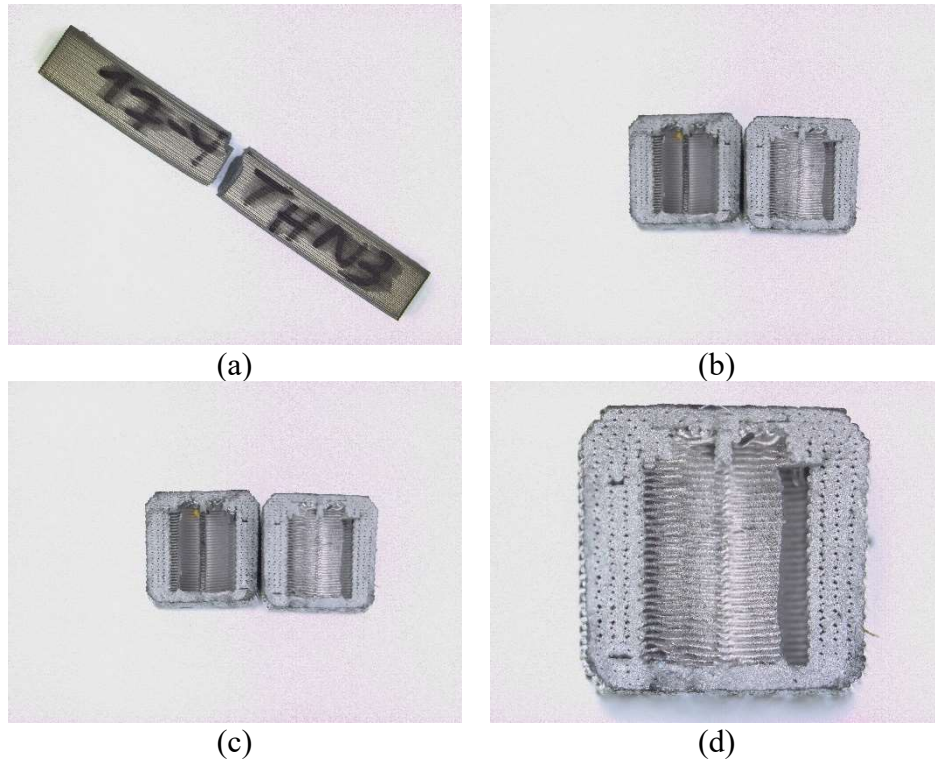


Figura 56. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración 17-4THN, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia).

La Figura 56 muestra el aspecto de una probeta tras ser sometida al ensayo de flexión, correspondiente a la configuración 17-4THN (17-4 PH, Triangular, Horizontal normal), fabricada con orientación horizontal normal y patrón de relleno triangular. La fractura observada es limpia y localizada en la zona central, sin signos visibles de deformación plástica, lo que indica nuevamente un comportamiento predominantemente frágil, en línea con lo observado en el resto de las probetas.

Los cortes laterales permiten observar con claridad el patrón de relleno triangular utilizado en esta configuración. Esta distribución geométrica puede dar lugar a zonas con menor capacidad de soporte, que influyen en la propagación de la grieta durante el ensayo. Aunque no se aprecian grandes colapsos internos, sí se identifican huecos propios del patrón, que ayudan a interpretar la forma en que la rotura se ha desarrollado.

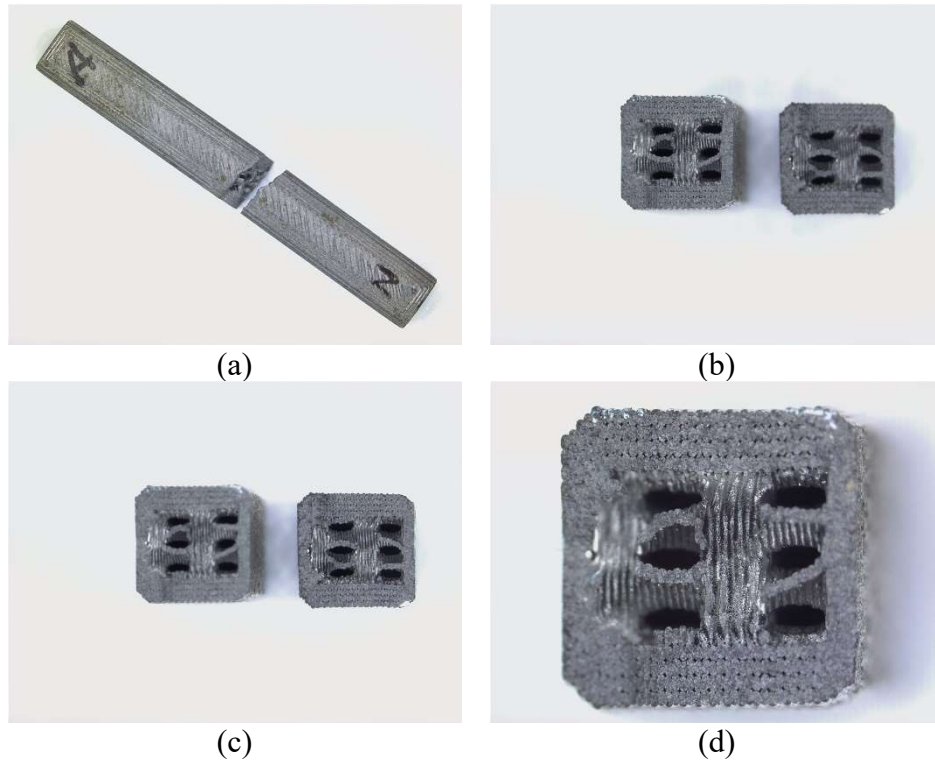


Figura 57. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración AGHN, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia).

En la Figura 57 se puede observar que la fractura, centrada y limpia, carece de signos de deformación plástica, lo que confirma un comportamiento claramente frágil, en línea con lo observado en otras probetas fabricadas con aceros endurecidos por precipitación. La configuración 17-4GHL (17-4 PH, Gyroid, Horizontal lateral), correspondiente al acero inoxidable 17-4 PH con relleno tipo gyroid y orientación horizontal lateral, ofrece una disposición interna que, si bien favorece cierta estabilidad geométrica, presenta trayectorias preferentes de propagación de grietas entre capas debido a la naturaleza anisotrópica del proceso ADAM.

La vista ampliada de la estructura interna permite apreciar el entramado característico del patrón gyroid, así como posibles irregularidades de sinterizado o pequeñas porosidades que podrían actuar como puntos de iniciación de la rotura. Esta observación refuerza la necesidad de considerar la interacción entre relleno, orientación de impresión y material base a la hora de diseñar componentes para aplicaciones donde las sollicitaciones mecánicas sean críticas.

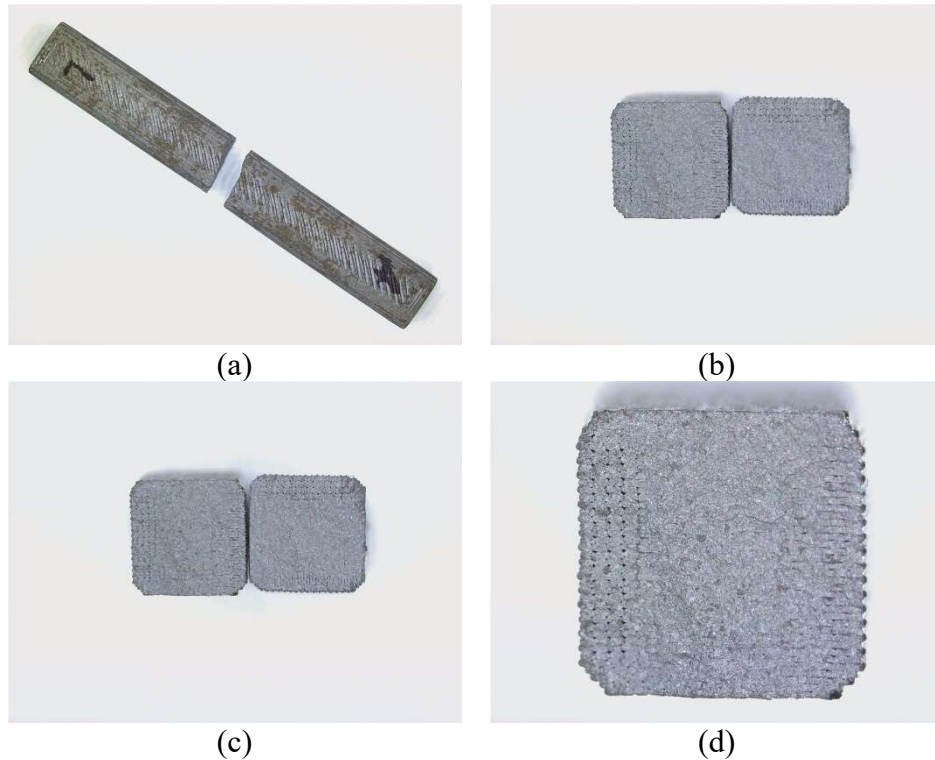


Figura 58. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración ASHL, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia).

En la Figura 58 se muestran los dos fragmentos de la probeta correspondientes a la configuración ASHL (A2, Solid, Horizontal lateral) tras ser sometidas al ensayo de flexión. Ambas presentan fracturas netas y localizadas, sin evidencia visible de deformación plástica, lo que refuerza el patrón de comportamiento frágil observado en este tipo de materiales y configuraciones de fabricación.

La configuración ASHL (A2, Solid, Horizontal lateral) se corresponde con un material A2, relleno sólido y orientación de impresión horizontal lateral. Esta orientación tiende a generar estructuras con buena continuidad entre capas, lo que puede favorecer una resistencia mecánica relativamente elevada, aunque en este caso se sigue observando un fallo frágil típico de materiales fabricados aditivamente con alta dureza y baja tenacidad.

Los fragmentos cuadrados situados a la derecha de la imagen muestran detalles de la estructura interna de las probetas, revelando el patrón de relleno empleado y posibles irregularidades asociadas al proceso de sinterizado. La visualización de estas secciones complementa el análisis mecánico al proporcionar información sobre cómo la configuración interna puede influir en el comportamiento frente a flexión.

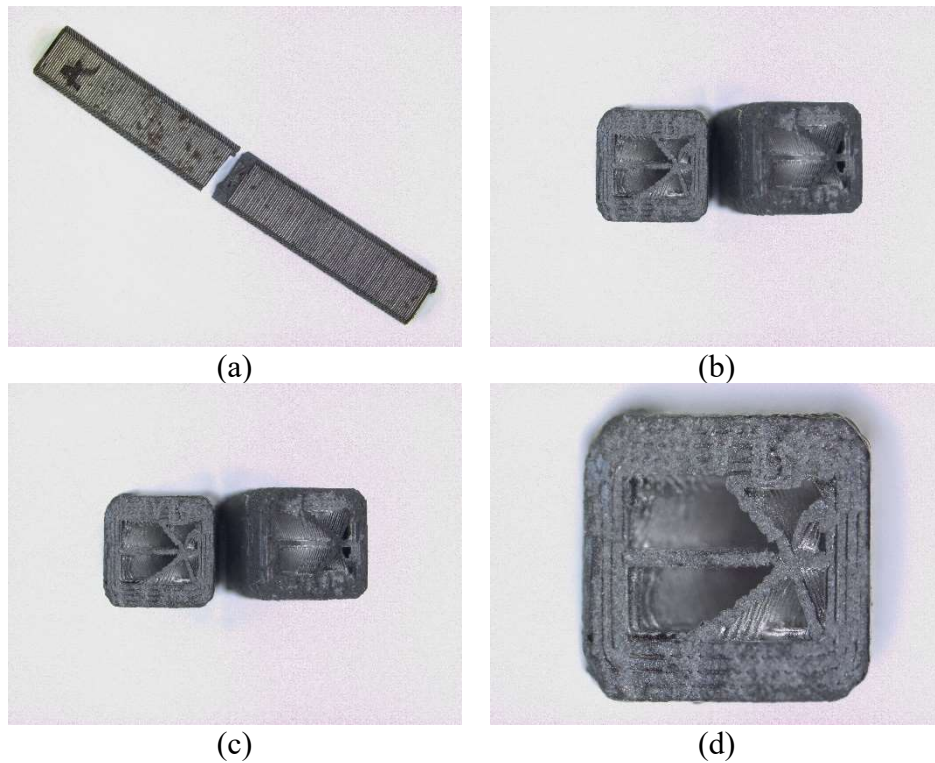


Figura 59. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración AT45, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia).

En esta imagen (Figura 59) se muestran dos probetas correspondientes a la configuración AT45 (A2, Triangular, 45 grados) tras ser sometidas al ensayo de flexión. Al igual que en los casos anteriores, ambas presentan una fractura limpia y localizada, sin signos evidentes de deformación plástica, lo que confirma nuevamente el comportamiento frágil predominante en los materiales ensayados.

La configuración AT45 (A2, Triangular, 45 grados) se basa en acero H13 con patrón de relleno tipo triangular y orientación de impresión a 45 grados. A pesar de tratarse de una configuración con buena distribución de capas, el tipo de relleno genera zonas internas menos compactas que podrían facilitar trayectorias preferentes para la propagación de grietas. Este efecto puede observarse en la rotura centrada y simétrica de las probetas alargadas.

Las secciones cuadradas presentadas junto a las probetas fracturadas permiten analizar en detalle la estructura interna del material. Se aprecia el patrón de relleno tipo malla y la continuidad de las capas, lo que permite relacionar directamente la morfología interna con el modo de fractura. La repetición de estas vistas refuerza la consistencia del modo de fallo dentro de una misma configuración, además de revelar ligeras variaciones locales en la fractura que podrían estar asociadas a micro defectos o irregularidades en el relleno.

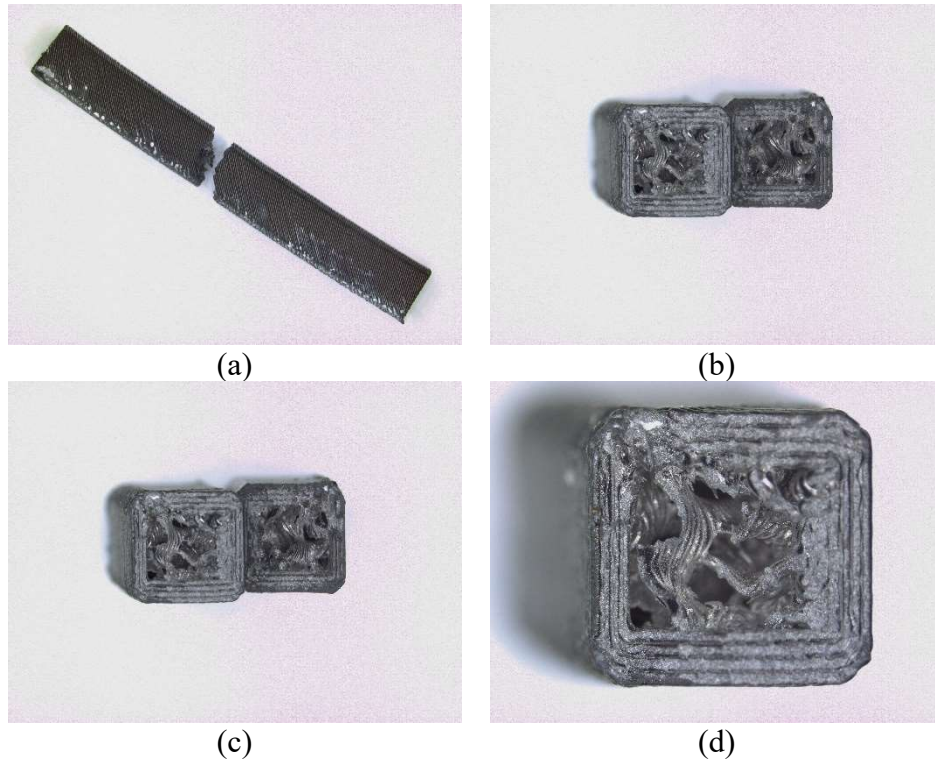


Figura 60. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración HG45, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia).

