

Caracterización del acero inoxidable SAE 316L fabricado por manufactura aditiva en impresora
de ámbito comercial

Javier Esteban Trespalacios Gómez y María Camila Valderrama Carreño

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

PhD en Ingeniería Mecánica

Codirector

Jairo Andrés Mantilla Villalobos

Magister en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Dedicatorias

En nombre de Javier Esteban Trespalacios Gómez, dedico este proyecto principalmente a mi familia, por su apoyo incondicional a lo largo de esta etapa académica y personal. De manera especial, a mi pareja, Camila, con quien tuve la oportunidad de desarrollar este trabajo y compartir cada reto y aprendizaje durante este proceso.

Asimismo, dedico este logro a mi abuelo Evaristo Gómez, quien, aunque ya no se encuentra en este plano terrenal, dejó en mí recuerdos, enseñanzas y motivaciones que me impulsaron a cumplir el sueño que él siempre quiso para mi vida. Espero que, donde quiera que esté, pueda verme y sentirse orgulloso de este logro alcanzado.

En nombre de María Camila Valderrama Carreño, agradezco profundamente a Dios por permitirnos culminar esta etapa tan importante de nuestras vidas. Dedico este logro a mi pareja, por haberme acompañado y permitido compartir junto a él este maravilloso proceso académico y personal.

De igual manera, agradezco a mi familia por su apoyo constante, especialmente a mis abuelos y mi mamá, quienes siempre estuvieron presentes brindándome amor, motivación y fortaleza para alcanzar esta meta.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director de proyecto, el profesor Óscar Rodolfo Bohórquez Becerra, por su orientación, disposición y acompañamiento constante durante el desarrollo de esta investigación. Sus conocimientos, recomendaciones y apoyo fueron fundamentales para la culminación satisfactoria de este trabajo. Agradecemos especialmente su compromiso y las extensas jornadas de acompañamiento brindadas incluso por fuera de su horario habitual, las cuales fueron de gran importancia para superar las diferentes etapas del proyecto y alcanzar los resultados obtenidos.

De igual manera, agradecemos al Semillero de Investigación SIMA por brindarnos el apoyo académico, técnico y económico necesario para llevar a cabo este proyecto, así como por fomentar espacios de aprendizaje e investigación que fortalecieron nuestra formación profesional.

Extendemos también nuestro agradecimiento al Laboratorio de Impresión 3D y, especialmente, al auxiliar Óscar Iván Ayala, por su orientación y disposición durante las etapas de fabricación de las probetas, así como por instruirnos en el manejo de los equipos y parámetros de impresión utilizados en el proceso de manufactura aditiva.

Asimismo, agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por proporcionar los espacios, herramientas y recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron con sus conocimientos, apoyo y motivación para hacer posible la culminación de esta importante etapa académica y profesional.

Tabla de contenido

Introducción	12
1. Objetivos.	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Marco teórico	15
2.1 Acero inoxidable 316L	15
2.1.1 Composición química y microestructural del acero inoxidable 316L	15
2.1.2 Propiedades mecánicas del acero inoxidable 316L.....	17
2.2 Obtención convencional del acero inoxidable 316L.....	18
2.3 Fundamentos de la manufactura aditiva	20
2.3.1 Procesos de manufactura aditiva.....	20
2.4 Manufactura aditiva en metales	24
2.4.1 Manufactura aditiva por extrusión del material (MEAM)	24
2.4.2 Manufactura aditiva por extrusión con polímeros altamente cargados (MEAM-HP)	26
3. Metodología	30
3.1 Generación de probetas	30
3.1.1 Material	30
3.1.2 Acondicionamiento del sistema de impresión	31
3.1.3 Proceso de fabricación aditiva	32
3.1.4 Proceso de desaglomerado (debinding)	36
3.1.5 Proceso de Sinterización (Sintering).....	38
3.2 Evaluación de la contracción	39

3.3 Metalografía y microscopía óptica.....	40
3.4 Ensayos mecánicos	41
3.4.1 Ensayos de tracción.....	41
3.4.2 Ensayos de dureza.....	43
3.4.3 Ensayos de impacto.....	45
4. Resultados y discusiones.....	47
4.1 Contracción dimensional y evaluación del sobredimensionamiento	47
4.1.1 Evaluación en cubos patrón	47
4.1.2 Evaluación del sobredimensionamiento en probetas de impacto.....	50
4.2 Metalografía y microscopía óptica.....	53
4.2.1 Análisis de Porosidad.....	58
4.3 Ensayos mecánicos	60
4.3.1 Ensayos de tracción.....	60
4.3.2 Ensayos de dureza.....	63
4.3.3 Ensayos de impacto.....	66
5. Conclusiones	69
6. Recomendaciones.....	71
Referencias.....	72
Apéndices.....	77

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Composición química del acero inoxidable 316 L según normas internacionales</i>	16
Tabla 2	<i>Propiedades mecánicas Acero Inoxidable 316 L</i>	17
Tabla 3	<i>Procesos de Manufactura aditiva</i>	21
Tabla 4	<i>Parámetros de impresión</i>	34
Tabla 5	<i>Contracción dimensional de las probetas cúbicas</i>	49
Tabla 6	<i>Porcentaje de porosidad superficial</i>	59
Tabla 7	<i>Microdureza Vickers</i>	64
Tabla 8	<i>Impacto Charpy AM y convencional</i>	66

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Panorama de equipos de manufactura aditiva.....</i>	23
Figura 2	<i>Tipos de procesos de manufactura aditiva MEAM</i>	26
Figura 3	<i>Representación esquemática del proceso SDS.....</i>	27
Figura 4	<i>Carrete de filamento de acero inoxidable 316L de The Virtual Foundry.....</i>	31
Figura 5	<i>Sistema de impresión acondicionado para el Filamet 316L.....</i>	32
Figura 6	<i>Formato STL probetas.....</i>	33
Figura 7	<i>Sistema y proceso de impresión FFF</i>	35
Figura 8	<i>Probetas impresas</i>	36
Figura 9	<i>Proceso de desaglomerado</i>	37
Figura 10	<i>Curva de temperatura del ciclo térmico de desaglomerado</i>	37
Figura 11	<i>Proceso de sinterización</i>	38
Figura 12	<i>Probetas finales posterior al sinterizado</i>	39
Figura 13	<i>Buehler EcoMet 30.....</i>	40
Figura 14	<i>Olympus GX51</i>	41
Figura 15	<i>Shimadzu Autograph AG-X plus 250kN.....</i>	42
Figura 16	<i>Durómetro INNOVATEST Falcon 400 G2.....</i>	43
Figura 17	<i>Microindentación a 50X.....</i>	44
Figura 18	<i>Péndulo de Charpy.....</i>	46
Figura 19	<i>Probetas de impacto fracturadas</i>	46
Figura 20	<i>Orientaciones de la densidad de relleno.....</i>	48
Figura 21	<i>Orientación de densidad de relleno probeta de impacto</i>	50
Figura 22	<i>Microestructura frontal de la probeta de acero inoxidable 316L a 200X.....</i>	54

Figura 23 <i>Microestructura de la cara lateral derecha de acero inoxidable 316L a 200X</i>	55
Figura 24 <i>Microestructura de la cara superior de acero inoxidable 316L a 200X</i>	56
Figura 25 <i>Micrografías de porosidad a 200X</i>	59
Figura 26 <i>Probetas de tracción ensayadas</i>	61
Figura 27 <i>Distribución de dureza Vickers por cara evaluada</i>	65

Lista de apéndices

Apéndice A. Resultados de tracción probeta 2	77
Apéndice B. Resultados de tracción probeta 3	78

Resumen

Título: Caracterización mecánica del acero inoxidable SAE 316L fabricado por manufactura aditiva en impresora de ámbito comercial^{*1}

Autor: Javier Esteban Trespacios, María Camila Valderrama^{*2*}

Palabras Clave: Manufactura aditiva, extrusión del material, caracterización, acero inoxidable 316L, propiedades mecánicas, microestructura.

Descripción: El acero inoxidable SAE 316L es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales, biomédicas y químicas por su alta resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas. En este trabajo se caracterizó el comportamiento mecánico y microestructural del acero inoxidable 316L fabricado mediante manufactura aditiva por extrusión de filamento (FFF), utilizando una impresora 3D de ámbito comercial y filamento metálico Filamet 316L. Posteriormente, las probetas fueron sometidas a procesos de desaglomerado y sinterizado para la eliminación del aglutinante polimérico y la densificación del material. La caracterización incluyó análisis de contracción dimensional, microscopía óptica y ensayos mecánicos de dureza, impacto y tracción bajo normas ASTM. Los resultados evidenciaron una contracción significativa posterior al proceso de sinterizado, así como presencia de porosidad residual y una microestructura heterogénea asociada al proceso de fabricación. Además, las probetas fabricadas por manufactura aditiva presentaron menor resistencia al impacto en comparación con el acero inoxidable procesado mediante métodos tradicionales. Los resultados demuestran que la manufactura aditiva por extrusión de filamento es una alternativa viable para la generación de componentes metálicos en condiciones específicas de uso frente a la manufactura sustractiva tradicional; sin embargo, las propiedades finales muestran una alta dependencia de los parámetros de fabricación y procesamiento, lo que influye significativamente en su desempeño mecánico.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Programa académico. Director: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. Doctor en Ingeniería de Materiales. Codirector: Jairo Andrés Mantilla Villalobos. Magister en Ingeniería Mecánica.

Abstract

Title: Mechanical Characterization of SAE 316L Stainless Steel Manufactured by Additive Manufacturing Using a Commercial-Grade Printer ^{*3}

Author(s): Javier Esteban Trespacios, María Camila Valderrama ^{**}

Key Words: Additive manufacturing; material extrusion; stainless steel 316L; mechanical properties

Description: The SAE 316L stainless steel is widely used in industrial, biomedical, and chemical applications due to its high corrosion resistance and favorable mechanical properties. In this study, the mechanical and microstructural behavior of 316L stainless steel manufactured through fused filament fabrication (FFF) additive manufacturing was characterized using a commercial-grade 3D printer and Filamet 316L metal filament. Subsequently, the printed specimens were subjected to debinding and sintering processes to remove the polymeric binder and promote material densification. The characterization included dimensional shrinkage analysis, optical microscopy, and mechanical testing involving hardness, impact, and tensile tests conducted according to ASTM standards. The results revealed significant shrinkage after sintering, as well as the presence of residual porosity and a heterogeneous microstructure associated with the manufacturing process. In addition, the specimens produced by additive manufacturing exhibited lower impact resistance compared to conventionally processed stainless steel. The results demonstrate that filament extrusion additive manufacturing represents a viable alternative for producing metallic components under specific service conditions when compared to traditional subtractive manufacturing. However, the final properties strongly depend on the manufacturing and post-processing parameters, which significantly influence the mechanical performance of the material.

^{3*} Degree Work

^{**} Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Academic Program. Advisor: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. Doctor in Materials Engineering. Co-advisor: Jairo Andrés Mantilla Villalobos. Magister in Mechanical Engineering.

Introducción

En la actualidad, los procesos convencionales de manufactura de componentes metálicos, como el mecanizado, la fundición y la conformación plástica, continúan siendo ampliamente utilizados en la industria. Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones importantes, entre las que se destacan el alto desperdicio de material en procesos sustractivos, los elevados costos de producción y las restricciones geométricas para la fabricación de piezas complejas (Frazier, 2014). Adicionalmente, su implementación depende de infraestructura industrial especializada, lo que limita su aplicación en regiones con acceso restringido a tecnologías avanzadas de manufactura (Ngo et al., 2018). De igual forma, los métodos convencionales presentan dificultades para la fabricación de geometrías complejas o personalizadas (Thompson et al., 2016). En este contexto, la manufactura aditiva (AM) ha surgido como una alternativa tecnológica que permite la fabricación de componentes tridimensionales mediante la deposición de material capa por capa a partir de modelos digitales. Esta tecnología ofrece ventajas como la reducción del desperdicio de material, la fabricación de geometrías complejas y la posibilidad de fabricar piezas directamente en el lugar donde se requieren, sin depender de grandes centros de producción industrial (Bourell et al., 2017). Además, facilita la producción bajo demanda y la personalización de piezas (Gibson et al., 2015). Aunque inicialmente la manufactura aditiva se desarrolló para materiales poliméricos, avances recientes han permitido su aplicación en materiales cerámicos y metálicos, ampliando su campo de acción industrial (DebRoy et al., 2018). En el caso de los metales, estas tecnologías han demostrado ser capaces de producir componentes con propiedades mecánicas competitivas frente a los procesos convencionales. No obstante, la manufactura aditiva de metales sigue asociada a altos costos debido al uso de tecnologías especializadas, como la fusión en lecho de polvo (PBF), que requieren equipos de alto valor y condiciones operativas complejas (Herzog,

Seyda, & Wycisk, 2016). Esta situación limita su accesibilidad, especialmente en entornos académicos o en aplicaciones donde se buscan soluciones de bajo costo.