La Figura 60 muestra los resultados del ensayo de flexión para la configuración HG45 (H13, Gyroid, 45 grados), correspondiente a probetas fabricadas con acero H13, relleno tipo gyroid y orientación de impresión a 45 grados. Las fracturas observadas son limpias y sin evidencia de deformación plástica, lo que confirma un comportamiento frágil, característico de este material tras el proceso de sinterizado. La geometría interna, visible en las secciones transversales, revela el patrón de relleno tipo gyroid, cuya presencia de huecos regulares influye en la trayectoria de propagación de la grieta.

La orientación de impresión a 45 grados parece favorecer la aparición de planos de menor resistencia, posiblemente relacionados con las capas de deposición, lo que sugiere un comportamiento heterogéneo del material. Ambas muestran fracturas consistentes en su forma y localización, lo que indica una respuesta reproducible dentro de esta configuración, reforzando la influencia conjunta del tipo de relleno y la orientación sobre el modo de fallo bajo flexión.

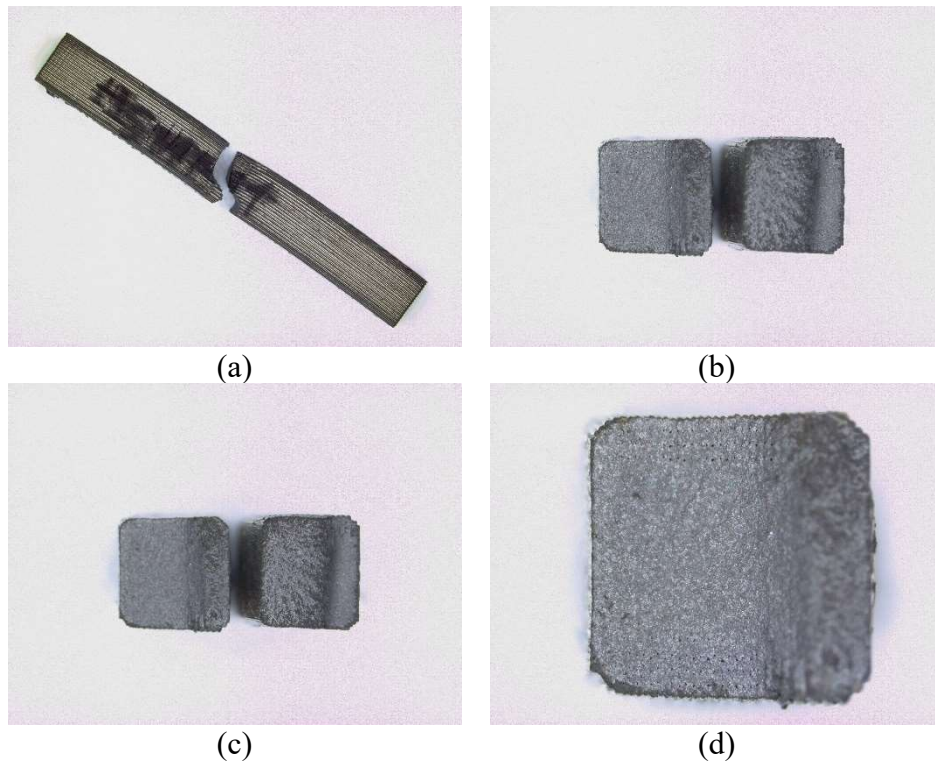


Figura 61. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración HSHN, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia).

La Figura 61 muestra el resultado del ensayo de flexión para la configuración HSHN (H13, Solid, Horizontal normal), correspondiente a una probeta fabricada en acero H13, con relleno sólido y orientación de impresión horizontal normal. La fractura observada es limpia, centrada y sin presencia de deformación plástica visible, lo que indica un comportamiento frágil, en línea con lo observado en otras configuraciones fabricadas mediante tecnología aditiva con sinterizado. Esta respuesta es coherente con las propiedades del acero H13, cuya alta dureza y baja tenacidad, especialmente tras tratamientos térmicos, favorecen este tipo de rotura.

Las secciones transversales presentadas permiten observar la morfología interna sólida de la pieza, sin estructuras geométricas de relleno como las vistas en configuraciones gyroid o triangular. La continuidad del material a lo largo del volumen refuerza la resistencia estructural, aunque no impide la aparición de fractura frágil, lo que sugiere que la naturaleza del material y su procesamiento tienen un rol más determinante que el patrón de relleno en este caso. Esta configuración sirve como referencia para contrastar el efecto del relleno frente a la orientación de impresión en el comportamiento mecánico de las piezas.

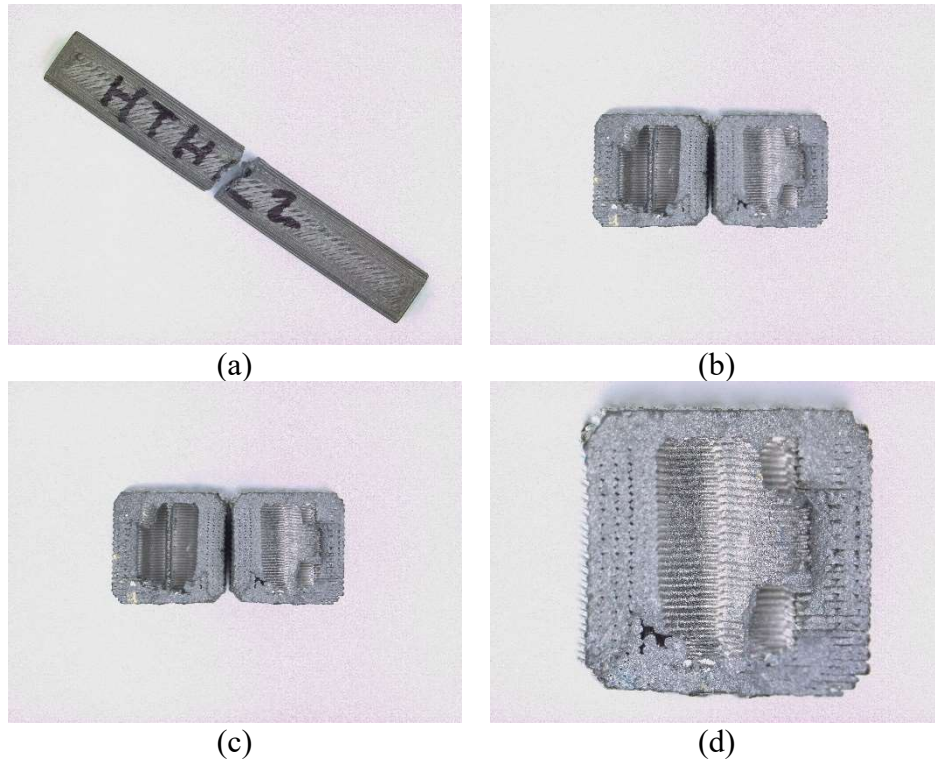


Figura 62. Resultado del ensayo de flexión de la probeta con la configuración HTHL, a) Vista superior de la probeta tras la fractura. b) Vista frontal, enfoque en la mitad izquierda. c) Vista frontal, enfoque en la mitad derecha. d) Vista detallada del interior, mostrando la estructura de relleno (Elaboración propia).

La Figura 62 muestra el resultado del ensayo de flexión para la configuración HTHL (H13, Triangular, Horizontal lateral), correspondiente a una probeta fabricada en acero H13, con patrón de relleno triangular y orientación de impresión horizontal lateral. La fractura observada es limpia, sin signos visibles de deformación plástica, lo que confirma el comportamiento frágil del material, en línea con lo reportado para el acero H13 tras procesos de sinterizado. Este tipo de rotura, ya observado en otras configuraciones, se mantiene como una constante en este estudio, reforzando la relación entre la fabricación aditiva de metales y su limitada capacidad de deformación antes del fallo.

Las secciones transversales permiten observar con claridad el entramado triangular interno, cuya geometría condiciona la trayectoria de la grieta durante el ensayo. Es posible identificar zonas huecas y colapsadas en puntos de menor sección, típicamente en los vértices de las celdas o en las uniones entre capas. La orientación horizontal lateral influye directamente en cómo se distribuyen las tensiones y en la forma en que el material falla, al introducir planos de menor cohesión estructural que pueden favorecer la propagación de la grieta a lo largo de las interfaces de deposición. Esta configuración destaca el papel combinado del tipo de relleno y de la orientación de impresión como factores críticos en la respuesta mecánica de las piezas fabricadas mediante tecnologías aditivas metálicas.

Las observaciones microscópicas confirman un comportamiento frágil en todas las probetas, con fracturas limpias y sin deformación plástica visible. La morfología interna, visible en las secciones transversales, revela cómo el tipo de relleno (sólido, gyroid o triangular) y la orientación de impresión (normal, lateral o a 45°) afectan la propagación de la grieta. En particular, los rellenos no macizos y las orientaciones inclinadas introducen zonas de debilidad que favorecen trayectorias de fractura menos homogéneas. Estos resultados cualitativos complementan el análisis mecánico, evidenciando la influencia directa de los parámetros de fabricación aditiva en el modo de fallo.

4.4.2 Cavidades generadas por los ensayos de dureza

Además de los valores cuantitativos obtenidos durante los ensayos de dureza, se han realizado observaciones microscópicas de las huellas dejadas por el indentador en la superficie de las probetas. Estas imágenes permiten analizar la morfología de las cavidades generadas, así como detectar posibles irregularidades superficiales derivadas del proceso de fabricación.

El análisis se ha centrado exclusivamente en las probetas con relleno sólido, que presentan una mayor homogeneidad estructural y son, por tanto, las más representativas para el estudio cualitativo. Las imágenes fueron capturadas mediante el microscopio digital Leica DVM6, centrando la observación en las zonas donde se aplicó el ensayo de dureza.

Las cavidades observadas muestran formas bien definidas y simétricas, con bordes nítidos, lo que es coherente con la naturaleza compacta de estas configuraciones. En algunos casos, se aprecia una leve deformación plástica en la periferia de la indentación, más acusada en aquellas configuraciones con valores de dureza inferiores, como ocurre en ciertas muestras de acero 17-4 PH ensayadas con el método HRD.

Estas imágenes complementan el análisis numérico de apartados anteriores y aportan una confirmación visual del efecto que tiene tanto la composición del material como su estructura interna en la respuesta frente al ensayo de dureza.

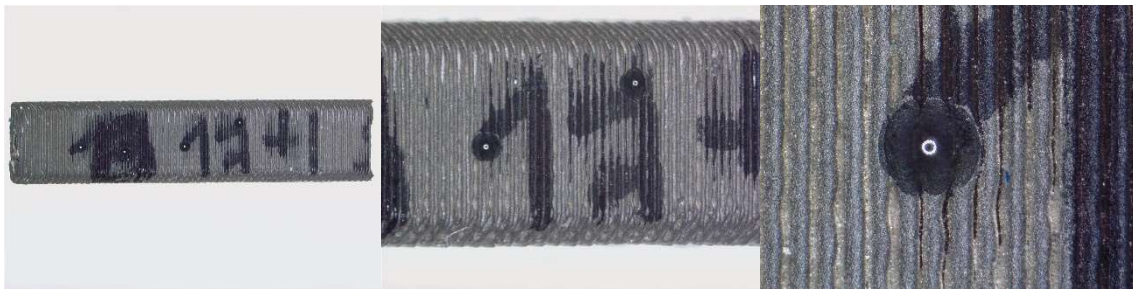


Figura 63. Cavidades generadas por el ensayo de dureza en probetas de 17-4 PH con relleno sólido (Elaboración propia).

En la Figura 63, se presentan imágenes microscópicas de las cavidades dejadas por el indentador en las probetas de acero 17-4 PH fabricadas con relleno sólido. Las huellas son fácilmente identificables y muestran una morfología nítida, aunque con cierta deformación del material circundante, especialmente visible en la imagen de la derecha. Esta deformación periférica podría atribuirse a la menor dureza superficial de este material frente al resto de aceros analizados.

Cabe destacar que, debido a los bajos valores de dureza obtenidos inicialmente, no fue posible realizar el ensayo empleando la escala Rockwell C (HRC), por lo que se recurrió al método Rockwell D (HRD), más adecuado para materiales con menor resistencia superficial. Este cambio de método es relevante a la hora de comparar los resultados, ya que, aunque ambas escalas permiten evaluar la dureza, no son directamente equivalentes.

Estas observaciones permiten confirmar visualmente la respuesta más blanda del 17-4 PH frente a la penetración, incluso con una configuración de relleno maciza, y refuerzan lo descrito en el apartado 4.3 en cuanto a la menor dureza media registrada para este acero.



Figura 64. Cavidades generadas por el ensayo de dureza en probetas de A2 con relleno sólido (Elaboración propia).

Las imágenes recogidas en la Figura 64 corresponden a probetas fabricadas en acero A2 con patrón de relleno sólido. Las cavidades generadas por el ensayo de dureza presentan buena simetría y márgenes definidos, con una mínima alteración de la superficie circundante. Este comportamiento es consistente con los elevados valores de dureza obtenidos para este material y su estructura interna más homogénea.

El uso de relleno sólido ha favorecido una distribución uniforme de la carga durante el ensayo, evitando deformaciones localizadas o colapsos en puntos débiles, como sí se ha observado en configuraciones con relleno abierto. Esto refuerza la validez de este tipo de configuración como referencia en los análisis comparativos de dureza.



Figura 65. Cavidades generadas por el ensayo de dureza en probetas de H13 con relleno sólido (Elaboración propia).

La Figura 65 muestra las cavidades dejadas por el indentador en probetas de acero H13 fabricadas con relleno sólido. En todas las imágenes se observa una morfología muy bien definida, con contornos precisos y sin alteraciones visibles en el entorno inmediato de la huella. Este resultado es característico de materiales de alta dureza, como el H13 sinterizado, y evidencia una buena resistencia localizada al impacto.

Las probetas analizadas muestran una respuesta muy homogénea, sin signos de deformación interna, lo que sugiere que tanto el material como el patrón de fabricación han proporcionado una estructura sólida y coherente, favorable para aplicaciones que requieran una elevada resistencia superficial.