Como alternativa, han surgido tecnologías basadas en la extrusión de material, particularmente la manufactura aditiva por extrusión de materiales altamente cargados con partículas metálicas (MEAM-HP), la cual permite fabricar piezas metálicas utilizando impresoras 3D de ámbito comercial, seguidas de etapas de desaglomerado y sinterización (Gonzalez-Gutierrez & Cano, 2018). Este enfoque representa una opción más asequible para la producción de componentes metálicos; sin embargo, presenta desafíos relacionados con la contracción dimensional, la porosidad residual y la consolidación incompleta del material, lo que puede afectar sus propiedades mecánicas (Mostafaei et al., 2021; Singh et al., 2017).

En este sentido, surge la necesidad de evaluar la viabilidad de producir materiales metálicos mediante tecnologías de manufactura aditiva accesibles que permitan suplir las limitaciones de los métodos tradicionales. En particular, el acero inoxidable austenítico SAE 316L es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y biomédicas debido a su alta resistencia a la corrosión, buena ductilidad y adecuada tenacidad, lo que lo convierte en un material de referencia para evaluar nuevas rutas de fabricación (Herzog, Seyda, & Wycisk, 2016).

Por lo tanto, el presente trabajo se enfocó en la caracterización del acero inoxidable SAE 316L fabricado mediante manufactura aditiva por extrusión de filamento (FFF) y posterior sinterizado, evaluando sus propiedades mecánicas, su microestructura y su contracción dimensional, con el fin de determinar su grado de consolidación y comparar su desempeño con el de materiales obtenidos por rutas convencionales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar el acero inoxidable SAE 316L fabricado por manufactura aditiva por extrusión de filamento en impresora 3D comercial, mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas y microestructurales, con el fin de conocer su desempeño frente al proceso de fabricación.

1.2 Objetivos específicos

Cuantificar la contracción dimensional del acero inoxidable SAE 316L fabricado por manufactura aditiva mediante extrusión de filamento, para establecer parámetros de impresión y sobredimensionamiento de piezas.

Determinar las propiedades mecánicas mediante ensayos de dureza según la ASTM E384, ensayos de impacto Charpy conforme a la ASTM E23, y ensayos de tracción de acuerdo con la ASTM E8/E8M, evaluando así su comportamiento frente a esfuerzos mecánicos.

Identificar la microestructura mediante técnicas de metalografía estandarizadas según las normas ASTM E3, considerando fases, defectos y características microestructurales asociadas al proceso de fabricación.

Comparar los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas y microestructurales del acero inoxidable SAE 316L fabricado por manufactura aditiva con los valores reportados en la literatura científica para el acero laminado convencional, con el fin de reconocer similitudes y discrepancias en su desempeño.

2. Marco teórico

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del proyecto, abordando el material de estudio, los procesos de manufactura aditiva empleados y las técnicas de caracterización microestructural y mecánica utilizadas.

2.1 Acero inoxidable 316L

El acero inoxidable es una aleación de hierro, carbono y níquel con al menos 10,5% de cromo en peso, lo que le otorga resistencia a la corrosión y a la oxidación en diversas condiciones (Bedmar et al., 2021). Dentro de su categoría, los aceros inoxidables austeníticos son los más empleados, gracias a su tenacidad, ductilidad y soldabilidad.

En particular, el acero inoxidable SAE 316L es una aleación austenítica de bajo carbono ($\leq 0,03\%$), cuyo diseño reduce la formación de carburos y, con ello, el riesgo de corrosión intergranular. La adición de molibdeno alrededor de 2–3% refuerza su resistencia frente a la corrosión localizada, superando en desempeño al acero inoxidable SAE 316 (Sánchez Arcia, 2022).

2.1.1 Composición química y microestructural del acero inoxidable 316L

El acero inoxidable austenítico 316L es uno de los más empleados en aplicaciones industriales y biomédicas debido a su excelente resistencia a la corrosión, buena tenacidad y biocompatibilidad (Davis, 2019). Su composición química puede variar ligeramente según la norma o el fabricante, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1*Composición química del acero inoxidable 316 L según normas internacionales*

Norma	ASTM A240 (2020)	ASTM A276 (2020)	ISO 15510 (2014)
Fe	Balance	Balance	Balance
C	$\leq 0,030$	$\leq 0,030$	$\leq 0,030$
Mn	$\leq 2,0$	$\leq 2,0$	$\leq 2,0$
Si	$\leq 0,75$	$\leq 1,00$	$\leq 1,00$
P	$\leq 0,045$	$\leq 0,045$	$\leq 0,045$
S	$\leq 0,030$	$\leq 0,030$	$\leq 0,030$
Cr	16,0- 18,0	16,0-18,0	16,5-18,5
Ni	10,0- 14,0	10,0-14,0	10,0-14,0
Mo	2,0- 3,0	2,0-3,0	2,0-2,5
N	$\leq 0,10$	$\leq 0,10$	$\leq 0,11$

Nota. Balance, correspondiente al porcentaje restante de hierro en la aleación.

El cromo Cr proporciona resistencia a la oxidación y a la corrosión general, mientras que el níquel Ni estabiliza la fase austenítica y mejora la tenacidad. El molibdeno Mo refuerza la resistencia a la corrosión localizada presente como picaduras y hendiduras, y el bajo contenido de carbono inferior al 0,03% disminuye la precipitación de carburos, reduciendo la susceptibilidad a la corrosión intergranular (Sánchez Arcia, 2022).

El acero inoxidable SAE 316L presenta una microestructura austenítica equiaxial homogénea, característica de los aceros de la serie 300. Su estructura cristalina cúbica centrada en las caras FCC está estabilizada por el contenido de níquel y cromo, que favorecen la formación de

austenita en fases γ -Fe y previenen la transformación martensítica incluso a bajas temperaturas. En condición recocida, el 316L exhibe granos equiaxiales finos, con escasa presencia de ferrita δ o carburos de cromo Cr_{23}C_6 , los cuales solo aparecen tras exposiciones prolongadas entre 500 °C y 800 °C. Esta microestructura confiere al material alta ductilidad, buena tenacidad y excelente resistencia a la corrosión, siendo la base de su amplio uso en aplicaciones estructurales y biomédicas (Callister & Rethwisch, 2020a).

2.1.2 *Propiedades mecánicas del acero inoxidable 316L*

El acero inoxidable SAE 316L producido mediante métodos metalúrgicos convencionales combina alta ductilidad y buena tenacidad con una resistencia mecánica moderada, lo que lo hace idóneo para aplicaciones en los sectores químico, energético, biomédico y alimentario (Callister & Rethwisch, 2020b; Shanmugam, 2019). Las propiedades mecánicas típicas del acero inoxidable 316L en condición recocida se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2

Propiedades mecánicas Acero Inoxidable 316 L

Propiedad	Rango	Norma
Resistencia a la tracción (UTS)	480 - 620 MPa	ASTM E8
Límite elástico (YS)	170 - 310 MPa	ASTM E8
Alargamiento a la fractura (%El)	40 – 60%	ASTM E8
Tenacidad al impacto	150 – 200 J	ASTM E23
Dureza Vickers	150 – 210 HV	ASTM E384-20

Estos valores son representativos de aceros inoxidable austeníticos, donde la ausencia de transformación martensítica y la alta tenacidad permiten mantener una buena conformabilidad sin comprometer la resistencia a la corrosión. La uniformidad microestructural resultante garantiza un comportamiento estable ante sollicitaciones mecánicas y térmicas moderadas, razón por la cual el acero inoxidable 316L se considera una de las aleaciones más versátiles dentro de su clasificación (Davis, 2019).

2.2 Obtención convencional del acero inoxidable 316L

La producción industrial del acero inoxidable SAE 316L se lleva a cabo mediante procesos metalúrgicos convencionales que comprenden varias etapas interrelacionadas, destinadas a garantizar una composición química precisa y propiedades homogéneas en el material final. A continuación, se presentan los más comunes.

- **Fusión y afinado químico:** El proceso inicia en hornos eléctricos de arco, donde se funde una mezcla de chatarra de acero inoxidable y ferroaleaciones. Posteriormente, el ajuste del contenido de carbono y azufre se realiza mediante procesos de descarburación como el AOD *Argon-Oxygen Decarburization* y el VOD *Vacuum Oxygen Decarburization*. Estas técnicas permiten eliminar impurezas sin ocasionar pérdidas significativas de elementos aleantes como el cromo o el níquel, asegurando así una microestructura estable y una composición controlada (Kalpakjian & Schmid, 2014)
- **Colada continua:** Una vez refinado, el acero fundido se somete a colada continua, proceso mediante el cual se vierte en moldes para su solidificación en forma de planchones o lingotes. La velocidad de enfriamiento, junto con la segregación de elementos aleantes, influye significativamente en la homogeneidad química, el

tamaño de grano y la distribución de fases, afectando directamente las propiedades mecánicas del material (Totten, 2007).

- **Procesamiento termomecánico:** Se incluyen procesos de laminación en caliente y laminación en frío. La primera reduce secciones, refina el tamaño de grano y mejora la uniformidad estructural, mientras que la segunda incrementa la resistencia mecánica mediante endurecimiento por deformación, aunque disminuye la ductilidad (Padilha, 2016).
- **Tratamiento térmico:** Para restablecer la ductilidad y eliminar tensiones internas, el acero inoxidable 316L se somete a un recocido en el rango de temperatura de 1040 °C a 1120 °C, seguido de un enfriamiento rápido en agua o aire forzado. Este tratamiento permite obtener una estructura completamente austenítica, libre de sensibilización y con propiedades homogéneas (Davis, 2019).
- **Procesos de acabado y conformado final:** Dependiendo de la aplicación final, el material puede someterse a operaciones como trefilado, extrusión, mecanizado o pulido. Estos procesos permiten obtener productos semielaborados o terminados (barras, tubos, láminas o componentes específicos) con acabados superficiales de alta calidad y adecuados para exigencias industriales, biomédicas o estructurales. (Kalpakjian & Schmid, 2014).

A pesar de su amplio uso y madurez tecnológica, estas rutas convencionales de fabricación suelen involucrar múltiples etapas sucesivas, lo que implica mayores tiempos de procesamiento, elevado consumo energético y generación de desperdicio de material, especialmente en operaciones sustractivas, aunado al uso de equipos altamente costosos, para obtener geometrías complejas.

2.3 Fundamentos de la manufactura aditiva

La manufactura aditiva, también conocida como impresión 3D, es un proceso de fabricación que construye objetos tridimensionales a partir de un modelo digital mediante la adición sucesiva de capas de material, a diferencia de los métodos sustractivos tradicionales. Esta tecnología ofrece ventajas como la reducción de desperdicio, la personalización de piezas y la posibilidad de crear geometrías complejas relativamente imposibles de lograr con procesos convencionales (Bourell et al., 2017; Frazier, 2014). Sin embargo, también presenta desafíos, como la formación de porosidades y la anisotropía mecánica, que pueden afectar el desempeño estructural (Ngo et al., 2018). De acuerdo con la norma ISO/ASTM 52900 (2017), la manufactura aditiva se define como “el proceso de unión de materiales para fabricar objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa sobre capa”, consolidándose como una de las tecnologías clave en la transformación hacia la Industria 4.0.