En definitiva, las observaciones microscópicas de las cavidades generadas por el ensayo de dureza refuerzan las conclusiones obtenidas a partir de los valores medidos. Las diferencias en la morfología y el entorno de las huellas permiten identificar variaciones sutiles en la respuesta de cada aleación, asociadas tanto a su dureza intrínseca como a la estructura generada por la fabricación aditiva. Estos resultados cualitativos aportan una visión complementaria que contribuye a una comprensión más completa del comportamiento superficial de las probetas analizadas.

4.5 Estudio estadístico de los resultados

Con el objetivo de analizar de forma cuantitativa la influencia de los factores de diseño sobre la resistencia a flexión y la dureza, se llevó a cabo un estudio estadístico mediante

un modelo de regresión lineal múltiple. Esta herramienta permite evaluar el efecto individual y combinado de las variables de entrada —material, patrón de relleno y orientación de impresión— sobre las respuestas mecánicas obtenidas, proporcionando una visión más completa del comportamiento estructural de las piezas fabricadas aditivamente.

4.5.1 Resistencia a flexión

4.5.1.1 Modelo de regresión lineal

Para evaluar la influencia de los factores de diseño sobre la resistencia a flexión, se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple considerando como variables independientes el material, el tipo de relleno y la orientación de impresión. La ecuación de regresión se muestra en la ecuación (5).

$$\begin{aligned}
 \text{RESISTENCIA A FLEXIÓN (MPa)} = & 179 + 0,0 \text{ MATERIAL_17-4 PH} + 24 \text{ MATERIAL_A2} \\
 & + 693 \text{ MATERIAL_H13} + 0,0 \text{ FILL TYPE_GYROID} \\
 & + 593 \text{ FILL TYPE_SOLID} + 230 \text{ FILL TYPE_TRIANGULAR} \\
 & + 0,0 \text{ ORIENTATION_45 DEG} + 779 \text{ ORIENTATION_LATERAL} \\
 & + 964 \text{ ORIENTATION_NORMAL}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Para evaluar la bondad del ajuste del modelo, el software proporciona el valor estadístico R², que indica el grado de variación de la variable dependiente del modelo. En este caso, se obtuvo un valor R² = 0,9172, lo que representa un muy buen ajuste del modelo a los datos experimentales. Este resultado sugiere que el 91,72 % de la variabilidad en la resistencia a flexión puede explicarse mediante la combinación de los factores de diseño analizados.

4.5.1.2 Análisis de varianza (ANOVA)

En la tabla ANOVA para la resistencia a flexión (Tabla 17) se presentan los resultados del análisis para evaluar los factores incluidos en el modelo: material, tipo de relleno y orientación. Los valores p asociados a cada factor son mayores que el nivel de significancia convencional de 0.05 (Material: 0.228, Relleno: 0.338, Orientación: 0.149), lo que indica que no se puede afirmar que estos factores tengan un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a flexión con el conjunto de datos analizado.

Aunque el modelo en su conjunto muestra una buena capacidad explicativa (R² ajustado alto), la falta de significancia individual podría deberse a un tamaño de muestra reducido o a la variabilidad inherente en las mediciones. Por lo tanto, se recomienda aumentar el número de repeticiones para confirmar estos resultados y fortalecer el análisis.

Tabla 17. Tabla ANOVA resistencia a flexión (Elaboración propia).

| FUENTE | GL | SC AJUST. | MC AJUST. | VALOR F | VALOR P |
|-------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Regresión | 6 | 3034702 | 505784 | 3,69 | 0,228 |
| MATERIAL | 2 | 928069 | 464035 | 3,39 | 0,228 |
| FILL TYPE | 2 | 536580 | 268290 | 1,96 | 0,338 |
| ORIENTATION | 2 | 1570053 | 785026 | 5,73 | 0,149 |
| Error | 2 | 274089 | 137045 | | |
| Total | 8 | 3308791 | | | |

4.5.1.3 Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto (Figura 66) facilita la identificación de los factores que tienen mayor impacto en la variabilidad de la respuesta. La línea de referencia en el gráfico

señala el umbral a partir del cual un efecto puede considerarse estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0,05$).

En este caso, ninguno de los factores supera la línea de referencia, lo que implica que no presentan efectos estadísticamente significativos de forma individual sobre la resistencia a flexión, al menos con el conjunto de datos disponible. Sin embargo, entre ellos, la orientación de impresión muestra el mayor efecto estandarizado, seguida del material y, en último lugar, del tipo de relleno.

Aunque estos resultados deben interpretarse con cautela debido al tamaño muestral, refuerzan las tendencias observadas en otros análisis del estudio, sugiriendo que estos factores sí tienen un impacto técnico sobre la resistencia mecánica, aunque no alcanzan significación estadística en este modelo. Para validar estos efectos con mayor robustez, se recomienda aumentar el número de repeticiones experimentales en estudios futuros.

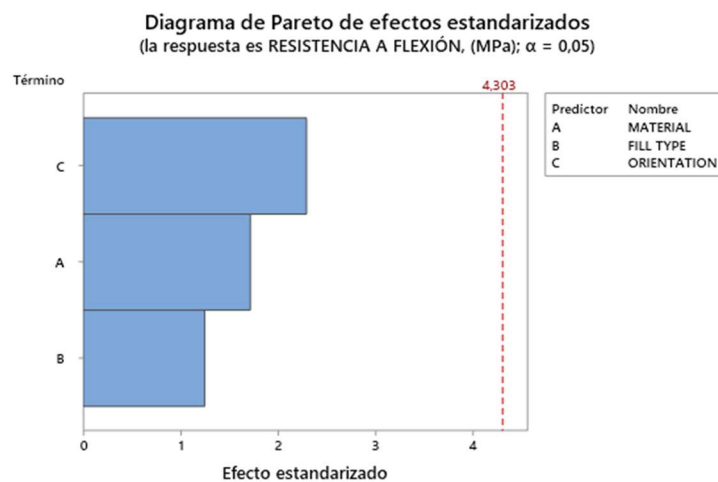


Figura 66. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la resistencia a flexión.

4.5.1.4 Gráfica de efectos principales

En la gráfica de efectos principales de la Figura 67, se analiza la influencia de los tres factores de diseño considerados en este estudio —material, tipo de relleno y orientación de impresión— sobre la tensión máxima a flexión alcanzada por las probetas. Esta representación permite observar de forma clara cómo varía la respuesta mecánica en función de cada variable, facilitando la identificación de aquellas configuraciones que conducen a un mejor rendimiento estructural.

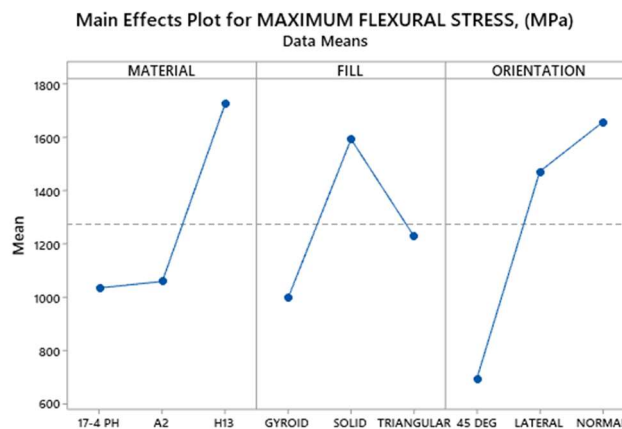


Figura 67. Gráfica de efectos principales tensión máxima a flexión.

El material que presenta un mejor comportamiento frente a carga de flexión es el H13, mostrando valores notablemente superiores a los del A2 y, especialmente, al 17-4 PH, que registra las menores tensiones máximas. Este resultado puede atribuirse a las propiedades mecánicas intrínsecas del H13, que posee mayor dureza y resistencia estructural, características que favorecen su rendimiento en condiciones de flexión.

En cuanto al tipo de relleno, se observa una influencia significativa, siendo el relleno sólido el que proporciona una mayor resistencia, seguido del patrón triangular y, en último lugar, el patrón gyroid. Esto se debe a que una estructura interna más densa y continua en el caso del relleno sólido, permite una mejor distribución de tensiones y reduce la aparición de zonas críticas de concentración de esfuerzos.

Por último, la orientación de impresión también afecta notablemente al comportamiento de las probetas. La orientación normal es la que muestra una mayor resistencia a flexión, seguida de la lateral, mientras que la orientación a 45° da lugar a los valores más bajos. Esta tendencia puede explicarse por el efecto de la anisotropía derivada del proceso de fabricación aditiva, ya que la orientación de las capas influye directamente en la dirección y la forma en que se propagan las grietas durante el ensayo.

4.5.1.5 Gráficas de contorno

En la Figura 68 se analiza cómo varía la resistencia máxima a flexión en función de pares de factores de diseño, a través de líneas de contorno. Este tipo de representación permite identificar combinaciones óptimas entre material, tipo de relleno y orientación de impresión, así como comprender de forma visual las interacciones más relevantes que afectan al comportamiento mecánico de las piezas fabricadas.

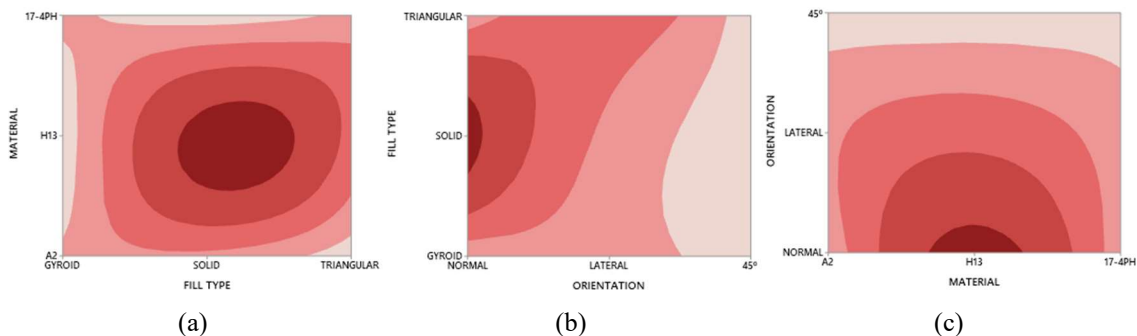


Figura 68. Gráficas de contorno – Resistencia a flexión. a) Material vs. Fill type, b) Fill type vs Orientation, c) Orientation vs. Material.

En la figura (a), que relaciona el material y el tipo de relleno, se observa que las combinaciones que incluyen el acero H13 junto con un relleno sólido o triangular conducen a los mayores niveles de resistencia, superando ampliamente a las configuraciones con los aceros A2 o 17-4 PH. Esto sugiere que el H13 presenta un comportamiento superior frente a cargas de flexión, especialmente cuando se emplea un patrón de relleno estructuralmente eficiente.

En la figura (b), que representa la interacción entre el tipo de relleno y la orientación de impresión, se aprecia que los valores más elevados de resistencia se alcanzan con relleno sólido y orientación horizontal normal. Esta combinación favorece una transmisión más efectiva de la carga, ya que la dirección de las capas impresas está alineada con la dirección principal del esfuerzo, minimizando las zonas de debilidad entre capas.

Por último, en la figura (c), que muestra la relación entre orientación y material, se confirma nuevamente el buen comportamiento del acero H13 que, en combinación con la

orientación horizontal normal, alcanza las máximas resistencias a flexión. Este comportamiento pone de manifiesto la importancia tanto del material como de la orientación de impresión en la optimización del rendimiento mecánico de las piezas fabricadas mediante impresión 3D metálica.

4.5.2 Dureza

4.5.2.1 Modelo de regresión lineal

Para estudiar la influencia de los factores de diseño sobre la dureza de las piezas, se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple, tomando como variables independientes el material, el tipo de relleno y la orientación de impresión. La expresión resultante se muestra en la ecuación (6).

$$\begin{aligned} \text{DUREZA} = & 34,89 + 0,0 \text{ MATERIAL_17-4 PH} + 16,67 \text{ MATERIAL_A2} + 7,70 \text{ MATERIAL_H13} \\ & + 0,0 \text{ FILL TYPE_GYRÖID} - 9,19 \text{ FILL TYPE_SOLID} \\ & - 17,24 \text{ FILL TYPE_TRIANGULAR} \\ & + 0,0 \text{ ORIENTATION_45 DEG} - 3,03 \text{ ORIENTATION_LATERAL} \\ & - 0,49 \text{ ORIENTATION_NORMAL} \end{aligned} \quad (6)$$

En cuanto a la bondad del ajuste, el modelo presenta un valor de $R^2 = 89,08 \%$, lo que sugiere que los factores seleccionados explican una gran parte de la variabilidad en los datos. Sin embargo, el R^2 ajustado baja hasta $56,34 \%$, lo que apunta a un posible sobreajuste del modelo o a una influencia limitada de algunas variables sobre la respuesta.

4.5.2.2 Análisis de varianza (ANOVA)

En la tabla ANOVA para la dureza (Tabla 18), se presentan los resultados del análisis para evaluar la influencia de los factores de diseño: material, tipo de relleno y orientación de impresión. Los valores p asociados a cada factor son todos superiores al nivel de significancia estándar de 0,05, lo que indica que, con el conjunto de datos actual, no se puede afirmar que ninguno de los factores tenga un efecto estadísticamente significativo sobre la dureza de las probetas.

A pesar de ello, se observa que el tipo de material y el tipo de relleno presentan valores F relativamente más altos (3,87 y 4,14 respectivamente), en comparación con la orientación de impresión (0,15), lo que sugiere que estos dos factores podrían tener cierta influencia práctica, aunque no alcanzan significancia estadística. En cambio, la orientación parece no tener apenas impacto sobre la dureza.

La ausencia de significancia estadística puede atribuirse, al igual que en otros casos, al reducido tamaño de la muestra y a la posible variabilidad inherente en los ensayos. Se recomienda ampliar el número de repeticiones por configuración para mejorar la robustez del análisis y confirmar estas tendencias.

Tabla 18. Tabla ANOVA dureza (Elaboración propia).

| FUENTE | GL | SC AJUST. | MC AJUST. | VALOR F | VALOR P |
|-------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Regresión | 6 | 880,20 | 146,700 | 2,72 | 0,293 |
| MATERIAL | 2 | 417,69 | 208,846 | 3,87 | 0,205 |
| FILL TYPE | 2 | 446,65 | 223,326 | 4,14 | 0,195 |
| ORIENTATION | 2 | 15,86 | 7,928 | 0,15 | 0,872 |
| Error | 2 | 107,85 | 53,926 | | |
| Total | 8 | 988,05 | | | |

4.5.2.3 Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto de efectos estandarizados (Figura 69) permite visualizar la magnitud relativa del efecto de cada factor de diseño sobre la dureza de las probetas. La línea roja discontinua representa el umbral de significancia estadística ($\alpha = 0,05$), por encima del cual los factores se consideran estadísticamente significativos.

En este caso, ninguno de los factores supera dicho umbral, lo que concuerda con los resultados obtenidos en el análisis de varianza (ANOVA). Sin embargo, se aprecia que el tipo de relleno (B) y el material (A) tienen una mayor influencia relativa en comparación con la orientación de impresión (C), cuyo efecto es prácticamente nulo.