2.3.1 Procesos de manufactura aditiva

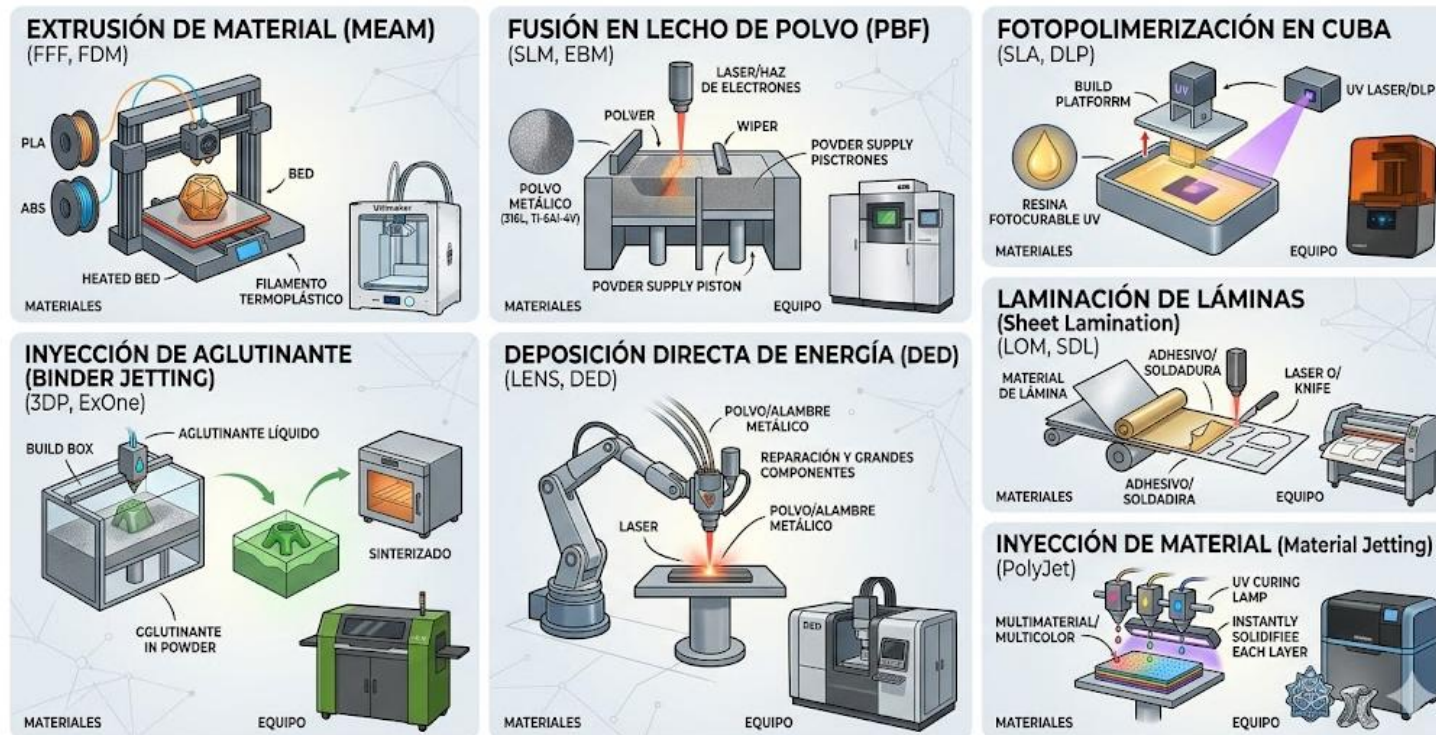
De acuerdo con la norma ISO/ASTM 52921:2017, los procesos de AM se clasifican en siete categorías principales, según el mecanismo de deposición o consolidación del material. Cada una presenta características particulares en cuanto al tipo de material, precisión dimensional y aplicación, las tecnologías se encuentran representadas en la Tabla 3, además el panorama de equipos de manufactura aditiva se muestra en la Figura 1.

Tabla 3*Procesos de Manufactura aditiva*

Proceso de AM	Tecnologías	Descripción	Materiales	Fortalezas/ debilidades
Extrusión de material (MEAM)	Fused Filament Fabrication (FFF) Fused Deposition Material (FDM)	El filamento se introduce en un cabezal calentado donde se ablanda y luego se deposita de manera controlada por una boquilla, formando la pieza capa por capa según el modelo digital.	Termoplásticos (PLA, ABS, PETG) Polímeros altamente cargados con metal o cerámica (MEAM-HP)	Bajo costo, accesible, prototipado rápido / Baja precisión, rugosidad alta, anisotropía
Fusión en lecho de polvo (PBF)	Selective Laser Melting (SLM) Electron Beam Melting (EBM)	Se distribuye una capa de polvo sobre la plataforma y una fuente de energía (láser o haz de electrones) funde selectivamente las zonas definidas por el modelo CAD, repitiendo el ciclo hasta obtener la pieza.	Polvos metálicos (316L, Ti-6Al-4V, Inconel) Polímeros de alto desempeño	Alta densidad, alta precisión, piezas funcionales / Alto costo, alto consumo energético, postproceso
Fotopolimerización en cuba (SLA/ DLP)	Stereolithography (SLA) Digital Light Processing (DLP)	Una resina líquida fotosensible se solidifica selectivamente mediante luz UV o láser, formando la pieza capa a capa con alta resolución.	Resinas fotocurables UV, resinas con cargas funcionales.	Alta resolución y excelente acabado. Ideal para geometrías complejas/ Materiales limitados. Postprocesado necesario. Resinas pueden ser tóxicas.

Proceso de AM	Tecnologías	Descripción	Materiales	Fortalezas/ Debilidades
Inyección de aglutinante (Binder Jetting)	3D Printing (3DP) ExOne VoxelJet	Un aglutinante líquido se deposita sobre un lecho de polvo metálico o cerámico para unir selectivamente las partículas, generando una pieza que luego debe sinterizarse.	Polvos metálicos, cerámicos, vidrio, arena.	Alta productividad, sin soportes, múltiples materiales / Requiere sinterizado, menor densidad
Deposición directa de energía (DED)	Laser Engineered Net Shaping (LENS™) Direct Energy Deposition	Implica la fusión simultánea del material metálico en forma de polvo o alambre mediante un láser, haz de electrones o arco eléctrico, lo que permite fabricar o reparar componentes grandes	Polvos y alambres metálicos.	Reparación de piezas, gran escala, alta deposición / Baja resolución, rugosidad alta
Laminación de láminas (Sheet lamination)	Laminated Object Manufacturing (LOM) Selective Deposition Lamination (SDL)	Une capas delgadas de material metálico, polimérico o de papel mediante adhesivos o soldadura, siendo útil para piezas de geometría simple o modelos conceptuales	Papel, láminas metálicas, láminas poliméricas.	Rápido, económico, piezas grandes / Geometría limitada, requiere acabado
Inyección de material	PolyJet™ Smooth Curvature Printing (SCP™)	Depósito selectivo de microgotas de material fotopolimérico que se solidifican por luz UV.	Fotopolímeros, cerámicos, materiales compuestos.	Muy alta precisión, multimaterial, multicolor / Alto costo, materiales limitados

Nota. Adaptado de *Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives*, por J. Gonzalez-Gutierrez et al., 2018, *Materials*, 11(5), 840.

Figura 1*Panorama de equipos de manufactura aditiva**Nota. Generado por Gemini AI*

2.4 Manufactura aditiva en metales

La manufactura aditiva en metales permite fabricar componentes complejos con geometrías imposibles de lograr mediante procesos convencionales, siendo uno de los mayores avances de la manufactura avanzada (Gibson et al., 2014). Entre las tecnologías más consolidadas se encuentra la fusión en lecho de polvo (PBF), que utiliza un láser o haz de electrones para fundir selectivamente polvo metálico, obteniendo piezas con alta densidad y precisión, aunque con elevados costos de maquinaria y exigentes condiciones de operación (Musa et al., 2024).

Como alternativa más económica surge la extrusión de filamentos metálicos (FFF/MEAM-HP), donde un filamento compuesto por partículas metálicas y aglutinante polimérico se deposita capa por capa para formar una “pieza verde”, que luego se desaglomera y sinteriza hasta alcanzar sus propiedades finales (Ferro et al., 2023). Este método, también denominado Bound Metal Deposition (BMD) o Print-Debind-Sinter (PDS), permite fabricar piezas metálicas en impresoras 3D comerciales de bajo costo, reduciendo significativamente la inversión y facilitando su adopción en entornos industriales (Bourell et al., 2017; Warriar et al., 2018).

2.4.1 *Manufactura aditiva por extrusión del material (MEAM)*

La Manufactura Aditiva por Extrusión de Material (MEAM) es uno de los métodos más difundidos debido a su bajo costo, simplicidad y versatilidad. En este proceso, un filamento o pasta se funde o ablanda y se deposita capa por capa sobre una plataforma de impresión siguiendo las trayectorias definidas por un modelo digital. Su popularidad se debe a la facilidad de operación, la amplia disponibilidad de materiales y la compatibilidad con equipos de bajo costo (Gibson et al., 2014). Existen tres enfoques principales de la MEAM:

- **Extrusión por émbolo o plunger (Plunger-based MEAM o ram extrusion):**

Utiliza barras o varillas compuestas por polvo metálico o cerámico mezclado

con un aglutinante termoplástico. Estas barras se introducen en un cartucho, se plastifican parcialmente en una cámara calefactada y luego son empujadas por un pistón (plunger) para depositarse capa por capa. Es empleada por empresas como Desktop Metal™ (Bound Metal Deposition) y Markforged™ (ADAM).

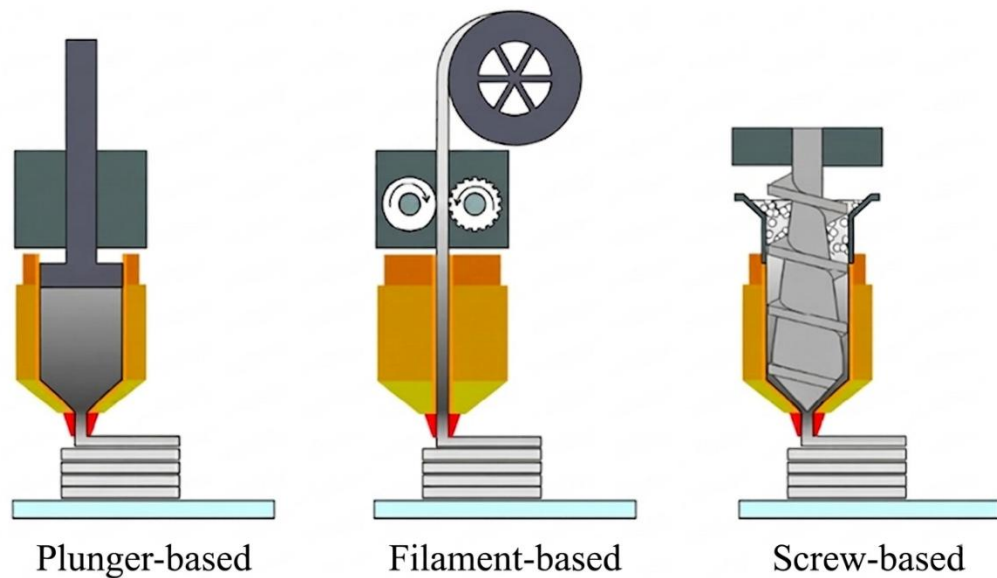
- **Extrusión mediante filamento (Fused Filament Fabrication, FFF / FDM):** Utiliza filamentos continuos de 1,75 o 2,85 mm compuestos por polímeros o polímeros altamente cargados con partículas metálicas o cerámicas. El filamento es arrastrado por ruedas dentadas, fundido en el hotend, sistema conformado por bloque calentador, sensor térmico y boquilla, y depositado capa por capa. Es la técnica más extendida por su bajo costo, simplicidad y compatibilidad con impresoras comerciales.
- **Extrusión mediante tornillo (Screw-based MEAM):** Utiliza gránulos o pellets como materia prima. Un tornillo sin fin transporta, funde y presuriza el material hasta expulsarlo por la boquilla. Permite altas tasas de deposición y el uso de materiales que no pueden fabricarse en forma de filamento, como algunos feedstocks metálicos para MIM.

Las impresoras utilizadas en estos procesos presentan costos aproximados entre 200 y 10.000 USD para equipos de ámbito comercial, a diferencia de las impresoras metálicas industriales, cuyos valores pueden oscilar entre 100.000 y más de 1.000.000 USD. Esto representa una alternativa de menor costo para la fabricación de componentes metálicos (Phillips Corporation, 2024; Creality, 2024).