Aunque no se alcanzan niveles de significancia estadística, estos resultados sugieren que optimizar el material y el tipo de relleno podría tener un impacto más relevante en la dureza que modificar la orientación de impresión. Nuevamente, sería recomendable aumentar el número de muestras para evaluar con mayor precisión estos efectos.

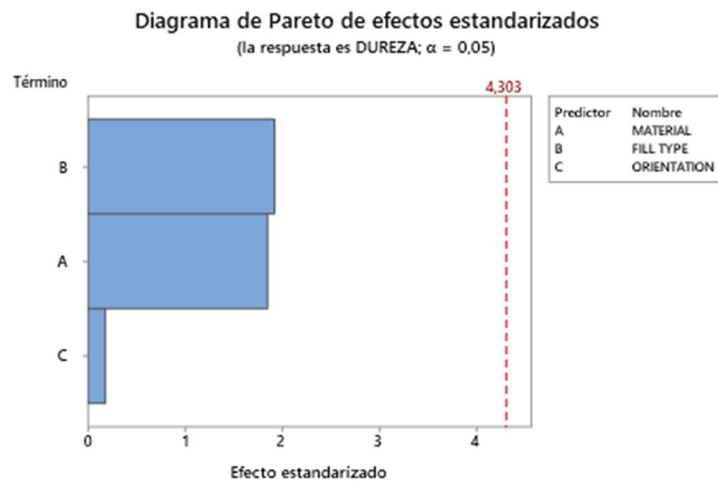


Figura 69. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la dureza.

4.5.2.4 Gráfica de efectos principales

En la Figura 70 se representa la gráfica de efectos principales para la dureza, donde se analiza la influencia de cada uno de los factores de diseño —material, tipo de relleno y orientación de impresión— sobre el valor medio de dureza obtenido en los ensayos. Este tipo de representación permite observar cómo varía la respuesta mecánica en función de cada variable, de forma independiente.

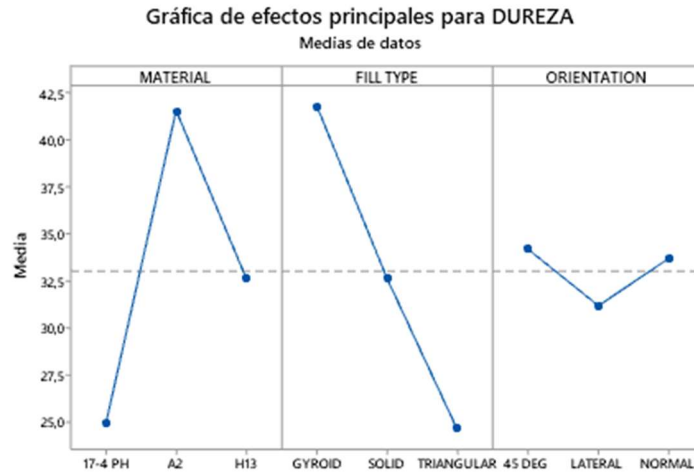


Figura 70. Gráfica de efectos principales – Dureza.

Respecto al material, se observa que el acero A2 presenta los valores más altos de dureza, seguido por el H13, mientras que el 17-4 PH muestra la menor dureza media. Esta tendencia se alinea con las propiedades mecánicas típicas de estos materiales, donde el A2, utilizado habitualmente en aplicaciones que requieren alta resistencia al desgaste, ofrece un mejor desempeño en este aspecto.

En cuanto al tipo de relleno, el patrón gyroid proporciona los mayores valores medios de dureza, seguido por el sólido y, finalmente, el triangular, que presenta la respuesta más baja. Este comportamiento podría atribuirse a la mayor homogeneidad estructural del patrón gyroid, que mejora la distribución de cargas durante el ensayo de dureza.

Por último, al analizar la orientación de impresión, se aprecia que su influencia sobre la dureza es mucho más limitada en comparación con los otros factores. Las diferencias entre las orientaciones son mínimas, aunque se observa una ligera ventaja para la impresión en orientación normal. Esto sugiere que la orientación no afecta significativamente en la dureza superficial de las piezas impresas en 3D con los parámetros analizados.

4.5.2.5 Gráficas de contorno

En la Figura 71 se analizan las variaciones en la dureza de las probetas en función de las interacciones entre pares de factores de diseño: material, tipo de relleno y orientación de impresión. Las gráficas de contorno permiten visualizar de forma clara cómo influyen estas combinaciones al valor de dureza, facilitando la identificación de tendencias generales y regiones de mayor o menor respuesta.

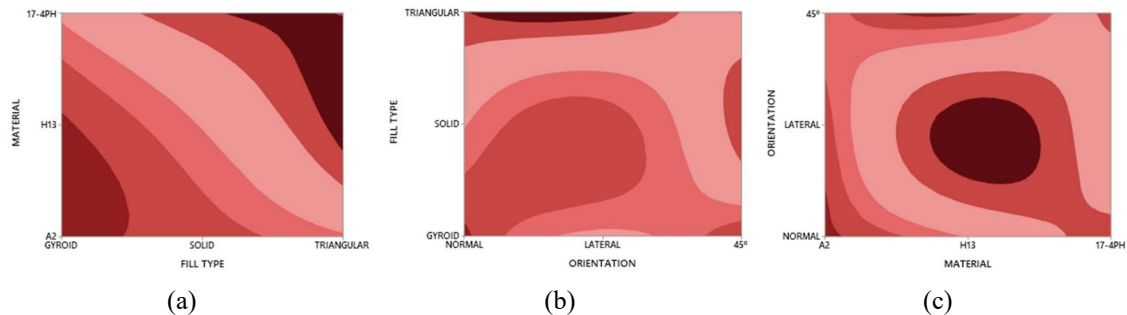


Figura 71. Gráficas de contorno – Dureza. a) Material vs. Fill type, b) Fill type vs. Orientation, c) Orientation vs. Material.

En la figura (a), correspondiente a la interacción entre material y tipo de relleno, se observa que las combinaciones que incluyen el acero A2, especialmente con un relleno tipo gyroid, conducen a los valores de dureza más elevados. Por el contrario, el material 17-4 PH, independientemente del tipo de relleno, presenta los niveles más bajos. El patrón Triangular tiende a estar asociado con valores inferiores de dureza, lo cual podría explicarse por su menor rigidez estructural.

En la figura (b), que muestra la interacción entre tipo de relleno y orientación de impresión, se aprecia que el tipo de relleno ejerce una mayor influencia que la orientación. El patrón Solid destaca como el que ofrece mayor dureza, mientras que el Triangular muestra los valores más bajos en prácticamente todas las orientaciones. Las diferencias entre orientaciones son leves, lo cual concuerda con lo observado en la gráfica de efectos principales.

Por último, la figura (c), que relaciona orientación y material, confirma que el acero A2 proporciona mayores niveles de dureza, independientemente de la orientación utilizada. La orientación normal presenta una ligera ventaja en algunos casos, aunque su influencia global es marginal. El 17-4 PH mantiene los valores más bajos de dureza en todas las configuraciones, lo que reafirma su menor idoneidad para aplicaciones donde esta propiedad es crítica.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones generales

El presente trabajo ha permitido llevar a cabo un estudio sistemático de piezas fabricadas mediante tecnología ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing), con el objetivo de evaluar su comportamiento mecánico en términos de resistencia a la flexión, dureza y respuesta frente a sollicitaciones que puedan provocar fractura o debilitamiento estructural. Para ello, se ha trabajado con tres aceros ampliamente utilizados en la industria —17-4 PH, A2 y H13—, fabricando diferentes configuraciones de probetas que combinan variaciones en el tipo de relleno (Solid, Gyroid y Triangular) y en la orientación de impresión (Normal, 45 grados y Lateral).

Los resultados obtenidos evidencian que la tecnología ADAM permite fabricar piezas metálicas funcionales con buenas propiedades mecánicas, las cuales dependen en gran medida de los parámetros de diseño y fabricación empleados. El análisis conjunto de los ensayos mecánicos, complementado con observaciones microscópicas de las secciones de la rotura de las probetas y huellas de dureza, permite concluir que la homogeneidad interna del material, la orientación de impresión, la continuidad entre capas y la densidad del relleno son factores determinantes en el comportamiento estructural de las piezas. Se ha observado un comportamiento frágil, ausencia de deformación plástica visible y una notable sensibilidad a la orientación de deposición de capas, lo que refuerza la naturaleza anisotrópica del proceso de fabricación aditiva metálica.

El comportamiento observado, caracterizado por fracturas limpias y ausencia de deformación plástica, refuerza la naturaleza frágil y anisotrópica de las piezas obtenidas por ADAM. No obstante, cabe señalar que aceros como el 17-4 PH, que presentan un mejor comportamiento dúctil en condiciones forjadas o mecanizadas, podrían verse penalizados por las particularidades del proceso de sinterizado, lo que sugiere una pérdida parcial de sus propiedades mecánicas originales al ser procesados mediante fabricación aditiva.

Desde el punto de vista metodológico, este trabajo ha consolidado un enfoque integral de caracterización, combinando análisis cuantitativos con observaciones cualitativas, y permitiendo establecer correlaciones entre los valores medidos y la estructura interna de las piezas. Esta aproximación ha sido clave para interpretar adecuadamente los mecanismos de fallo observados y extraer conclusiones relevantes para futuras aplicaciones industriales de esta tecnología.

5.2 Conclusiones particulares sobre los resultados

5.2.1 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión, realizado conforme a la norma ISO 3327:2009, ha puesto de manifiesto diferencias significativas en el comportamiento mecánico de las distintas configuraciones analizadas. En términos generales, las probetas con relleno sólido han mostrado una mayor resistencia media a la rotura. El caso más representativo es el del acero H13, con orientación normal y relleno sólido, que alcanzó una resistencia media de 2659,99 MPa, valor que destaca notablemente sobre el resto.

Las configuraciones con rellenos tipo gyroid o triangular han registrado valores sensiblemente inferiores. Por ejemplo, el acero H13 con relleno gyroid y orientación a 45° alcanzó solo 680,75 MPa, lo que representa una reducción del ~75 % respecto a su versión con relleno sólido. De forma similar, el acero A2 con relleno triangular y orientación 45° mostró una resistencia media de 664,11 MPa, en claro contraste con los

1383,83 MPa obtenidos en configuración sólida y orientación lateral. Esto evidencia el impacto del diseño interno en la capacidad de carga de las piezas fabricadas mediante la tecnología ADAM.

La orientación de impresión también ha demostrado tener un efecto considerable. Las probetas fabricadas en orientación normal, en general, ofrecieron los mejores resultados, como en el caso del H13 con relleno sólido ya mencionado. En contraste, las orientaciones a 45 grados o lateral tienden a reducir la resistencia, probablemente por la menor cohesión entre capas. Esta diferencia puede llegar a ser especialmente marcada, como en el acero 17-4 PH, que presentó una resistencia de 733,07 MPa en orientación 45° con relleno sólido, frente a los 1181,74 MPa obtenidos en orientación normal con relleno triangular, lo que sugiere que incluso el tipo de relleno puede compensar parcialmente los efectos negativos de la orientación.

En cuanto al material, se han identificado diferencias claras. El acero H13 ha mostrado los mejores resultados globales, confirmando su alta resistencia mecánica y buena integridad estructural incluso en configuraciones menos favorables. El acero A2 presenta un rendimiento intermedio, con valores entre 664 y 1383 MPa según la configuración. El acero 17-4 PH, por su parte, ha mostrado un comportamiento más irregular, con resistencias que van desde 733 a 1188 MPa, lo que podría explicarse por una mayor sensibilidad a defectos internos o diferencias en el proceso de sinterizado.

Estos resultados confirman que la resistencia a flexión no depende únicamente del tipo de acero utilizado, sino que se ve fuertemente influida por la interacción entre material, patrón de relleno y orientación de impresión. Esta combinación determina la forma en que se distribuyen las tensiones internas y cómo se inicia y propaga la fractura, condicionando directamente el rendimiento estructural final de la pieza.

5.2.2 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza, realizado mediante el método Rockwell, ha evidenciado variaciones significativas en función del material, el tipo de relleno y la orientación de impresión. En general, el acero H13 ha sido el que ha mostrado los valores más altos de dureza, alcanzando un máximo de 46,26 HRC en la configuración con relleno sólido y orientación normal, seguido muy de cerca por el acero A2 con relleno sólido y orientación lateral, que obtuvo 45,78 HRC. Estas configuraciones presentan una estructura interna densa y homogénea, lo que favorece una mayor resistencia superficial frente al indentador.

El acero A2 ha mostrado una notable variabilidad según la configuración. Mientras que con relleno gyroid y orientación normal registró un valor bajo de 17,51 HRC, con relleno triangular y orientación a 45° alcanzó los 34,52 HRC, lo que refleja una clara influencia del diseño interno y la orientación en la respuesta mecánica superficial.

En cuanto al acero 17-4 PH, los resultados fueron considerablemente inferiores. Las configuraciones con relleno gyroid y orientación lateral, así como la triangular en orientación normal, mostraron durezas en torno a los 20 HRC, muy por debajo del resto de materiales. Algunas configuraciones, como la triangular normal y la sólida a 45°, incluso requirieron el uso del método Rockwell D debido a la baja resistencia al indentador, lo que pone de manifiesto la limitada dureza superficial de este material bajo ciertas condiciones.

Estas diferencias en dureza pueden explicarse tanto por la naturaleza metalúrgica de cada aleación como por la influencia del proceso de sinterizado en la cohesión interna del material. Las configuraciones sólidas tienden a mostrar mayor homogeneidad y menores

discontinuidades, lo que se traduce en una mayor dureza y menor dispersión en los resultados.

En conjunto, los resultados refuerzan la idoneidad del acero H13 para aplicaciones donde se requiera alta resistencia superficial, mientras que el acero 17-4 PH podría necesitar tratamientos térmicos adicionales si se desea mejorar su dureza para usos más exigentes.

5.2.3 Observaciones microscópicas

Las observaciones microscópicas han complementado de forma eficaz los ensayos mecánicos, permitiendo visualizar directamente las zonas de rotura tras el ensayo de flexión y las huellas generadas por el ensayo de dureza. En el caso del ensayo de flexión, las fracturas observadas en todas las probetas han sido limpias y sin signos de deformación plástica, lo cual confirma un comportamiento frágil en todos los materiales y configuraciones.

Se ha podido comprobar que en probetas con relleno tipo gyroid o triangular existen trayectorias de fractura menos homogéneas, influenciadas por la geometría interna y por los huecos entre celdas. En aquellas impresas a 45 grados, algunas fracturas han seguido planos de deposición, indicando una posible delaminación entre capas. Este fenómeno es indicativo de una menor cohesión interlaminar y una marcada anisotropía del material.

En cuanto a las imágenes de las cavidades generadas por el ensayo de dureza, se han registrado huellas bien definidas en todos los casos. Las probetas fabricadas con acero 17-4 PH han mostrado una leve deformación plástica periférica, coherente con su menor dureza. En cambio, en los aceros A2 y H13 las huellas son más simétricas y profundas, lo que refuerza la lectura objetiva del ensayo y su relación con la estructura interna de la pieza.

5.2.4 Tipo de material

El comportamiento mecánico de las piezas ha estado claramente influido por el tipo de acero empleado. El acero H13 ha ofrecido el mejor rendimiento, alcanzando los valores más altos tanto en resistencia a flexión (hasta 2659,99 MPa) como en dureza (46,26 HRC). Le sigue el acero A2, con buenos resultados en ambas propiedades, destacando una resistencia de 1383,83 MPa y una dureza de 45,78 HRC. Por el contrario, el acero 17-4 PH ha mostrado un rendimiento más bajo, con una resistencia máxima de 1188,35 MPa y una dureza de hasta 33,47 HRC, con necesidad de emplear escala Rockwell D en algunas probetas.

Estas diferencias reflejan la influencia de la microestructura de cada aleación y su respuesta al proceso de sinterizado, siendo H13 el más adecuado para aplicaciones de alta exigencia mecánica.

5.2.5 Tipo de relleno

El tipo de relleno ha mostrado una influencia directa en el comportamiento mecánico. Las configuraciones sólidas han alcanzado las mejores prestaciones, con valores máximos de resistencia a flexión de hasta 2659,99 MPa (H13) y dureza de 46,26 HRC. En cambio, los rellenos gyroid y triangular han ofrecido menor rendimiento, con resistencias por debajo de 1200 MPa y durezas más bajas, como los 17,51 HRC registrados en A2 con gyroid.

Aunque los rellenos no macizos reducen el peso, su uso debe ser cuidadosamente evaluado en función de los requerimientos mecánicos del componente.

5.2.6 Tipo de orientación

La orientación de impresión ha sido un factor crítico en el rendimiento estructural. Las probetas fabricadas en orientación normal han mostrado los mejores resultados, con una resistencia de hasta 2659,99 MPa (H13) y durezas superiores a 46 HRC. Por el contrario, las orientaciones a 45 grados o lateral han presentado menor cohesión entre capas, con fracturas que siguen planos de deposición, como se observa en los 733,07 MPa alcanzados por el 17-4 PH en orientación 45°.

Estos resultados refuerzan la importancia de seleccionar adecuadamente la orientación de impresión según las solicitaciones previstas.

5.3 Competencias adquiridas

Durante la realización de este trabajo se ha desarrollado un conjunto significativo de competencias técnicas, analíticas y metodológicas. Se ha adquirido experiencia directa en el uso de equipos de ensayo como la máquina de flexión, el durómetro Rockwell y el microscopio digital, así como en la manipulación de probetas metálicas fabricadas por impresión 3D. También se ha perfeccionado la capacidad de análisis estadístico de datos, interpretación crítica de resultados y correlación entre parámetros estructurales y propiedades mecánicas.

Además, el desarrollo del documento ha permitido fortalecer las competencias de redacción científica, estructuración de contenidos, uso riguroso de bibliografía técnica y presentación visual de resultados. En conjunto, estas habilidades consolidan una base sólida para abordar futuros proyectos de investigación y desarrollo en el ámbito de la ingeniería de materiales y la fabricación aditiva.

5.4 Posibles líneas de desarrollo futuro

A partir de los hallazgos obtenidos, se identifican diversas líneas de investigación futura. En primer lugar, sería interesante ampliar el estudio a otros tipos de aceros y superaleaciones para evaluar la versatilidad de la tecnología ADAM en sectores de alta exigencia, como la aeronáutica o la biomédica. También se podrían investigar nuevos patrones de relleno, especialmente estructuras optimizadas mediante algoritmos generativos o topología computacional, con el fin de mejorar la relación peso/resistencia.

Asimismo, sería conveniente estudiar el efecto de tratamientos térmicos adicionales, como el revenido o el endurecimiento superficial, sobre la resistencia mecánica y la dureza de las piezas. Otro aspecto clave sería el análisis del comportamiento a fatiga y al impacto, para evaluar la durabilidad de los componentes bajo solicitaciones cíclicas o dinámicas.

Finalmente, se propone implementar simulaciones numéricas por elementos finitos que permitan predecir la distribución de tensiones y deformaciones en función del diseño interno y la orientación de impresión. Estas herramientas podrían contribuir al diseño optimizado de componentes impresos en metal y a una integración más eficaz de la fabricación aditiva en entornos industriales reales.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

1. 3Dnatives. (2023). Guía completa: Binder Jetting o inyección de aglutinante, ¡te explicamos todo! <https://www.3dnatives.com/es/inyeccion-aglutinante-te-lo-contamos-23032016/#!>
2. 3Dnatives. (2025a). Impresora 3D Studio systemtm 2: Precio, Características, Videos.... <https://www.3dnatives.com/3D-compare/es/impresoras-3d/studio-system/>
3. 3Dnatives. (2025b). La impresión 3D de metal: Guía completa sobre la tecnología. <https://www.3dnatives.com/es/guia-impresion-3d-metal/#>
4. 3D Systems. (2025). Descripción general de la sinterización selectiva por láser (SLS). <https://es.3dsystems.com/selective-laser-sintering>
5. Ackermann, M., Šafka, J., Voleský, L., Bobek, J., & Kondapally, J. R. (2018). Impact Testing of H13 Tool Steel Processed with Use of Selective Laser Melting Technology. *Materials Science Forum*, 919, 43-51. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.919.43>
6. AENOR. (2010). Norma español TÍTULO Metal Deter (ISO 3. www.aenor.es/estel:902Fax:913
7. Basak, A. K., Sali, J. M., & Pramanik, A. (2025a). Mechanical Properties of 17-4 PH Stainless Steel Manufactured by Atomic Diffusion Additive Manufacturing. *Designs 2025*, Vol. 9, Page 66, 9(3), 66. <https://doi.org/10.3390/DESIGNS9030066>
8. Basak, A. K., Sali, J. M., & Pramanik, A. (2025b). Mechanical Properties of 17-4 PH Stainless Steel Manufactured by Atomic Diffusion Additive Manufacturing. *Designs*, 9(3), 66. <https://doi.org/10.3390/designs9030066>
9. BCN3D Technologies. (2022). ¿En qué consiste la impresión metal 3D? <https://www.bcn3d.com/es/en-que-consiste-la-impresion-metal-3d/>
10. Bedmar, J., Riquelme, A., Rodrigo, P., Torres, B., & Rams, J. (2021). Comparison of different additive manufacturing methods for 316l stainless steel. *Materials*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/MA14216504>,
11. Bianchi, I., Forcellese, A., Forcellese, P., Mancía, T., Mignanelli, C., Simoncini, M., & Verdini, T. (2024). Effect of Printing Orientation Angle and Heat Treatment on the Mechanical Properties and Microstructure of Binder-Jetting-Printed Parts in 17-4 PH Stainless Steel. *Metals 2024*, Vol. 14, Page 1220, 14(11), 1220. <https://doi.org/10.3390/MET14111220>
12. Bitfab. (2025). La Historia de la impresión 3D - Bitfab. <https://bitfab.io/es/blog/historia-impresion-3d/>
13. Carminati, M., Gonzalez-Gutierrez, J., Mandolini, M., Prade, P., Cicconi, P., Quarto, M., d'urso, G., Giardini, C., & Maccarini, G. (2022). Mechanical Characterization of AISI 316L Samples Printed Using Material Extrusion. *Applied Sciences 2022*, Vol. 12, Page 1433, 12(3), 1433. <https://doi.org/10.3390/APP12031433>
14. Concli, F., Bonaiti, L., Gerosa, R., Cortese, L., Nalli, F., Rosa, F., & Gorla, C. (2021). Bending Fatigue Behavior of 17-4 PH Gears Produced by Additive Manufacturing. *Applied Sciences 2021*, Vol. 11, Page 3019, 11(7), 3019. <https://doi.org/10.3390/APP11073019>
15. Dassault Systèmes®. (2025). Deposición de Energía Dirigida, ¿qué es y cómo funciona? <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/directed-energy-deposition>

16. Dastranjy Nezhadfar, P., Masoomi, M., Thompson, S., Phan, N., & Shamsaei, N. (2018). Mechanical Properties of 17-4 PH Stainless Steel Additively Manufactured under Ar and N₂ Shielding Gas.
17. Edimar. (2020). Fabricación aditiva: Definición, procesos y beneficios – Electrónica Edimar. <https://www.edimar.com/fabricacion-aditiva-que-es/>
18. Ferrotall. (2021). Fabricación aditiva: ventajas y desventajas de este proceso. - Ferrotall - **【 Soluciones para el Sector de Mecanizado 】** . <https://www.ferrotall.com/es/fabricacion-aditiva-ventajas-y-desventajas-de-este-proceso/>
19. García-Hernández, C., Naranjo, J. A., Castro-Sastre, M. Á., Berges, C., Fernandez-Abia, A. I., Martín-Pedrosa, F., Herranz, G., & García-Cabezón, C. (2024). Enhancing wear performance: A comparative study of traditional vs. Additive manufacturing techniques for 17-4ph SS. *Wear*, 540-541. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205258>
20. Gibson, R. Y S. (2015). Gibson, I., Rosen, D. Y Stucker, B. (2015) Tecnologías de fabricación aditiva: impresión 3D, prototipado rápido y fabricación digital directa. Springer-Verlag, Nueva York, XXI, 498. - Referencias - Publicaciones de investigación científica. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?Referenceid=2188210>
21. Han, L. X., Wang, Y., Zhang, Z. H., Liu, S. F., Li, Y., Liu, W., Dang, Y., & Zuo, Q. (2024). Assessment of Mechanical Behavior in H13 Tool Steel Synthesized through Electron Beam Melting and Selective Laser Melting Techniques. *Steel Research International*, 95(8). <https://doi.org/10.1002/SRIN.202300827>
22. Henry, T. C., Morales, M. A., Cole, D. P., Shumeyko, C. M., & Riddick, J. C. (2021). Mechanical behavior of 17-4 PH stainless steel processed by atomic diffusion additive manufacturing. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06785-1/Published>
23. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371-392. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2016.07.019>
24. HP. (2025). Lleva la impresión 3D de metal a otro nivel con las configuraciones escalables de HP | HP® España. <https://www.hp.com/es-es/printers/3d-printers/products/metal-jet.html>
25. Innovación y Tecnología. (2021). METAL X MARKFORGED. <https://innovacion-tecnologia.com/productos/metal-x-markforged/>
26. Interempresas. (2022). ¿En qué consiste la impresión metal 3D? <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/404834-En-que-consiste-la-impresion-metal-3D.html>
27. Leica Microsystems. (2025). Inicio - Microscopía | Leica Microsystems. <https://www.leica-microsystems.com/es/>
28. Liu, P. C., Yang, Y. J., Liu, R., Shu, H. X., Gong, J. P., Yang, Y., Sun, Q., Wu, X., & Cai, M. (2014). A study on the mechanical characteristics of the EBM-printed Ti-6Al-4V LCP plates in vitro. *Journal of orthopaedic surgery and research*, 9, 106. <https://doi.org/10.1186/s13018-014-0106-3>
29. Markforged. (2023a). 17-4PH ASTM A564 H900 Heat Treated.
30. Markforged. (2023b). D2-tool-steel.
31. Markforged. (2025). Plataforma de fabricación aditiva industrial. <https://markforged.com/>

32. Meltio3D. (2024). Impresión 3D de metal mediante láser de alambre | Meltio. <https://meltio3d.com/>
33. Minitab, L. (2025). Herramientas de análisis de datos, estadísticas y mejora de procesos. <https://www.minitab.com/en-us/>
34. Morales, C., Merlin, M., Fortini, A., & Fortunato, A. (2023). Direct Energy Depositions of a 17-4 PH Stainless Steel: Geometrical and Microstructural Characterizations. *Coatings 2023*, Vol. 13, Page 636, 13(3), 636. <https://doi.org/10.3390/COATINGS13030636>
35. Mower, T. M., & Long, M. J. (2016). Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science and Engineering: A*, 651, 198-213. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.068>
36. Nandwana, P. (2020). Binder Jet Printing of H13 Tool Steel. <http://www.osti.gov/scitech/>
37. Oliveira, A. P., Lima, L. H. Q. R., Felipe, B. C. A., Bolfarini, C., Coelho, R. T., & Gargarella, P. (2021). Effect of microstructure and defect formation on the bending properties of additive manufactured H13 tool steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 3598-3609. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.10.011>
38. One click metal. (2023). Sistema de impresión 3D de metal BOLDSERIES: metal con un solo clic. <https://oneclickmetal.com/boldseries/>
39. Optomec. (2020). Impresión 3D de metal para prototipos y aplicaciones de reparación de piezas pequeñas . <https://optomec.com/3d-printed-metals/lens-printers/low-cost-metal-3d-printer/>
40. Rodríguez, 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>
41. Taşcı, U. (2025). Production of D2 and 17-4 PH Bimetallic Materials and Investigation of Their Mechanical Properties in Atomic Diffusion Additive Manufacturing Method. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 1-1. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1662944>
42. Véle, F., Ackermann, M., Bittner, V., & Šafka, J. (2021). Influence of Selective Laser Melting Technology Process Parameters on Porosity and Hardness of AISI H13 Tool Steel: Statistical Approach. *Materials*, 14(20), 6052. <https://doi.org/10.3390/MA14206052>
43. Wang, M., Wu, Y., Wei, Q., & Shi, Y. (2020). Thermal Fatigue Properties of H13 Hot-Work Tool Steels Processed by Selective Laser Melting. *Metals* 2020, Vol. 10, Page 116, 10(1), 116. <https://doi.org/10.3390/MET10010116>
44. Wang, M., Zhou, Y., Wei, Q. S., & Fan, Z. (2018). The mechanical behavior of aisi h13 hot-work tool steel processed by selective laser melting under tensile stress.
45. Zwickroell S.L. (2020). <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-dureza-rockwell-iso-6508/>

CAPÍTULO 7. ANEXOS

7.1 Anexo 1: Ensayos experimentales

7.1.1 Medida de las dimensiones de las probetas

En este apartado se presentan las características del instrumento utilizado para obtener dichas medidas, así como las mediciones de la dimensiones de cada uno de los sustratos metálicos obtenidos para la investigación.