Los tres procesos se muestran en la Figura 2.

Figura 2

Tipos de procesos de manufactura aditiva MEAM



Nota. Tomado de González-Gutiérrez et al. (2018). *Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives*, Materials, 11(5), 840.

Aunque inicialmente este método fue aplicado solo a polímeros como PLA y ABS, esta tecnología ha evolucionado hacia el procesamiento de materiales compuestos, cerámicos y metálicos, convirtiéndose en la base de procesos híbridos como la extrusión de polímeros altamente cargados (MEAM-HP).

2.4.2 Manufactura aditiva por extrusión con polímeros altamente cargados (MEAM-HP)

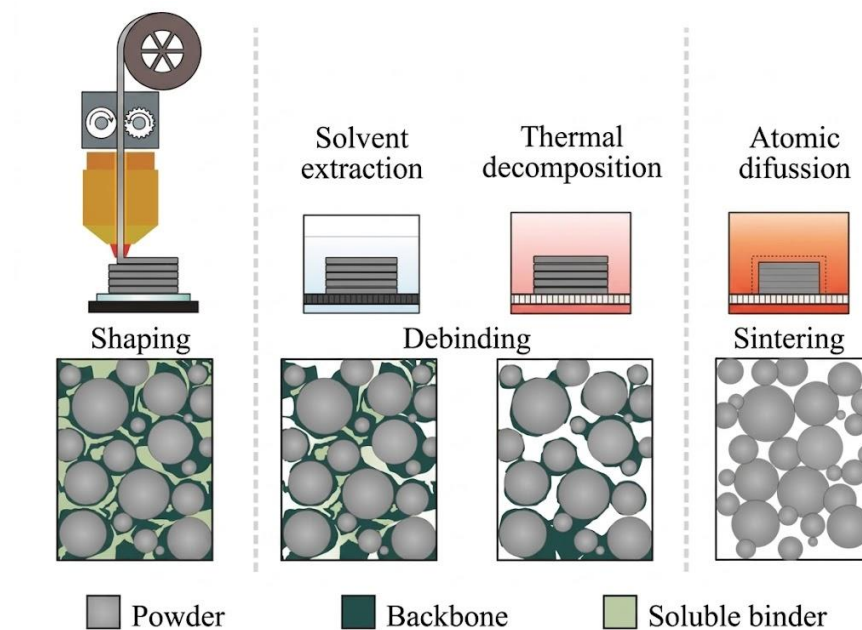
La Manufactura Aditiva por Extrusión con Polímeros Altamente Cargados (MEAM-HP) representa una evolución directa de la MEAM, orientada a la impresión de materiales metálicos y cerámicos a partir de filamentos poliméricos con alto contenido de polvo. Este método, también denominado Highly Filled Polymer Extrusion, ofrece una alternativa de bajo costo frente a

tecnologías como la fusión en lecho de polvo, manteniendo compatibilidad con impresoras FFF comerciales (German, 2014).

El procedimiento de MEAM-HP comprende varias etapas sucesivas, mostrada en Figura 3, la cual ilustra de forma esquemática las etapas Shaping–Debinding–Sintering (SDS) del proceso MEAM-HP. Las fases previas de compounding y filamentación no se incluyen, debido a que la ilustración se enfoca en la transformación del filamento compuesto hasta la obtención de la pieza metálica final.

Figura 3

Representación esquemática del proceso SDS



Nota. Tomado de González-Gutiérrez, J., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C., Sapkota, J., & Holzer, C. (2018). *Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives*, Materials, 11(5), 840.

A continuación, se describen de manera secuencial las etapas que componen el proceso MEAM-HP, incluyendo desde la preparación del material hasta la obtención de la pieza metálica final, resaltando los principales cambios físicos y estructurales que ocurren en cada fase.

- **Aglomerado (Compounding):** Mezcla homogénea de polvos metálicos o cerámicos con un aglutinante polimérico que actúa como vehículo de procesamiento (Royer et al., 2016).
- **Filamentación (Filament fabrication):** Extrusión del compuesto resultante en forma de filamento continuo, adecuado para el sistema de alimentación de la impresora (Singh et al., 2017)
- **Impresión (Shaping):** En esta primera etapa de usuario del filamento, el cual está compuesto por polvo metálico, un backbone o polímero estructural (*backbone*) y un aglutinante soluble (*soluble binder*) es calentado y depositado capa por capa mediante extrusión. Como resultado se obtiene la denominada pieza verde (*green part*), cuya estructura está formada por partículas metálicas dispersas dentro de la matriz polimérica. En esta fase no existe unión metal-metal; toda la cohesión de la pieza depende exclusivamente del binder, que envuelve las partículas y preserva la geometría impresa (Tseng et al., 2022).
- **Desaglomerado (Debinding):** Una vez conformada la pieza verde, se procede a la eliminación del aglutinante. Este proceso ocurre en dos subetapas: primero, durante la extracción por solvente, se remueve el binder soluble, generando los primeros canales de porosidad entre las partículas; posteriormente, en la descomposición térmica, se elimina el *backbone* mediante calentamiento controlado. Al finalizar esta etapa se obtiene la pieza marrón (*brown part*),

constituida casi exclusivamente por polvo metálico, con alta porosidad y mínima resistencia mecánica, pero que conserva la forma original. Este estado es crítico, ya que cualquier esfuerzo puede provocar deformaciones o fracturas (Singh et al., 2017).

- **Sinterización (Sintering):** Finalmente, la pieza marrón se somete a un ciclo térmico de sinterización a temperaturas cercanas al 70–85 % del punto de fusión del acero inoxidable 316L. En esta etapa ocurre la difusión atómica entre partículas, se forman cuellos de sinterización y el material comienza a densificarse. Como consecuencia, la porosidad disminuye, los residuos poliméricos se eliminan completamente y la pieza experimenta una contracción dimensional típica entre 10 % y 25 %. El resultado final es una pieza metálica consolidada, con unión metal-metal, mayor densidad y propiedades mecánicas funcionales (Galati & Minetola, 2019).

Este proceso es análogo al Metal Injection Molding (MIM), pero con la ventaja de fabricar geometrías complejas sin necesidad de moldes, reduciendo significativamente los costos iniciales. No obstante, un aspecto crítico del método es la contracción volumétrica durante la sinterización, que puede alcanzar entre 10 % y 25 %, por lo que las piezas deben diseñarse sobredimensionadas respecto a las dimensiones finales deseadas (Mousapour & Vaezi, 2020).

La MEAM-HP combina la precisión del modelado por deposición fundida con la robustez de la sinterización metálica, consolidándose como una ruta tecnológica emergente para la producción de piezas metálicas funcionales de bajo costo y alto valor agregado.

3. Metodología

En este capítulo se describen los materiales, equipos y procedimientos experimentales empleados para el desarrollo de la investigación. Asimismo, se presentan las etapas de obtención de las probetas mediante fabricación aditiva, los tratamientos posteriores aplicados y las técnicas de caracterización mecánica y microestructural utilizadas para evaluar el comportamiento del acero inoxidable 316L obtenido.

3.1 Generación de probetas

Las probetas utilizadas en esta investigación fueron fabricadas mediante manufactura aditiva por extrusión de filamento (FFF), utilizando filamento metálico Filamet 316L y una impresora 3D de ámbito comercial. El proceso incluyó las etapas de impresión, desaglomerado y sinterización, necesarias para obtener las probetas metálicas empleadas en los diferentes ensayos experimentales.

3.1.1 Material

En este estudio se empleó una bobina de filamento compuesto de acero inoxidable SAE 316L, el cual se muestra en la Figura 4, desarrollado para manufactura aditiva. Este material, suministrado por The Virtual Foundry (Wisconsin, EE. UU.), está conformado por una matriz termoplástica con una alta carga de polvo metálico, con un contenido de acero inoxidable entre 80% y 85% en peso y una densidad aproximada de 3,05 g/cm³ (Foundry, 2023).

Figura 4

Carrete de filamento de acero inoxidable 316L de The Virtual Foundry



El Filamet de acero inoxidable 316L se caracteriza por su baja higroscopicidad y su compatibilidad con impresoras 3D de tipo comercial, permitiendo la obtención de piezas metálicas tras las etapas de eliminación del aglutinante y sinterizado. De acuerdo con el fabricante, este material no requiere secado térmico previo, ya que la exposición al calor puede alterar las propiedades del polímero base y afectar la uniformidad del polvo metálico (Foundry, 2023).

3.1.2 Acondicionamiento del sistema de impresión

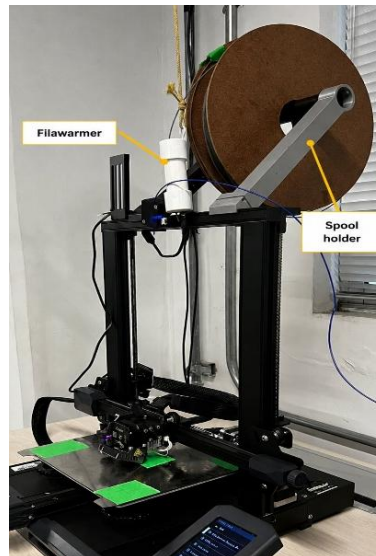
El filamento Filamet 316L presenta memoria de forma debido a su base polimérica, conservando la curvatura adquirida durante el almacenamiento en el carrete, lo que puede generar una alimentación irregular y fallos durante la impresión. Para minimizar este efecto, se utilizó un dispositivo Filawarmer mostrado en la Figura 5, suministrado por el fabricante, el cual precalienta el filamento a aproximadamente 60 °C antes de ingresar al extrusor, mejorando su flexibilidad y estabilidad durante la alimentación (Foundry, 2023).

Adicionalmente, se implementó un spool holder, mostrado en la Figura 5 fabricado en PLA, diseñado para aumentar la distancia entre el Filawarmer y la impresora, siguiendo las

recomendaciones del fabricante. Esta adecuación permitió reducir esfuerzos sobre el filamento precalentado y disminuir problemas de ruptura durante la extrusión. Asimismo, se aplicó cinta adhesiva sobre la cama de impresión para mejorar la adherencia de la primera capa. En conjunto, estas modificaciones permitieron obtener una alimentación más continua y una extrusión estable durante el proceso de fabricación. Esta etapa de acondicionamiento garantizó una extrusión uniforme y estable del material durante la fabricación aditiva.

Figura 5

Sistema de impresión acondicionado para el Filamet 316L



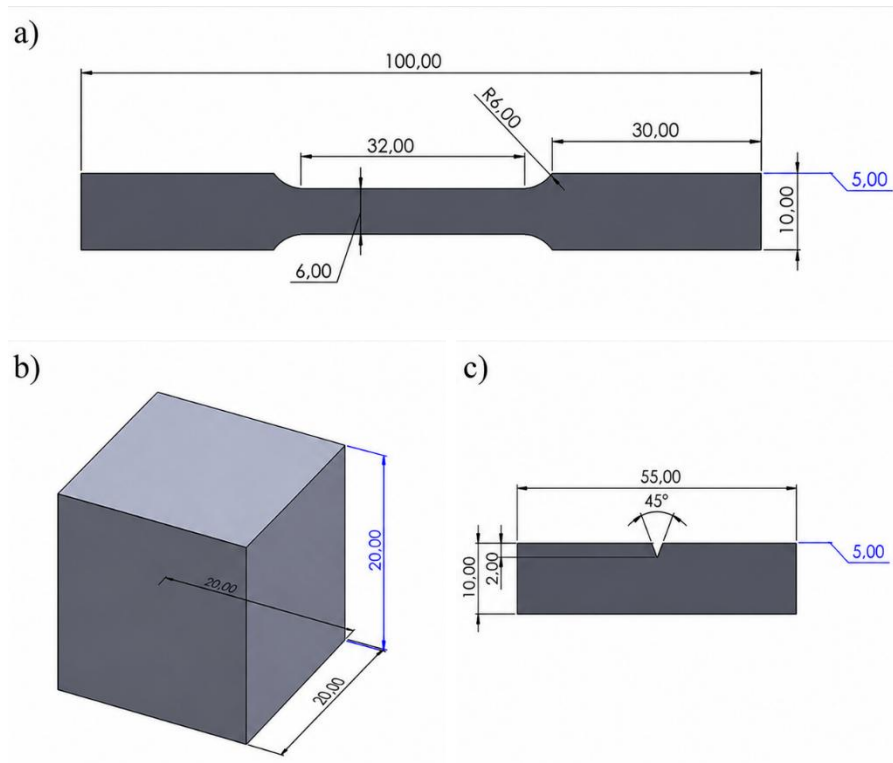
3.1.3 Proceso de fabricación aditiva

La obtención de las probetas utilizadas en esta investigación se realizó mediante una secuencia integrada de impresión 3D, desaglomerado y sinterización del filamento metálico Filamet 316L, tal como lo requiere el fabricante para cumplir las condiciones de obtención del material. Inicialmente, las geometrías correspondientes a las probetas de impacto y tracción fueron modeladas en SolidWorks de acuerdo con las dimensiones establecidas en las normas ASTM E23:23 y ASTM E8/E8M:22, respectivamente, incorporando el factor de sobredimensionamiento

del 10% definido para compensar la contracción dimensional posterior al sinterizado. Los modelos fueron exportados en formato STL mostrados en la Figura 6 y procesados en Ultimaker Cura, donde se configuraron los parámetros finales de impresión mostrados en la Tabla 4.