MEDICIÓN DE LAS DIMENSIONES

| | |
|-----------|--|
| ID Ensayo | Medida de la rugosidad de las probetas |
| Fecha | 2025 |
| Material | H13, A2 y 17-4 PH |
| Estado | Original |
| Ubicación | Laboratorio de Metrología de la Universidad de Córdoba |
| Norma | ISO 3327:2009 |


| | |
|--------|--|
| Equipo | DVM6 Microscopio digital |
| Imagen |  |

Tabla 19. Medidas de las dimensiones principales de las probetas (Elaboración propia).

| N.º Sustrato | Material | Relleno | Orientación | Dimensiones | Medidas (mm) | Promedio (mm) | Desviación (mm) | Valor (mm) |
|--------------|----------|------------|-------------|-------------|--------------------|---------------|-----------------|--------------|
| 5 | A2 | GYROID | NORMAL | Largo | 35,09 / 35,67 | 35,38 | 0,27 | 35,38 ± 0,27 |
| | | | | Alto | 5,08 / 5,06 / 5,05 | 5,06 | 0,04 | 5,06 ± 0,04 |
| | | | | Ancho | 5,15 / 5,12 / 5,12 | 5,13 | 0,09 | 5,13 ± 0,09 |
| 1 | A2 | SOLID | LATERAL | Largo | 35,86 / 35,65 | 35,76 | 0,53 | 35,76 ± 0,53 |
| | | | | Alto | 5,10 / 5,10 / 5,12 | 5,11 | 0,08 | 5,11 ± 0,08 |
| | | | | Ancho | 5,05 / 5,06 / 5,05 | 5,05 | 0,04 | 5,05 ± 0,04 |
| 4 | A2 | TRIANGULAR | 45 DEG | Largo | 35,91 / 35,79 | 35,85 | 0,60 | 35,85 ± 0,60 |
| | | | | Alto | 5,06 / 5,04 / 5,04 | 5,05 | 0,04 | 5,05 ± 0,04 |
| | | | | Ancho | 5,08 / 5,05 / 5,08 | 5,07 | 0,05 | 5,07 ± 0,05 |
| 4 | H13 | GYROID | 45 DEG | Largo | 35,84 / 35,62 | 35,73 | 0,52 | 35,73 ± 0,52 |
| | | | | Alto | 5,08 / 5,12 / 5,09 | 5,10 | 0,07 | 5,10 ± 0,07 |
| | | | | Ancho | 5,05 / 5,08 / 5,05 | 5,06 | 0,04 | 5,06 ± 0,04 |
| 3 | H13 | SOLID | NORMAL | Largo | 35,49 / 35,69 | 35,59 | 0,42 | 35,59 ± 0,42 |
| | | | | Alto | 5,08 / 5,08 / 5,02 | 5,06 | 0,04 | 5,06 ± 0,04 |
| | | | | Ancho | 5,09 / 5,05 / 5,09 | 5,08 | 0,05 | 5,08 ± 0,05 |
| 3 | H13 | TRIANGULAR | LATERAL | Largo | 35,38 / 35,25 | 35,32 | 0,22 | 35,32 ± 0,22 |
| | | | | Alto | 5,11 / 5,05 / 5,09 | 5,08 | 0,06 | 5,08 ± 0,06 |
| | | | | Ancho | 5,07 / 5,08 / 5,05 | 5,07 | 0,05 | 5,07 ± 0,05 |
| 1 | 17-4 PH | GYROID | LATERAL | Largo | 35,68 / 35,18 | 35,43 | 0,30 | 35,43 ± 0,30 |
| | | | | Alto | 5,22 / 5,22 / 5,21 | 5,22 | 0,15 | 5,22 ± 0,15 |
| | | | | Ancho | 5,08 / 5,02 / 5,02 | 5,04 | 0,03 | 5,04 ± 0,03 |
| 4 | 17-4 PH | SOLID | 45 DEG | Largo | 34,64 / 34,89 | 34,77 | 0,17 | 34,77 ± 0,17 |
| | | | | Alto | 4,92 / 4,92 / 4,93 | 4,92 | 0,05 | 4,92 ± 0,05 |
| | | | | Ancho | 5,08 / 5,09 / 5,02 | 5,06 | 0,04 | 5,06 ± 0,04 |
| 4 | 17-4 PH | TRIANGULAR | NORMAL | Largo | 34,89 / 35,02 | 34,96 | 0,03 | 34,96 ± 0,03 |
| | | | | Alto | 5,11 / 5,08 / 5,09 | 5,09 | 0,07 | 5,09 ± 0,07 |
| | | | | Ancho | 5,08 / 5,06 / 5,05 | 5,06 | 0,04 | 5,06 ± 0,04 |

7.1.2 Medida de rugosidad de superficie

En este apartado se presentan las características del instrumento utilizado para obtener dichas medidas, así como las mediciones de la rugosidad de cada uno de los sustratos metálicos obtenidos para la investigación. Cada tabla corresponde a un tipo de tratamiento superficial diferente.

MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD

| | |
|-----------|--|
| ID Ensayo | Ensayo de flexión |
| Fecha | 2025 |
| Material | H13, A2 y 17-4 PH |
| Estado | Original |
| Ubicación | Laboratorio de Metrología de la Universidad de Córdoba |
| Norma | ISO 4287 |

| | |
|--------|--|
| Equipo | Mitutoyo SJ-201 |
| Imagen |  |

Tabla 20. Medida de rugosidad de las probetas de A2 (Elaboración propia).

| TIPO SUSTRATO | AGHN | ASHL | AT45 |
|---|--|------------------------------------|------------------------------------|
| Ra (μm) | 2,71 | 12,44 | 14,17 |
| | 3,25 | 11,97 | 14,33 |
| | 2,09 | 13,07 | 14,15 |
| | 2,06 | 11,29 | 14,35 |
| | 3,62 | 14,00 | 14,05 |
| | 3,39 | 13,22 | 13,99 |
| | 2,81 | 12,80 | 14,00 |
| | 2,84 | 12,46 | 13,88 |
| | 2,51 | 11,52 | 14,68 |
| | 2,46 | 11,17 | 14,71 |
| | PROMEDIO (μm) | 2,77 | 12,39 |
| DESVIACIÓN TÍPICA (μm) | 0,52 | 0,92 | 0,29 |
| VALOR TOTAL (μm) | 2,77 \pm 0,52 | 12,39 \pm 0,92 | 14,23 \pm 0,29 |
| Rz (μm) | 19,55 | 52,70 | 62,73 |
| | 20,69 | 50,71 | 62,90 |
| | 15,02 | 54,90 | 68,28 |
| | 13,39 | 48,67 | 69,18 |
| | 24,43 | 56,52 | 65,81 |
| | 21,21 | 54,75 | 65,13 |
| | 15,67 | 53,13 | 66,49 |
| | 16,30 | 52,92 | 65,38 |
| | 15,29 | 51,35 | 65,18 |
| | 13,73 | 47,92 | 64,99 |
| | PROMEDIO (μm) | 17,53 | 52,36 |
| DESVIACIÓN TÍPICA (μm) | 3,70 | 2,74 | 2,03 |
| VALOR TOTAL (μm) | 17,53 \pm 3,70 | 52,36 \pm 2,74 | 62,61 \pm 2,03 |
| Rq (μm) | 3,84 | 14,40 | 16,58 |
| | 4,38 | 14,23 | 16,76 |
| | 2,83 | 15,23 | 16,68 |
| | 2,69 | 13,34 | 16,88 |
| | 4,84 | 16,04 | 16,66 |
| | 4,36 | 15,18 | 16,62 |
| | 3,49 | 14,89 | 16,48 |
| | 3,56 | 14,65 | 16,42 |
| | 3,25 | 13,83 | 17,20 |
| | 3,06 | 13,14 | 17,27 |
| | PROMEDIO (μm) | 3,63 | 14,49 |
| DESVIACIÓN TÍPICA (μm) | 0,72 | 0,90 | 0,28 |
| VALOR TOTAL (μm) | 3,63 \pm 0,72 | 14,49 \pm 0,90 | 16,76 \pm 0,28 |

Tabla 21. Medida de rugosidad de las probetas de H13 (Elaboración propia).

| TIPO SUSTRATO | HSHN | HTHL | HG45 |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Ra (μm) | 12,72 | 10,59 | 14,67 |
| | 12,04 | 10,38 | 14,06 |
| | 10,23 | 10,25 | 13,27 |
| | 10,3 | 10,81 | 12,54 |
| | 8,40 | 10,47 | 15,35 |
| | 10,28 | 11,44 | 14,38 |
| | 8,48 | 10,21 | 12,76 |
| | 11,07 | 10,76 | 12,94 |
| | 8,47 | 12,15 | 12,79 |
| | 8,87 | 10,17 | 12,73 |
| PROMEDIO (μm) | 10,09 | 10,72 | 13,55 |
| DESVIACIÓN TÍPICA (μm) | 1,54 | 0,63 | 0,99 |
| VALOR TOTAL (μm) | 10,09 \pm 1,54 | 10,72 \pm 0,63 | 13,55 \pm 0,99 |
| Rz (μm) | 55,27 | 48,67 | 74,27 |
| | 55,40 | 45,46 | 69,88 |
| | 56,70 | 45,06 | 62,13 |
| | 56,65 | 45,63 | 59,33 |
| | 41,65 | 46,45 | 71,70 |
| | 48,67 | 50,01 | 66,79 |
| | 41,99 | 43,81 | 62,27 |
| | 64,56 | 46,41 | 55,97 |
| | 38,79 | 51,20 | 62,22 |
| | 40,59 | 45,48 | 60,51 |
| PROMEDIO (μm) | 50,03 | 46,82 | 64,51 |
| DESVIACIÓN TÍPICA (μm) | 8,87 | 2,36 | 5,89 |
| VALOR TOTAL (μm) | 50,03 \pm 8,87 | 46,82 \pm 2,36 | 64,51 \pm 5,89 |
| Rq (μm) | 15,50 | 12,82 | 17,69 |
| | 14,87 | 12,32 | 16,87 |
| | 13,84 | 12,26 | 15,41 |
| | 13,89 | 12,86 | 14,65 |
| | 10,39 | 12,57 | 18,13 |
| | 12,44 | 13,64 | 16,90 |
| | 1,75 | 12,25 | 15,16 |
| | 15,67 | 12,85 | 14,86 |
| | 10,03 | 14,18 | 15,15 |
| | 10,64 | 12,16 | 15,00 |
| PROMEDIO (μm) | 11,90 | 12,79 | 15,98 |
| DESVIACIÓN TÍPICA (μm) | 4,14 | 0,66 | 1,28 |
| VALOR TOTAL (μm) | 11,90 \pm 4,14 | 12,79 \pm 0,66 | 15,98 \pm 1,28 |

Tabla 22. Medida de rugosidad de las probetas de 17-4 PH (Elaboración propia).

| TIPO SUSTRATO | 17-4THN | 17-4GHL | 17-4S45 |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Ra (μm) | 2,31 | 9,81 | 12,87 |
| | 6,34 | 10,95 | 13,76 |
| | 9,12 | 9,59 | 13,61 |
| | 1,61 | 8,85 | 12,49 |
| | 4,99 | 9,51 | 12,68 |
| | 2,11 | 9,10 | 12,66 |
| | 4,15 | 7,70 | 13,08 |
| | 3,61 | 9,06 | 14,11 |
| | 2,07 | 9,89 | 12,37 |
| | 2,42 | 9,73 | 12,96 |
| PROMEDIO (μm) | 3,87 | 9,42 | 13,06 |
| DESVIACIÓN TÍPICA (μm) | 2,38 | 0,84 | 0,58 |
| VALOR TOTAL (μm) | 3,87 \pm 2,38 | 9,42 \pm 0,84 | 13,06 \pm 0,58 |
| Rz (μm) | 14,96 | 41,22 | 63,11 |
| | 29,22 | 47,62 | 69,49 |
| | 40,88 | 41,15 | 66,58 |
| | 10,47 | 40,57 | 63,12 |
| | 21,62 | 38,03 | 60,24 |
| | 12,66 | 41,28 | 64,88 |
| | 25,07 | 39,44 | 62,94 |
| | 27,25 | 38,86 | 68,21 |
| | 15,01 | 42,33 | 64,47 |
| | 16,54 | 40,74 | 63,38 |
| PROMEDIO (μm) | 21,37 | 41,12 | 64,64 |
| DESVIACIÓN TÍPICA (μm) | 9,37 | 2,62 | 2,76 |
| VALOR TOTAL (μm) | 21,37 \pm 9,37 | 41,12 \pm 2,62 | 64,64 \pm 2,76 |
| Rq (μm) | 2,98 | 11,68 | 15,53 |
| | 7,72 | 12,93 | 16,67 |
| | 11,22 | 11,47 | 16,21 |
| | 2,14 | 10,80 | 15,14 |
| | 5,73 | 11,27 | 15,17 |
| | 2,85 | 10,90 | 15,32 |
| | 5,35 | 9,60 | 15,81 |
| | 5,37 | 10,63 | 16,87 |
| | 2,93 | 11,94 | 15,14 |
| | 3,25 | 11,62 | 15,48 |
| PROMEDIO (μm) | 4,95 | 11,28 | 15,73 |
| DESVIACIÓN TÍPICA (μm) | 2,81 | 0,89 | 0,64 |
| VALOR TOTAL (μm) | 4,95 \pm 2,81 | 11,28 \pm 0,89 | 15,73 \pm 0,64 |

7.1.3 Ensayo de flexión

En este apartado se recogen las características del equipo empleado para la realización del ensayo de flexión, así como los valores medios de carga máxima soportada por las distintas configuraciones de probetas metálicas fabricadas mediante tecnología ADAM. Las pruebas se realizaron de acuerdo con la norma ISO 3327:2009, utilizando un procedimiento normalizado de tres puntos para evaluar el comportamiento mecánico a flexión.

ENSAYO DE FLEXIÓN

| | |
|-----------|--|
| ID Ensayo | Medida de la rugosidad de las probetas |
| Fecha | 2025 |
| Material | H13, A2 y 17-4 PH |
| Estado | Original |
| Ubicación | Laboratorio de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Córdoba |
| Norma | ISO 3327:2009 |


| | |
|--------|--|
| Equipo | Máquina universal de ensayos Servosis ME-402 |
| Imagen |  |

Tabla 23. Resultados ensayo de flexión probetas A2 (Elaboración propia).

| N.º Sustrato | Tipo probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Carga rotura (kN) | Resistencia Norma (MPa) | Resistencia (MPa) | Promedio Resistencia Norma | Desviación | Valor |
|--------------|--------------|-----------|------------|-------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|------------|------------------|
| 1 | | | | 3,16 | 1113,70 | 1136,14 | | | |
| 2 | | | | 3,24 | 1144,40 | 1167,39 | | | |
| 3 | AGHN | 5,06 | 5,13 | 3,08 | 1085,12 | 1107,05 | 1128,38 | 32,69 | 1128,38 ± 32,69 |
| 4 | | | | 3,19 | 1126,40 | 1149,07 | | | |
| 5 | | | | 3,32 | 1172,28 | 1195,94 | | | |
| 1 | | | | 3,97 | 1396,13 | 1429,74 | | | |
| 2 | | | | 4,13 | 1452,37 | 1487,38 | | | |
| 3 | ASHL | 5,11 | 5,05 | 4,07 | 1431,28 | 1465,84 | 1383,83 | 109,32 | 1383,83 ± 109,32 |
| 4 | | | | 3,39 | 1192,26 | 1221,26 | | | |
| 5 | | | | 4,12 | 1447,10 | 1482,00 | | | |
| 1 | | | | 1,69 | 607,26 | 609,82 | | | |
| 2 | | | | 1,75 | 628,05 | 630,83 | | | |
| 3 | AT45 | 5,05 | 5,07 | 1,83 | 654,93 | 657,77 | 664,11 | 52,08 | 664,11 ± 52,08 |
| 4 | | | | 2,06 | 737,74 | 740,73 | | | |
| 5 | | | | 1,93 | 692,57 | 695,48 | | | |

Tabla 24. Resultados ensayo de flexión probetas H13 (Elaboración propia).

| N.º Sustrato | Tipo probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Carga rotura (kN) | Resistencia Norma (MPa) | Resistencia (MPa) | Promedio Resistencia Norma | Desviación | Valor |
|--------------|--------------|-----------|------------|-------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|------------|-----------------|
| 1 | | | | 1,84 | 648,78 | 660,46 | | | |
| 2 | | | | 1,90 | 672,47 | 684,70 | | | |
| 3 | HG45 | 5,09 | 5,06 | 2,02 | 712,78 | 725,65 | 680,75 | 24,01 | 680,75 ± 24,01 |
| 4 | | | | 1,96 | 693,69 | 706,25 | | | |
| 5 | | | | 1,91 | 676,01 | 688,47 | | | |
| 1 | | | | 7,57 | 2698,69 | 2726,42 | | | |
| 2 | | | | 7,20 | 2565,06 | 2591,20 | | | |
| 3 | HSHN | 5,06 | 5,08 | 7,54 | 2686,57 | 2714,03 | 2659,99 | 64,63 | 2659,99 ± 64,63 |
| 4 | | | | 7,65 | 2725,06 | 2752,82 | | | |
| 5 | | | | 7,37 | 2624,57 | 2651,54 | | | |
| 1 | | | | 5,28 | 1868,69 | 1898,96 | | | |
| 2 | | | | 5,17 | 1832,20 | 1861,79 | | | |
| 3 | HTHL | 5,08 | 5,07 | 4,87 | 1723,44 | 1751,35 | 1841,62 | 70,96 | 1841,62 ± 70,96 |
| 4 | | | | 5,38 | 1904,11 | 1935,05 | | | |
| 5 | | | | 5,31 | 1879,67 | 1910,27 | | | |

Tabla 25. Resultados ensayo de flexión probetas 17-4 PH (Elaboración propia).

| N.º Sustrato | Tipo probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Carga rotura (kN) | Resistencia Norma (MPa) | Resistencia (MPa) | Promedio Resistencia Norma | Desviación | Valor |
|--------------|--------------|-----------|------------|-------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|------------|-----------------|
| 1 | | | | 3,65 | 1231,89 | 1313,92 | | | |
| 2 | | | | 3,39 | 1142,79 | 1219,11 | | | |
| 3 | 17-4GHL | 5,22 | 5,04 | 3,42 | 1153,92 | 1230,96 | 1188,35 | 43,43 | 1188,35 ± 43,43 |
| 4 | | | | 3,49 | 1177,21 | 1255,74 | | | |
| 5 | | | | 3,66 | 1235,94 | 1318,23 | | | |
| 1 | | | | 1,94 | 732,23 | 696,55 | | | |
| 2 | | | | 2,16 | 815,86 | 776,28 | | | |
| 3 | 17-4S45 | 4,92 | 5,06 | 1,62 | 612,28 | 582,35 | 733,07 | 91,34 | 733,07 ± 91,34 |
| 4 | | | | 2,19 | 827,22 | 787,06 | | | |
| 5 | | | | 1,79 | 677,74 | 644,84 | | | |
| 1 | | | | 3,36 | 1186,55 | 1208,33 | | | |
| 2 | | | | 3,35 | 1184,07 | 1205,64 | | | |
| 3 | 17-4THN | 5,09 | 5,06 | 3,36 | 1187,61 | 1209,41 | 1181,74 | 7,56 | 1181,74 ± 7,56 |
| 4 | | | | 3,34 | 1181,60 | 1202,94 | | | |
| 5 | | | | 3,31 | 1168,87 | 1190,01 | | | |



7.1.4 Ensayo de dureza

En este apartado se describen las características del equipo utilizado para los ensayos de dureza, así como los valores obtenidos para las diferentes configuraciones de probetas metálicas fabricadas mediante la tecnología ADAM. Las mediciones se llevaron a cabo en función de la dureza superficial de cada muestra, aplicando principalmente el método Rockwell C (HRC), y en algunos casos el método Rockwell D (HRD) cuando los valores obtenidos con la escala HRC no eran fiables.

ENSAYO DE DUREZA

| | |
|-----------|--|
| ID Ensayo | Ensayo de dureza |
| Fecha | 2025 |
| Material | H13, A2 y 17-4 PH |
| Estado | Original |
| Ubicación | Laboratorio de Materiales de la Universidad de Córdoba |
| Norma | ISO 6508-1:2005 |


| | |
|--------|--|
| Equipo | Máquina de ensayo de dureza Zwick/Roell ZHU250 Top |
| Imagen |  |

Tabla 26. Resultados ensayo de dureza probetas A2 (Elaboración propia).

| TIPO SUSTRATO | AGHN | ASHL | AG45 |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Ra (μm) | 16,29 | 42,83 | 34,19 |
| | 18,43 | 45,66 | 37,49 |
| | 17,80 | 48,86 | 31,88 |
| PROMEDIO (μm) | 17,51 | 45,78 | 34,52 |
| DESVIACIÓN TÍPICA (μm) | 1,10 | 3,02 | 2,82 |
| VALOR TOTAL (μm) | 17,51 \pm 1,10 | 45,78 \pm 3,02 | 34,52 \pm 2,82 |

Tabla 27. Resultados ensayo de dureza probetas H13 (Elaboración propia).

| TIPO SUSTRATO | HSHN | HTHL | HG45 |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Ra (μm) | 43,69 | 43,46 | 37,03 |
| | 48,13 | 42,64 | 35,43 |
| | 46,95 | 41,49 | 35,33 |
| PROMEDIO (μm) | 46,26 | 42,53 | 35,93 |
| DESVIACIÓN TÍPICA (μm) | 2,30 | 0,99 | 0,95 |
| VALOR TOTAL (μm) | 46,26 \pm 2,30 | 42,53 \pm 0,99 | 35,93 \pm 0,95 |

Tabla 28. Resultados ensayo de dureza probetas 17-4 PH (Elaboración propia).

| TIPO SUSTRATO | 17-4THN | 17-4GHL | 17-4S45 |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Ra (μm) | 15,06 | 18,74 | 26,00 |
| | 24,44 | 25,19 | 34,90 |
| | 23,15 | 17,11 | 39,52 |
| PROMEDIO (μm) | 20,88 | 20,35 | 33,47 |
| DESVIACIÓN TÍPICA (μm) | 5,08 | 4,27 | 6,87 |
| VALOR TOTAL (μm) | 20,88 \pm 5,08 | 20,35 \pm 4,27 | 33,47 \pm 6,87 |

7.2 Anexo 2: Informes ensayo a flexión

Informe de Ensayo de flexión a 3 puntos UNIV. Córdoba

Fondos de escala de los canales analógicos:

Fuerza: 49,033 kN Posición: 999,99 mm

Referencias:

Fecha: 22/05/2025
 Probeta: HG451

Parámetros:

Velocidad: 001,01 mm/min
 Límite superior: 60,00 %
 Límite inferior: 20,00 %
 Distancia rodillos: 30,0 mm
 Ancho: 5,0 mm
 Espesor: 5,0 mm

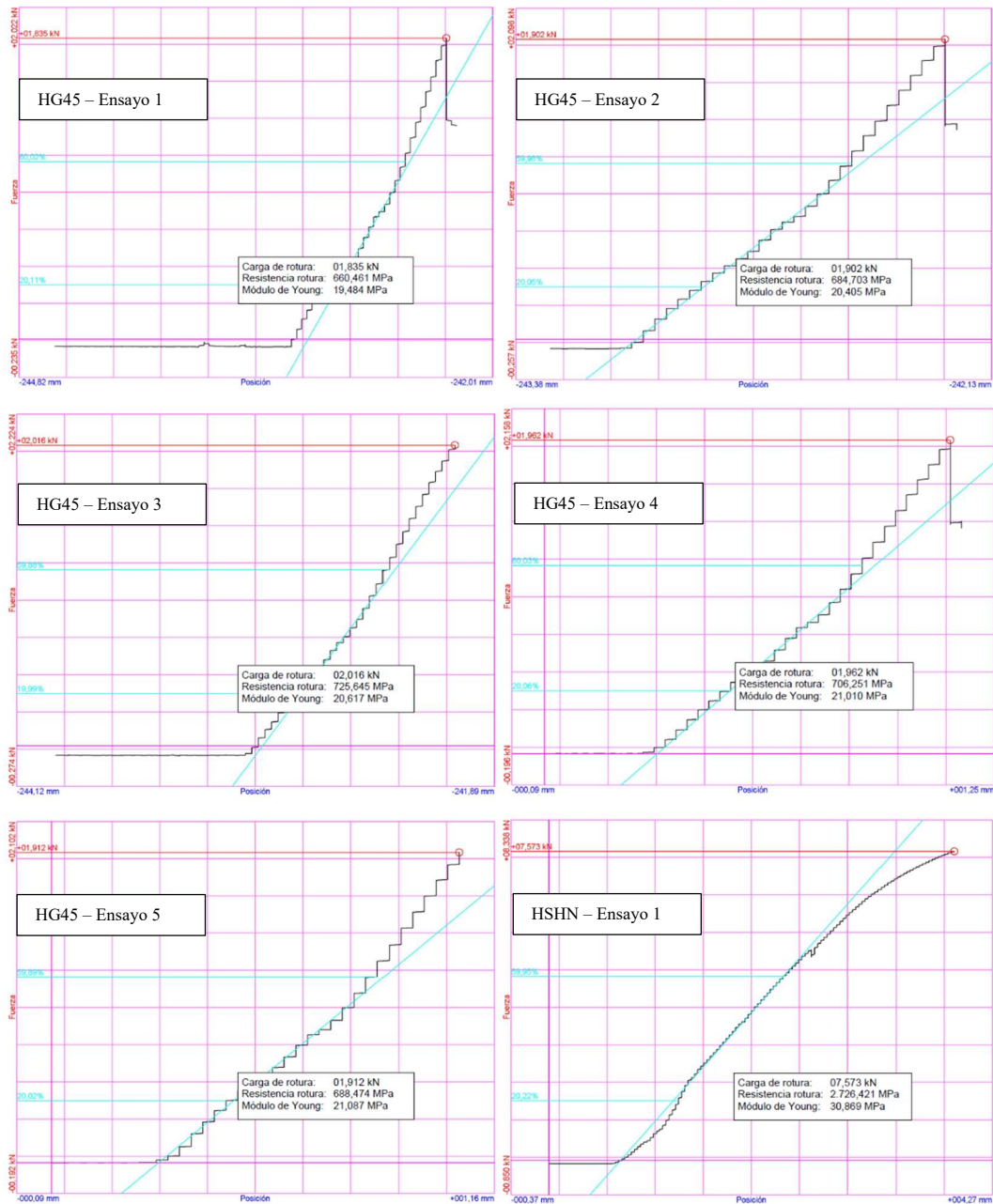


Figura 72. Ensayos a flexión de las probetas – HG45 1, 2, 3, 4, 5, HSHN 1.

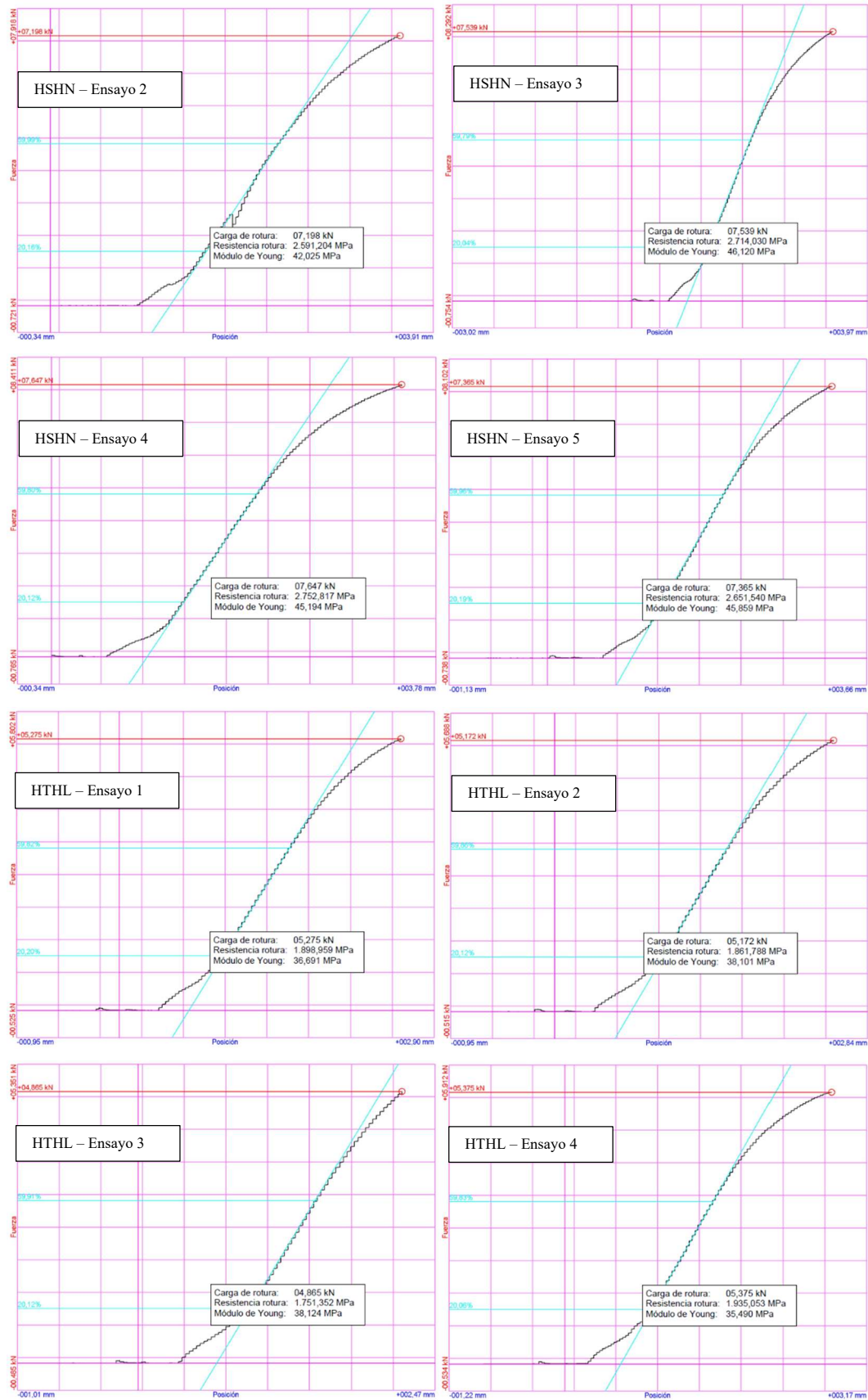


Figura 73. Ensayos a flexión de las probetas – HSHN 2, 3, 4, 5, HTHL 1, 2, 3, 4.