Figura 6

Formato STL probetas



Nota. a) Probeta tracción b) Probeta dureza c) Probeta impacto

Tabla 4*Parámetros de impresión*

Parámetro	Dimensión
Altura de capa	0.15 mm
Altura de capa inicial	0.2 mm
Ancho de línea	0.6 mm
Grosor de pared	1.2 mm
Recuento de líneas de pared	2
Densidad de relleno	90%
Patrón de relleno	Líneas
Temperatura de impresión	210°C
Temperatura de la placa de impresión	60°C
Flujo	125%
Velocidad de impresión	60 mm/s
Velocidad de capa inicial	40 mm/s
Habilitar retracción	Encendido
Distancia de retracción	0.5 mm
Activar refrigeración de impresión	Apagado
Tipo de adherencia de la placa de impresión	Falda

Posteriormente, las piezas fueron fabricadas en una impresora Creality Ender 3 S1, la cual se muestra en la Figura 7a, de tecnología FDM, equipada con extrusora directa tipo Sprite,

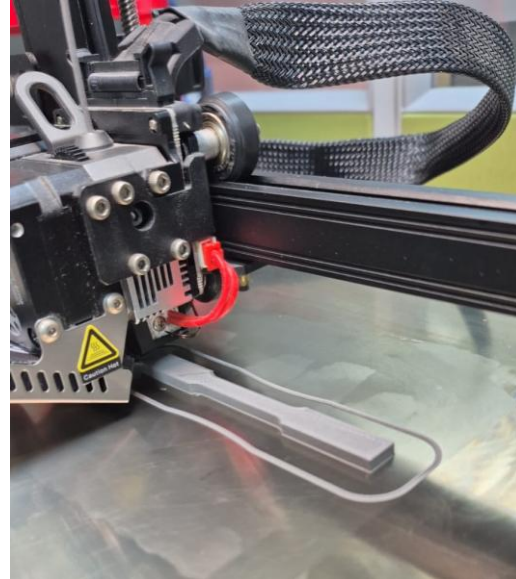
seleccionada por su alimentación estable y controlada, condición favorable para materiales con alta carga metálica.

Figura 7

Sistema y proceso de impresión FFF



a)



b)

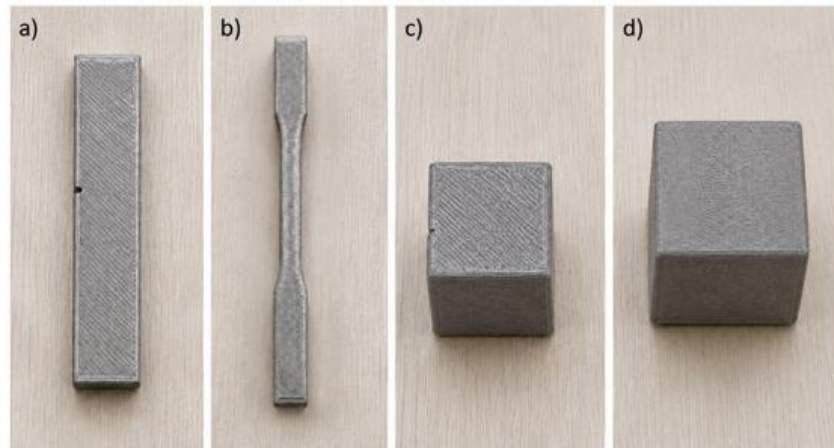
Nota. a) Impresora Creality Ender 3 S1 b) Impresión 3D de probeta

En esta etapa se imprimieron tres probetas para impacto, mostradas en la Figura 8a, de dimensiones finales de 55 mm de longitud, 10 mm de altura y sección rectangular, provistas de entalla en V en la zona central acorde a las probetas referidas de la norma ASTM E23:23, y para tracción con una longitud total de 100 mm, la región calibrada presentó una longitud de 32 mm y una sección transversal de 4 mm $\times$ 10 mm, conectada a las zonas de sujeción mediante radios de transición de 6 mm asociadas a las figuras de probetas provenientes de la norma ASTM E8/E8M:22. Las zonas de agarre tuvieron una longitud de 30 mm en cada extremo, que son

mostradas en la Figura 8b. Por último, se imprimieron dos cubos de arista 10 mm, Figura 8c, y 20 mm, Figura 8d, respectivamente, para el ensayo de dureza y metalografía.

Figura 8

Probetas impresas



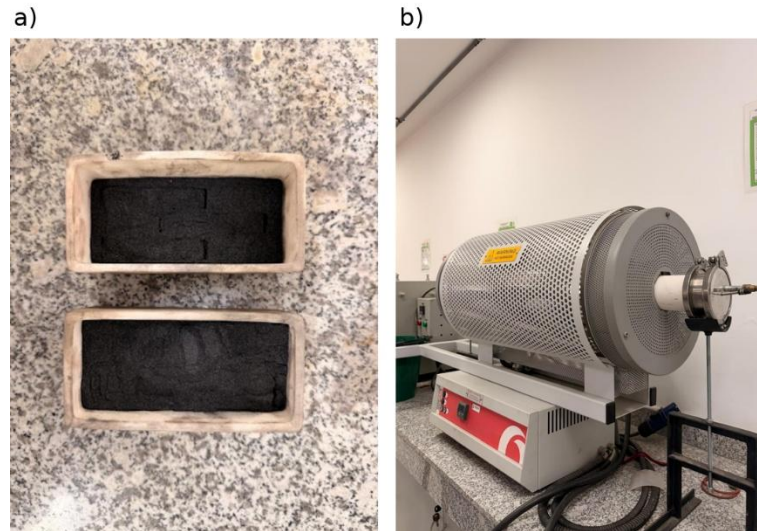
Nota. a) Probeta para ensayo impacto b) Probeta para ensayo de tracción c) Probeta cúbica (10mm) d) Probeta cúbica (20mm) para metalografía y dureza

3.1.4 Proceso de desaglomerado (debinding)

Una vez obtenidas las piezas verdes, estas fueron sometidas al proceso de desaglomerado. Para ello, las muestras se enterraron completamente en un crisol refractario con Steel Blend, mostrado en la Figura 9a, material suministrado por el fabricante y compuesto por partículas metálicas y cerámicas con granulometrías desde submicrón hasta 100 mesh. Este material se utiliza para brindar soporte mecánico a las piezas y mantener su estabilidad dimensional durante el proceso térmico, evitando deformaciones asociadas a la eliminación del aglutinante. El ciclo se ejecutó en un horno tubular Carbolite TZF, mostrado en la Figura 9b, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 9

Proceso de desaglomerado

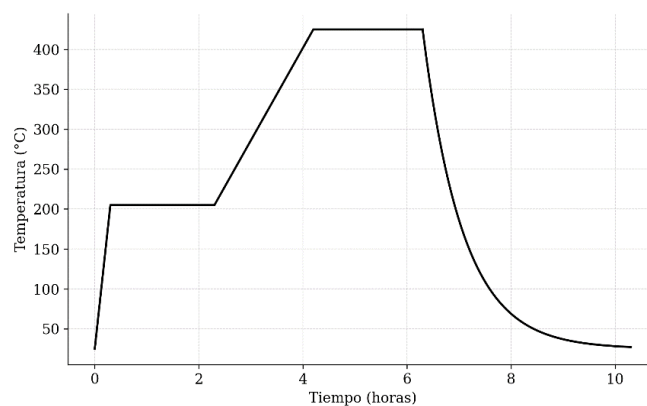


Nota. a) Steel Blend b) Horno tubular Carbolite TZF

La curva de temperatura y tiempo del ciclo térmico para el desaglomerado se muestra en la Figura 10, la cual permitió la eliminación progresiva del sistema aglutinante del filamento. Finalizado este proceso, se obtuvieron las denominadas piezas marrones, caracterizadas por conservar su geometría, pero con alta fragilidad y ausencia de cohesión metálica.

Figura 10

Curva de temperatura del ciclo térmico de desaglomerado

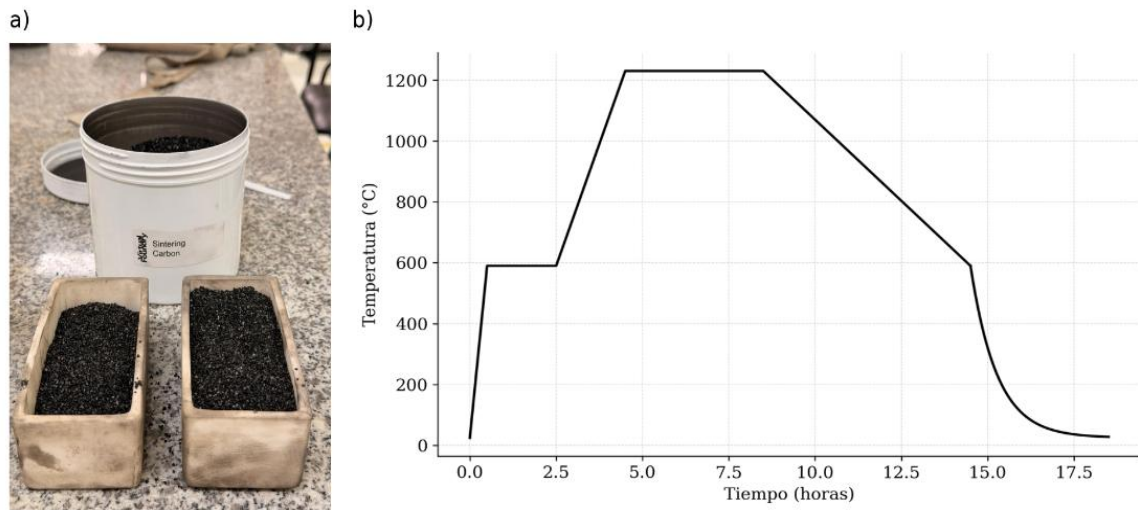


3.1.5 Proceso de Sinterización (Sintering)

Posteriormente, las piezas fueron preparadas para la etapa de sinterización, adicionando una capa superior de carbón de sinterización dentro del crisol, mostrado en la Figura 11a, como barrera protectora frente a la oxidación. El ciclo térmico de temperatura y tiempo se muestra en la Figura 11b.