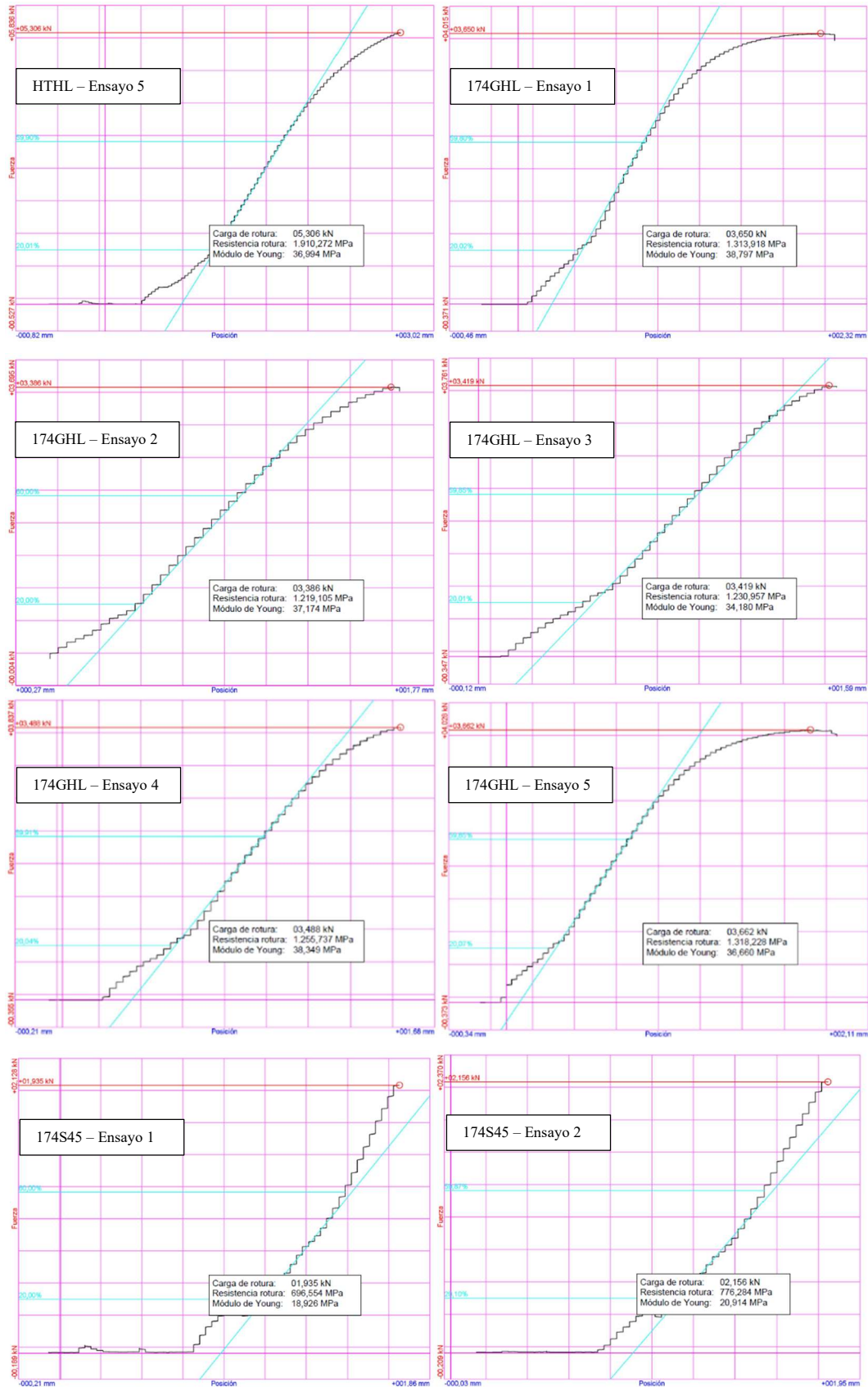


Figura 74. Ensayos a flexión de las probetas – HTHL 5, 174GHL 1, 2, 3, 4, 5, 174S45 1, 2.

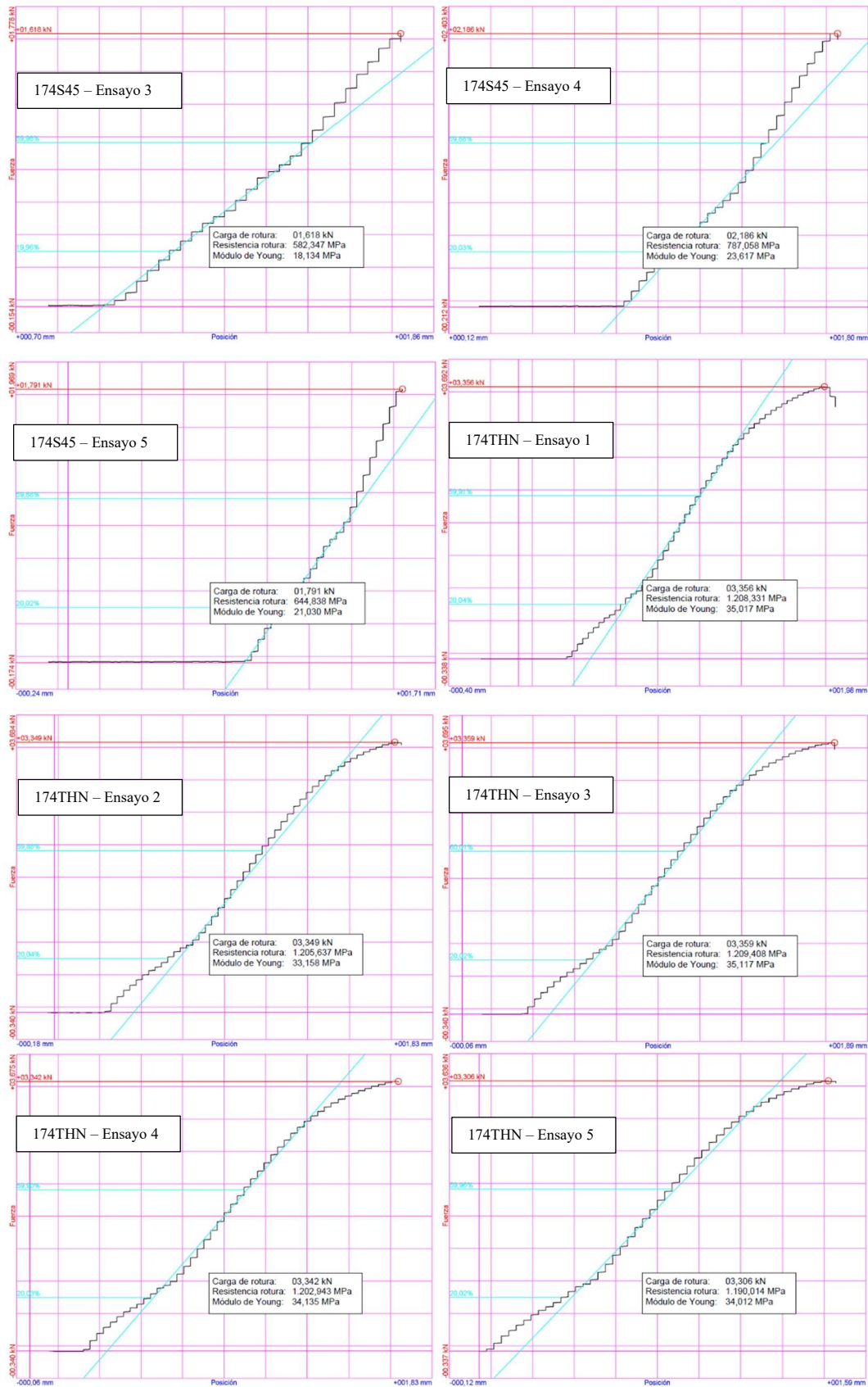


Figura 75. Ensayos a flexión de las probetas – 174S45 3, 4, 5, 174THN 1, 2, 3, 4, 5.

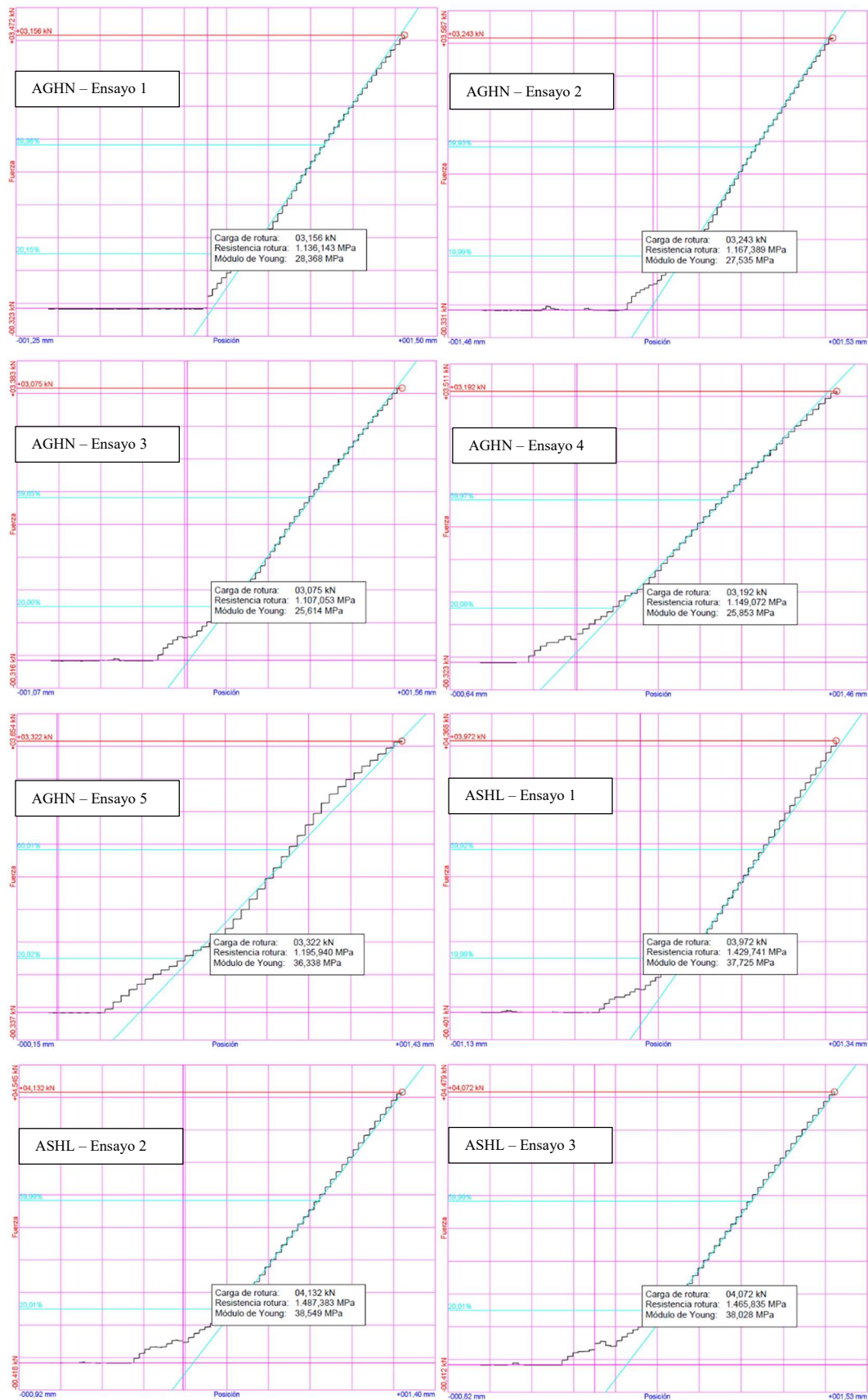


Figura 76. Ensayos a flexión de las probetas – AGHN 1, 2, 3, 4, 5, ASHL 1, 2, 3.

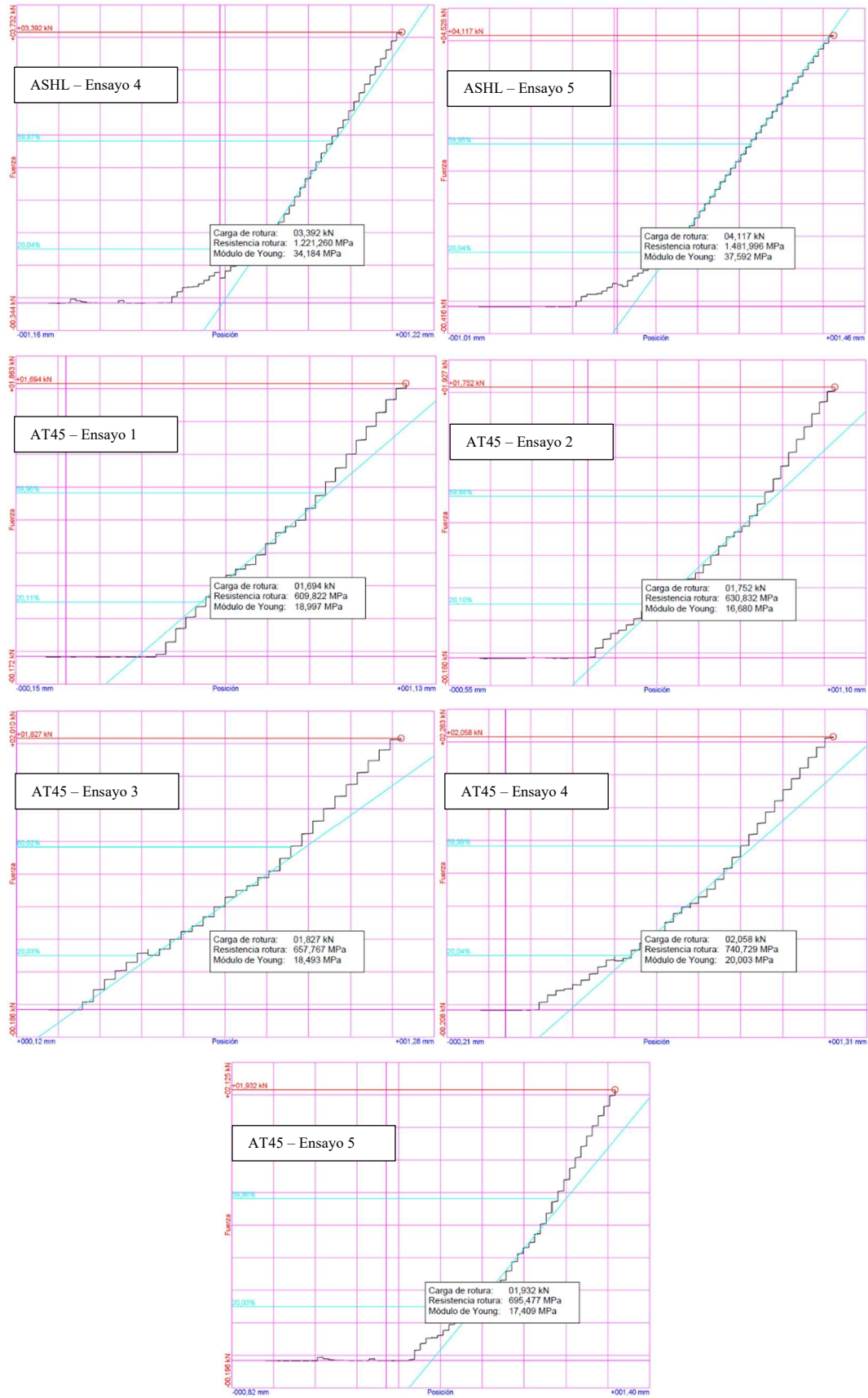


Figura 77. Ensayos a flexión de las probetas – ASHL 4, 5, AT45 1, 2, 3, 4, 5.