Figura 11

Proceso de sinterización

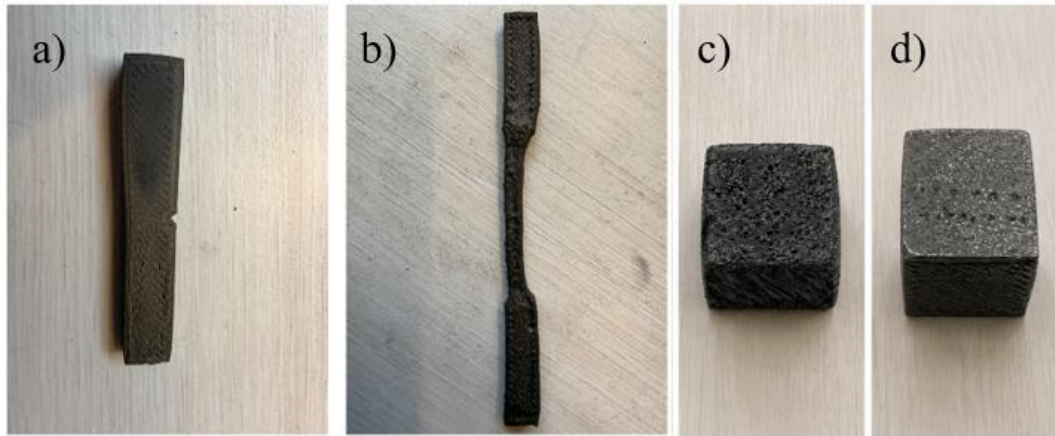


Nota. a) Carbón de sinterización b) Curva de temperatura proceso de sinterizado

Como resultado del proceso de sinterización, se obtuvieron probetas metálicas consolidadas de acero inoxidable 316L, las cuales presentaron la geometría y consistencia necesarias para la realización de los diferentes ensayos experimentales. En la Figura 12, se muestran las probetas obtenidas después del tratamiento térmico, correspondientes a los ensayos de impacto, tracción, dureza y análisis metalográfico, respectivamente. Estas probetas fueron posteriormente utilizadas para la caracterización mecánica y microestructural del material fabricado mediante manufactura aditiva por extrusión de filamento.

Figura 12

Probetas finales posterior al sinterizado



Nota. a) Probeta de impacto b) Probeta de tracción c) Probeta de dureza d) Probeta de metalografía

3.2 Evaluación de la contracción

Para determinar la contracción dimensional del acero inoxidable 316L posterior al proceso de sinterizado, se seleccionaron las dos probetas cubicas impresas en 3D.

Cada probeta fue medida antes y después del sinterizado en los tres ejes cartesianos (X, Y y Z), utilizando un calibrador digital con una precisión de 0,01 mm.

Las mediciones iniciales se realizaron inmediatamente después del proceso de impresión, mientras que las mediciones finales se tomaron una vez finalizado el sinterizado y alcanzada la temperatura ambiente.

El porcentaje de contracción o expansión para cada eje se calculó mediante la ecuación 1.

Ecuación 1. *Porcentaje de contracción*

$$\% \Delta = \frac{\text{dimensión final} - \text{dimensión inicial}}{\text{dimensión inicial}} \times 100$$

Este procedimiento permitió cuantificar el cambio dimensional en cada dirección del espacio y fue utilizado posteriormente para el análisis y comparación de resultados.

3.3 Metalografía y microscopía óptica

La preparación metalográfica de las probetas de acero inoxidable 316L fabricadas mediante manufactura aditiva por extrusión de filamento se realizó siguiendo los lineamientos establecidos por la norma ASTM E3. Inicialmente, las muestras fueron sometidas a un proceso de desbaste y lijado progresivo, empleando agua como medio lubricante con el fin de evitar el sobrecalentamiento y la alteración de la superficie.

Posteriormente, se llevó a cabo el pulido en una pulidora automática Buehler EcoMet 30, mostrada en la Figura 13, utilizando paños y solución de alúmina de 1 micra, hasta obtener una superficie con acabado espejo, libre de rayas visibles y adecuada para el análisis microestructural.

Figura 13

Buehler EcoMet 30



Una vez finalizado el pulido, las probetas fueron atacadas químicamente conforme a la norma ASTM E407-07, empleando reactivo Picral durante un tiempo de 20 segundos de inmersión, con el fin de revelar la microestructura del material.

Finalmente, el estudio metalográfico se realizó mediante microscopía óptica en la facultad de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander a través del microscopio Olympus GX51 mostrado en la Figura 14, donde se obtuvieron micrografías para el análisis de la morfología de grano, la distribución de poros y la homogeneidad de la fase austenítica. Adicionalmente, se realizó la cuantificación de la porosidad superficial mediante procesamiento digital de imágenes utilizando el software ImageJ.

Figura 14

Olympus GX51



3.4 Ensayos mecánicos

3.4.1 Ensayos de tracción

Con el propósito de caracterizar el comportamiento mecánico bajo carga uniaxial del acero inoxidable 316L fabricado mediante manufactura aditiva por extrusión de filamento, se realizaron

ensayos de tracción de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ASTM E8/E8M-22 (International, 2023a) para materiales metálicos.

Las pruebas se llevaron a cabo a temperatura ambiente utilizando una máquina universal de ensayos Shimadzu, referencia Autograph AG-X Plus, con capacidad axial de 250 kN, equipada con un extensómetro axial de alta precisión y sistema de adquisición digital de datos, la cual se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Shimadzu Autograph AG-X plus 250kN



a)



b)

Nota. a) Shimadzu Autograph AG-X plus 250kN b) Probeta de tracción montada

Antes del ensayo, se verificó la sección transversal y la longitud calibrada (L_0) utilizando un micrómetro digital con precisión de $\pm 0,01$ mm. Adicionalmente, se realizó un pulido superficial ligero en la zona calibrada con el fin de eliminar marcas de impresión que pudieran interferir con la medición de deformación. El ensayo se llevó a cabo con una velocidad de aplicación de carga de 5 mm/min, de acuerdo con las recomendaciones establecidas en la norma ASTM E8/E8M para ensayos de tracción en materiales metálicos (International, 2023)

Durante los ensayos se registraron en tiempo real los valores de fuerza aplicada y deformación proporcionados por el sistema de adquisición de datos de la máquina universal de ensayos.

3.4.2 Ensayos de dureza

Con el propósito de evaluar la resistencia superficial del acero inoxidable 316L fabricado mediante manufactura aditiva por extrusión de material y posterior sinterizado, se realizó el ensayo de microdureza Vickers, siguiendo la norma ASTM E384-23 (International, 2023b). Para estas pruebas se utilizaron las mismas probetas previamente preparadas para el análisis metalográfico, aprovechando la superficie acondicionada obtenida durante dicha etapa. El equipo utilizado para las pruebas fue un durómetro de la marca INNOVATEST Falcon 400 G2 que se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Durómetro INNOVATEST Falcon 400 G2

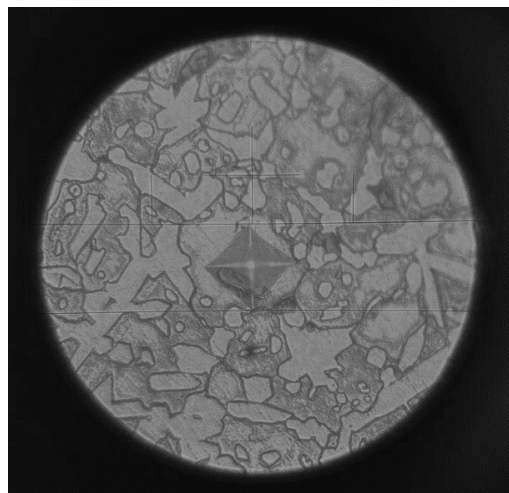


Las mediciones se realizaron sobre tres caras representativas de la muestra: frontal, lateral derecha y superior. Todas las indentaciones se efectuaron bajo las mismas condiciones experimentales, aplicando una carga de 200 gf durante 15 s (HV0.2), empleando un penetrador piramidal de diamante de base cuadrada. El distanciamiento entre indentaciones se estableció de acuerdo con la norma ASTM E384, manteniendo una separación mínima superior a 2,5 veces la diagonal de la huella, con el fin de evitar interferencias entre deformaciones plásticas adyacentes (International, 2023b)

En cada cara se realizaron ocho indentaciones distribuidas en patrón en “X”, garantizando la separación adecuada entre huellas para evitar interferencias. Los valores obtenidos se reportaron en unidades de dureza Vickers (HV). Adicionalmente, se realizó una medición complementaria de dureza Vickers empleando una carga de 1 kgf (HV1), con el fin de obtener una estimación del comportamiento global del material al involucrar un mayor volumen de microconstituyentes. La Figura 17 muestra el proceso de medición de las diagonales de la pieza penetrada durante el ensayo.

Figura 17

Microindentación a 50X



3.4.3 *Ensayos de impacto*

Para determinar la tenacidad del acero inoxidable 316L fabricado mediante manufactura aditiva, se realizaron ensayos de impacto siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM E23:23.

Las probetas mostradas en la Figura 10a, se fabricaron con el sobredimensionamiento correspondiente para compensar la contracción posterior al sinterizado. Antes del ensayo, cada probeta fue verificada dimensionalmente utilizando un calibrador con precisión de 0,05 mm para asegurar el cumplimiento normativo. Para el material convencional, se empleó una lámina de acero inoxidable 316L obtenida por métodos tradicionales, la cual fue mecanizada mediante corte por hilo para obtener la geometría requerida.

El ensayo de impacto se realizó en un péndulo tipo Charpy de la marca Triebel Werk Düsseldorf, modelo PSW 30 mostrado en la Figura 18, con una capacidad de medición en el rango de 0.25 a 30 mkg (aproximadamente 2.45 a 294 J). El equipo permite determinar la energía absorbida por la probeta durante la fractura mediante la diferencia entre la energía potencial inicial del péndulo y la energía remanente posterior al impacto. El péndulo fue elevado hasta una altura predeterminada para almacenar energía potencial conocida y, al ser liberado, impactó la probeta apoyada horizontalmente sobre dos soportes, con la entalla orientada en dirección opuesta al golpe conforme a ASTM E23. La fractura ocurrió de manera súbita, y la diferencia entre la energía inicial del péndulo y la energía remanente posterior al impacto fue registrada automáticamente por el sistema de medición del equipo, obteniéndose así la energía absorbida por cada muestra.

Figura 18

Péndulo de Charpy



Las probetas fracturadas se presentan en la Figura 19

Figura 19

Probetas de impacto fracturadas



a)



b)

Nota. a) Probetas por manufactura aditiva fracturadas b) Probeta por manufactura convencional fracturadas

4. Resultados y discusiones

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del acero inoxidable 316L fabricado mediante manufactura aditiva, incluyendo la evaluación de la contracción dimensional, las propiedades mecánicas y el análisis microestructural, así como su comparación con valores reportados en la literatura.

4.1 Contracción dimensional y evaluación del sobredimensionamiento

Con el fin de analizar la estabilidad dimensional del acero inoxidable 316L fabricado mediante tecnología FFF y posterior tratamiento térmico, se evaluó la contracción dimensional en diferentes geometrías impresas, incluyendo cubos patrón y probetas para ensayo de impacto Charpy. La contracción dimensional representa uno de los principales desafíos en procesos de manufactura aditiva metálica mediante extrusión de filamento, debido a la eliminación del sistema aglutinante y a la densificación progresiva del material durante las etapas de desaglomerado y sinterizado (González-Gutiérrez et al., 2018). Diversos estudios reportan que este fenómeno depende de variables como orientación de impresión, geometría de la pieza, distribución de material y condiciones térmicas del proceso de sinterización (Cerlincă et al., 2024).

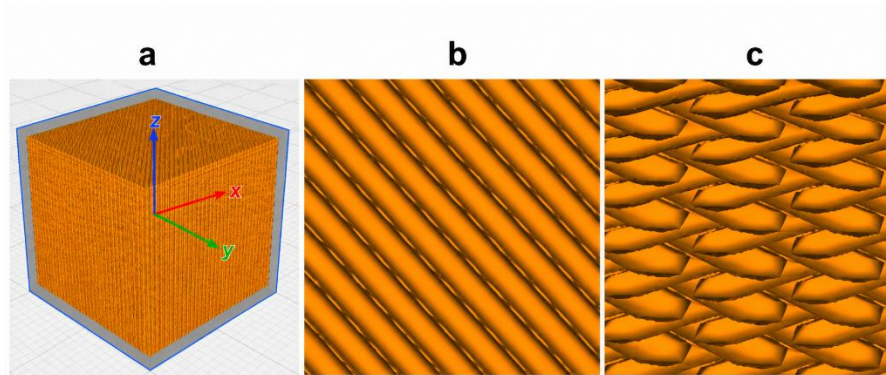
4.1.1 Evaluación en cubos patrón

En la Figura 20, se presenta el cubo patrón junto con la orientación del relleno utilizada durante la impresión mediante manufactura aditiva FFF. La configuración del patrón de relleno permite evidenciar que la contracción dimensional no ocurre de manera completamente homogénea, sino que puede verse influenciada por la orientación de deposición del material en cada plano. Se observa que las caras XZ y YZ presentan una disposición similar de las líneas de relleno, mientras que la cara XY posee una orientación diferente. Esta variación en la trayectoria de impresión podría contribuir a la anisotropía observada en la contracción dimensional,

especialmente en el eje Z, donde se registraron las mayores reducciones dimensionales tras el proceso de sinterización.

Figura 20

Orientaciones de la densidad de relleno



Nota. a) Patrón de relleno del cubo, b) Orientación de relleno de la cara XY, c)

Orientación de la densidad de relleno en XZ y YZ

Los cubos fabricados mediante manufactura aditiva y posteriormente sinterizados presentaron una reducción dimensional en las tres direcciones evaluadas. El cubo con dimensiones nominales de 20 mm obtuvo dimensiones finales de 18.55 mm en X, 17.68 mm en Y y 16.85 mm en Z, mientras que el cubo nominal de 10 mm presentó dimensiones finales de 9.17 mm en X, 9.14 mm en Y y 8.97 mm en Z. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5*Contracción dimensional de las probetas cúbicas*

Probeta	Dimensión	Inicial (mm)	Final (mm)	Contracción (mm)	Contracción (%)
Cubo 20 mm	X	20.00	18.55	1.45	7.25
Cubo 20 mm	Y	20.00	17.68	2.32	11.60
Cubo 20 mm	Z	20.00	16.85	3.15	15.75
Cubo 10 mm	X	10.00	9.17	0.83	8.30
Cubo 10 mm	Y	10.00	9.14	0.86	8.60
Cubo 10 mm	Z	10.00	8.97	1.03	10.30

Los resultados evidencian una contracción anisotrópica, observándose diferencias en la reducción dimensional según la dirección evaluada. En el cubo de 20 mm, la mayor contracción se presentó en Z (15.75 %), seguida de Y (11.60 %) y X (7.25 %). En el cubo de 10 mm, la contracción fue más uniforme; sin embargo, el eje Z presentó nuevamente la mayor reducción con un valor de 10.30 %. Una posible explicación de la mayor contracción observada en el cubo de 20 mm podría estar relacionada con la evacuación de gases durante las etapas de desaglomerado y sinterización (Srivastav et al., 2020). Debido a su mayor altura, los gases generados por la degradación del aglutinante deben recorrer una distancia más larga para salir de la pieza, lo que podría dificultar una eliminación homogénea y favorecer diferencias en la densificación del material. Esto podría explicar por qué el cubo de 20 mm presentó una contracción más pronunciada, especialmente en el eje Z, en comparación con el cubo de 10 mm. Algunos estudios reportan que la liberación y difusión de gases durante el desaglomerado influyen directamente en

la densificación y estabilidad dimensional de componentes fabricados mediante manufactura aditiva metálica (Singh et al., 2017).

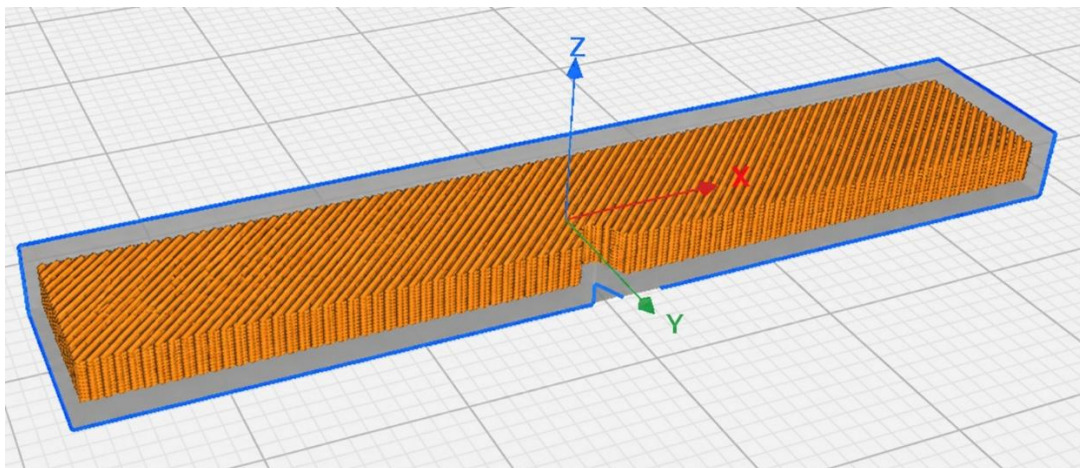
Asimismo, se observó una mayor variación dimensional en el cubo de mayor tamaño, indicando que la contracción depende tanto de la orientación como de la geometría de la pieza fabricada. Este comportamiento es característico de procesos de manufactura aditiva por deposición capa a capa y de mecanismos de densificación asociados al sinterizado metálico.

4.1.2 Evaluación del sobredimensionamiento en probetas de impacto

La Figura 21, presenta la orientación del patrón de relleno empleado en las probetas de impacto fabricadas mediante manufactura aditiva FFF. Se observa que las caras laterales de las probetas conservaron una disposición similar a la mostrada en las Figura 20b y Figura 20c, manteniendo la misma dirección de deposición del material. Esta orientación del relleno podría estar relacionada con el comportamiento anisotrópico observado en la contracción dimensional y en las propiedades mecánicas obtenidas después del proceso de sinterización.

Figura 21

Orientación de densidad de relleno probeta de impacto



Con base en los resultados obtenidos en los cubos patrón, para la fabricación de las probetas destinadas al ensayo de impacto se aplicó un sobredimensionamiento del 10% en cada eje, considerando dimensiones iniciales de 60.5 mm de longitud, 11.0 mm de altura y 5.5 mm de ancho. Los resultados finales y los porcentajes de contracción obtenidos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7

Contracción dimensional de las probetas de impacto

Probeta	Dimensión	Inicial (mm)	Final (mm)	Contracción (mm)	Contracción (%)
1	X	60	54.2	5.8	10.41
1	Y	11	10.31	0.69	6.27
1	Z	5.5	4.89	0.61	11.09
2	X	60	54.5	5.5	9.92
2	Y	11	10.37	0.63	5.73
2	Z	5.5	5.38	0.12	2.27
3	X	60	59.5	0.5	0.83
3	Y	11	11.48	-0.48	-4.36
3	Z	5.5	6.15	-0.65	-11.82

Las probetas 1 y 2 presentaron una longitud final cercana a 54 mm en el eje X, correspondiente a contracciones aproximadas del 10%, valor cercano al sobredimensionamiento inicialmente establecido. Esto indica que la estrategia de compensación dimensional adoptada fue adecuada para contrarrestar la reducción longitudinal generada durante el tratamiento térmico.

En el eje Y, las probetas 1 y 2 registraron contracciones de 6.27 % y 5.73 %, respectivamente. Por otra parte, en el eje Z se observaron diferencias más marcadas entre ambas

muestras, donde la probeta 1 presentó una contracción de 11.09 %, mientras que la probeta 2 mostró una reducción de 2.27 %. Estos resultados evidencian un comportamiento anisotrópico de la contracción, asociado tanto a la orientación de impresión como a las condiciones del proceso térmico.

Por otra parte, la probeta 3 presentó un comportamiento diferente al de las demás muestras, obteniéndose dimensiones finales superiores a las esperadas y valores negativos de contracción aparente en los ejes Y y Z. Estos valores negativos indican que la muestra presentó una expansión dimensional en dichas direcciones en lugar de una reducción posterior al sinterizado. Adicionalmente, durante su manipulación se evidenció una menor integridad estructural y menor rigidez mecánica respecto a las demás probetas, sugiriendo una consolidación deficiente del material. Este comportamiento podría asociarse a una densificación insuficiente durante el tratamiento térmico, posiblemente originada por la presencia de oxígeno dentro del horno, eliminación incompleta del aglutinante o acumulación de gases generados durante el desaglomerado. La liberación de estos gases y su posible atrapamiento dentro de la pieza pueden afectar la difusión entre partículas metálicas y alterar la estabilidad dimensional final del componente, debido a que durante el desaglomerado y la sinterización pueden generarse defectos internos asociados a la eliminación incompleta del aglutinante y a una densificación no homogénea (Costa, 2023). De acuerdo con Markforged (2022), variaciones en la atmósfera de sinterización y una eliminación inadecuada de compuestos volátiles pueden generar defectos dimensionales y problemas de consolidación en piezas metálicas fabricadas mediante manufactura aditiva basada en extrusión.

Los porcentajes de contracción obtenidos en la presente investigación se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura para acero inoxidable 316L fabricado mediante FFF

metálico, donde se han registrado contracciones entre 5 % y 20 % dependiendo de la orientación de impresión y de las condiciones de sinterización (Cerlincă et al., 2024).

En términos generales, los resultados obtenidos confirman que el sobredimensionamiento del 10 % permitió compensar parcialmente la contracción dimensional de las probetas de impacto, especialmente en la dirección longitudinal. Sin embargo, las variaciones observadas entre ejes y entre muestras demuestran que la contracción no ocurre de manera uniforme, por lo que el diseño de piezas fabricadas mediante FFF metálico debe considerar ajustes geométricos específicos según la orientación de impresión y la geometría de cada componente.

Adicionalmente, se observó una ligera pérdida de linealidad en algunas probetas después del sinterizado, evidenciando una posible distorsión geométrica asociada a la direccionalidad del proceso de deposición. Este comportamiento sugiere que las piezas de geometría delgada fabricadas mediante FFF metálico pueden ser más susceptibles a deformaciones durante el tratamiento térmico, especialmente cuando existen diferencias en la densificación y contracción entre capas (Bittner et al., 2022).

4.2 Metalografía y microscopia óptica

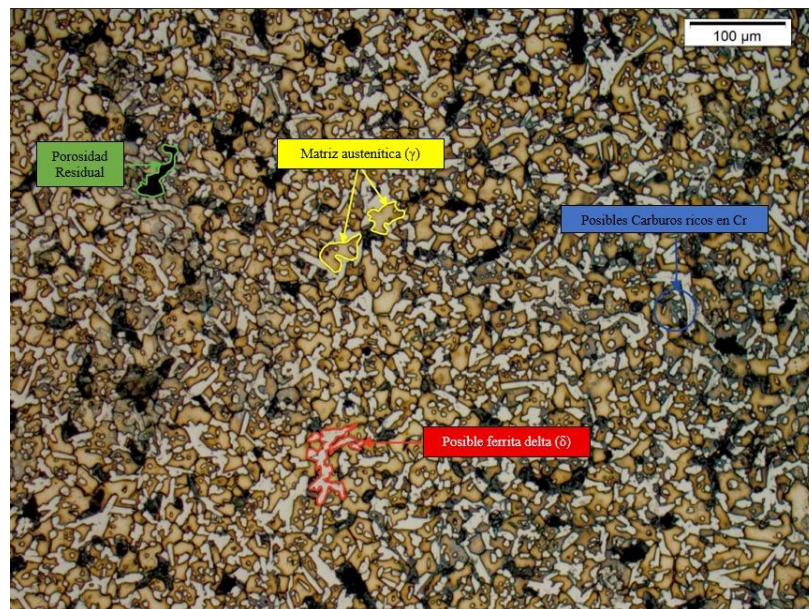
En este apartado se presentan los resultados de la caracterización microestructural del acero inoxidable 316L fabricado mediante manufactura aditiva por extrusión de filamento y posterior sinterizado. A continuación, se analizan las características observadas en las diferentes caras de la muestra, considerando la morfología microestructural, la distribución de fases y la presencia de porosidad residual asociada al proceso de fabricación.

Se efectuó la observación mediante microscopía óptica a un aumento de 200X en tres caras representativas de la muestra: frontal, lateral derecha y superior. En la Figura 22, se observa la

vista frontal de la muestra que corresponde a la cara XZ evidenciada en la Figura 20c, se aprecia una estructura heterogénea con contornos de grano claramente definidos y distribución irregular de los constituyentes microestructurales en la matriz metálica.

Figura 22

Microestructura frontal de la probeta de acero inoxidable 316L a 200X

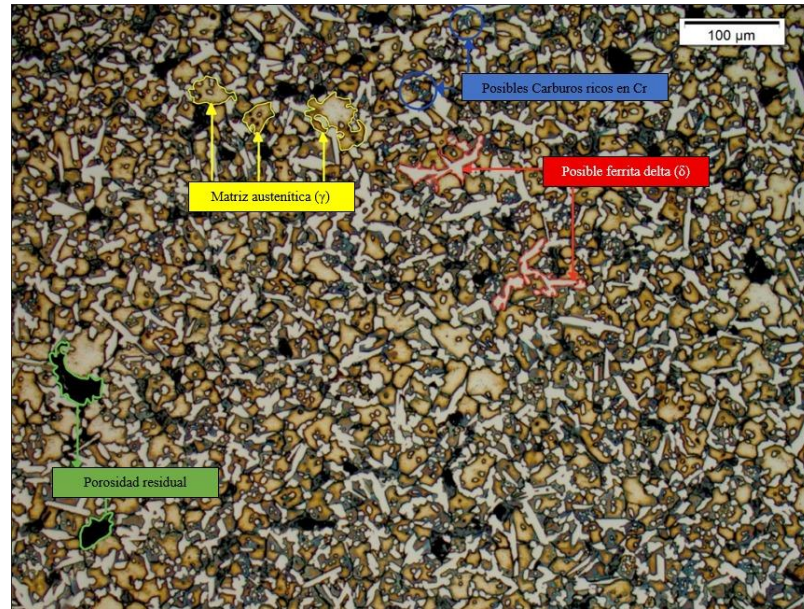


Asimismo, se evidenció porosidad residual en forma de cavidades oscuras de tamaño variable, localizadas tanto al interior de la matriz como en zonas intergranulares. La presencia de estos defectos sugiere que el material no alcanzó una densificación completamente uniforme durante el proceso de sinterizado, condición que puede influir en sus propiedades mecánicas (Thompson et al., 2021).

Por otro parte, la Figura 23 muestra la cara lateral derecha la cual sería el plano YZ en la Figura 20, se identifica una morfología similar a la vista frontal, compuesta por granos irregulares y regiones de contraste distribuidas de manera relativamente homogénea sobre la superficie analizada.

Figura 23

Microestructura de la cara lateral derecha de acero inoxidable 316L a 200X

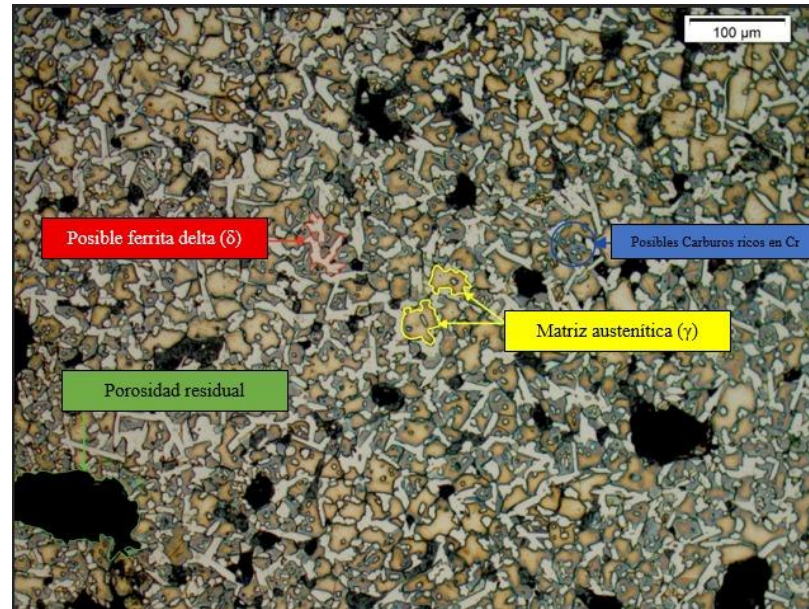


En esta orientación también se observa porosidad residual; sin embargo, las cavidades visibles presentan menor tamaño y una distribución más dispersa en comparación con la cara frontal. Esto indica una apariencia ligeramente más compacta del material en esta sección, lo cual podría estar asociado a variaciones locales en la consolidación durante el sinterizado y a la dirección de deposición del filamento en el proceso de manufactura aditiva.

Finalmente, la Figura 24 presenta una estructura heterogénea semejante a la observada en las demás caras analizadas, de contornos de grano definidos y presencia de constituyentes distribuidos en la matriz metálica.

Figura 24

Microestructura de la cara superior de acero inoxidable 316L a 200X



No obstante, esta cara exhibe una mayor cantidad de porosidad visible, destacándose cavidades oscuras de mayor tamaño y distribución irregular. Lo anterior sugiere una consolidación menos uniforme en esta orientación, posiblemente relacionada con la naturaleza capa por capa del proceso FFF y con diferencias en la contracción térmica ocurrida durante el sinterizado, fenómeno reportado en piezas metálicas fabricadas mediante extrusión de material, donde la orientación de impresión influye directamente en la distribución de poros y en la densificación final del material (Cruz Sanchez et al., 2017; Sánchez Arcia, 2022)

El análisis microestructural realizado sobre la muestra permitió evidenciar una estructura heterogénea compuesta por matriz metálica continua, presencia de diferentes constituyentes microestructurales y porosidad residual distribuida de manera no uniforme en las tres caras analizadas. En las micrografías obtenidas se identificaron regiones claras y oscuras con distinta respuesta al ataque químico, lo cual sugiere la coexistencia de más de un constituyente

metalúrgico. Esta interpretación se fundamenta en que, durante el ataque químico metalográfico, las diferentes fases presentes en el material reaccionan de manera distinta al reactivo, generando contrastes asociados a variaciones en composición química y orientación cristalográfica (George F. Vander Voort, 2004). Adicionalmente, en materiales fabricados mediante manufactura aditiva metálica y posterior sinterización, es común la presencia de heterogeneidades microestructurales y porosidad residual debido a fenómenos asociados a la deposición capa por capa, difusión no uniforme y densificación incompleta del material durante el tratamiento térmico (González-Gutiérrez et al., 2018). En el acero inoxidable 316L, la fase predominante esperada es la austenita (γ), estabilizada principalmente por el contenido de níquel (Ni), elemento que favorece una estructura cúbica centrada en las caras y aporta alta ductilidad, tenacidad y buena resistencia a la corrosión. Adicionalmente, el cromo (Cr) cumple un papel fundamental al permitir la formación de una capa pasiva superficial rica en óxidos protectores, responsable de la elevada resistencia a la oxidación característica de este material (Baddoo, 2008).

Sin embargo, bajo determinadas condiciones térmicas, velocidades de enfriamiento y composición química local, también puede presentarse cierta fracción de ferrita delta (δ) o fases secundarias residuales. La presencia de ferrita en aceros inoxidables austeníticos puede relacionarse con segregaciones locales de cromo y con transformaciones incompletas durante el enfriamiento posterior al sinterizado. Esto podría explicar parcialmente la diversidad de contrastes observados en las micrografías analizadas.

Debe considerarse además que el proceso térmico aplicado alcanzó una temperatura aproximada de 1239 °C, valor inferior al punto de fusión del acero inoxidable 316L. Por lo tanto, la consolidación del material no ocurre por fusión completa, sino por mecanismos de difusión en estado sólido, donde las partículas metálicas se unen progresivamente mediante crecimiento de

cuellos de sinterización y reducción de vacíos internos. Debido a que no se alcanza el estado líquido, es normal que persistan heterogeneidades microestructurales, remanentes de partículas originales y múltiples constituyentes metalográficos (Chang & Zhao, 2013).

Otro aspecto relevante corresponde a la posible formación de carburos ricos en cromo, especialmente si durante el ciclo térmico existieron zonas con enriquecimiento local de carbono. Durante la etapa de desaglomerado, el polímero presente en el filamento debe degradarse y volatilizarse progresivamente. Si esta eliminación no ocurre de forma completamente eficiente, residuos carbonosos podrían permanecer temporalmente en la estructura y reaccionar con el material metálico durante el calentamiento (Heany, 2019). En dichas condiciones, podría favorecerse localmente la precipitación de carburos del tipo $Cr_{23}C_6$, especialmente en contornos de grano. La formación de estos compuestos puede consumir cromo disponible en ciertas zonas y afectar tanto la homogeneidad microestructural como la resistencia a la corrosión del material (Lippold, 2016). No obstante, la confirmación precisa de carburos requiere técnicas complementarias como microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis químico puntual por técnicas espectrales ODS (espectroscopia de emisión óptica) o por EDS (espectroscopia de electrones dispersados), los cuales se plantean para estudios futuros que permitan validar estas suposiciones.

4.2.1 Análisis de Porosidad

Las imágenes se procesaron a través de imageJ y son mostradas en la

Figura 25. La cuantificación de la porosidad superficial evidenció diferencias entre las caras analizadas de la probeta. La cara superior presentó el mayor porcentaje de porosidad, mientras que la cara lateral derecha registró el menor valor. Este comportamiento sugiere una distribución anisotrópica de vacíos dentro de la pieza, característica asociada a los procesos de

manufactura aditiva por deposición capa a capa. Los resultados obtenidos de la cuantificación de porosidad superficial se presentan en la Tabla 6.

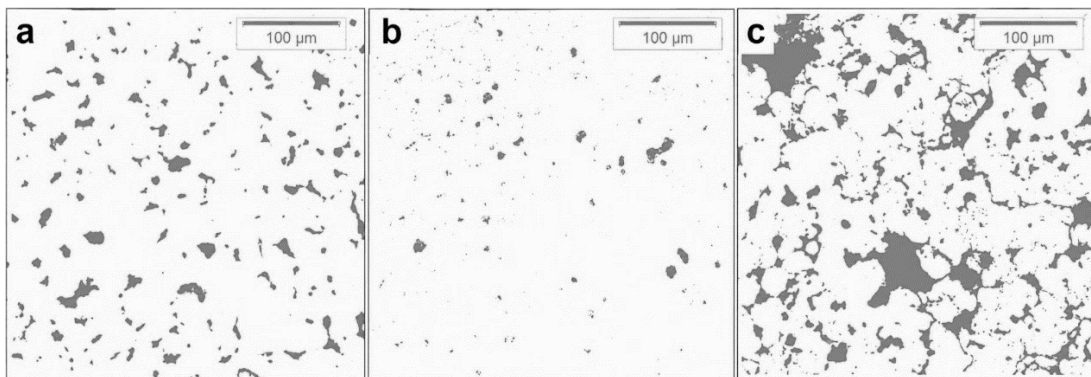
Tabla 6

Porcentaje de porosidad superficial

Cara analizada	Porosidad (%)
Frontal	8.664
Lateral derecha	7.400
Superior	19.000

Figura 25

Micrografías de porosidad a 200X



Nota. a) Frontal, b) lateral derecha c) superior

Adicionalmente, debe recordarse que durante la impresión se configuró una densidad de relleno del 90%, ya que el fabricante recomienda no emplear 100% de relleno para permitir la evacuación de gases durante el desaglomerado y sinterizado. En consecuencia, una parte de la porosidad final puede originarse desde la etapa de impresión, debido a espacios entre trayectorias de extrusión, unión incompleta entre cordones depositados y vacíos entre capas consecutivas.

Por otra parte, la etapa de sinterizado también influye directamente en la densificación final. Al no contar con una atmósfera inerte estrictamente controlada, la posible presencia de oxígeno dentro del horno pudo limitar los mecanismos de difusión entre partículas metálicas y favorecer procesos de oxidación superficial. Esto reduce la eficiencia del sinterizado y dificulta el cierre completo de poros internos.

En términos generales, los resultados obtenidos indican que la microestructura final del acero inoxidable 316L fabricado por FFF depende de la interacción simultánea entre la composición química del material, las fases presentes, la configuración de impresión y las condiciones térmicas de sinterizado. La presencia de porosidad residual y heterogeneidad microestructural puede afectar directamente propiedades mecánicas como resistencia a la tracción, ductilidad, impacto y comportamiento frente a la corrosión.

4.3 Ensayos mecánicos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la caracterización mecánica del acero inoxidable 316L fabricado mediante manufactura aditiva por extrusión de filamento y posterior sinterización. Se evaluaron las propiedades de tracción, dureza e impacto con el fin de analizar el comportamiento mecánico del material y su relación con la microestructura y la porosidad residual generadas durante el proceso de fabricación.

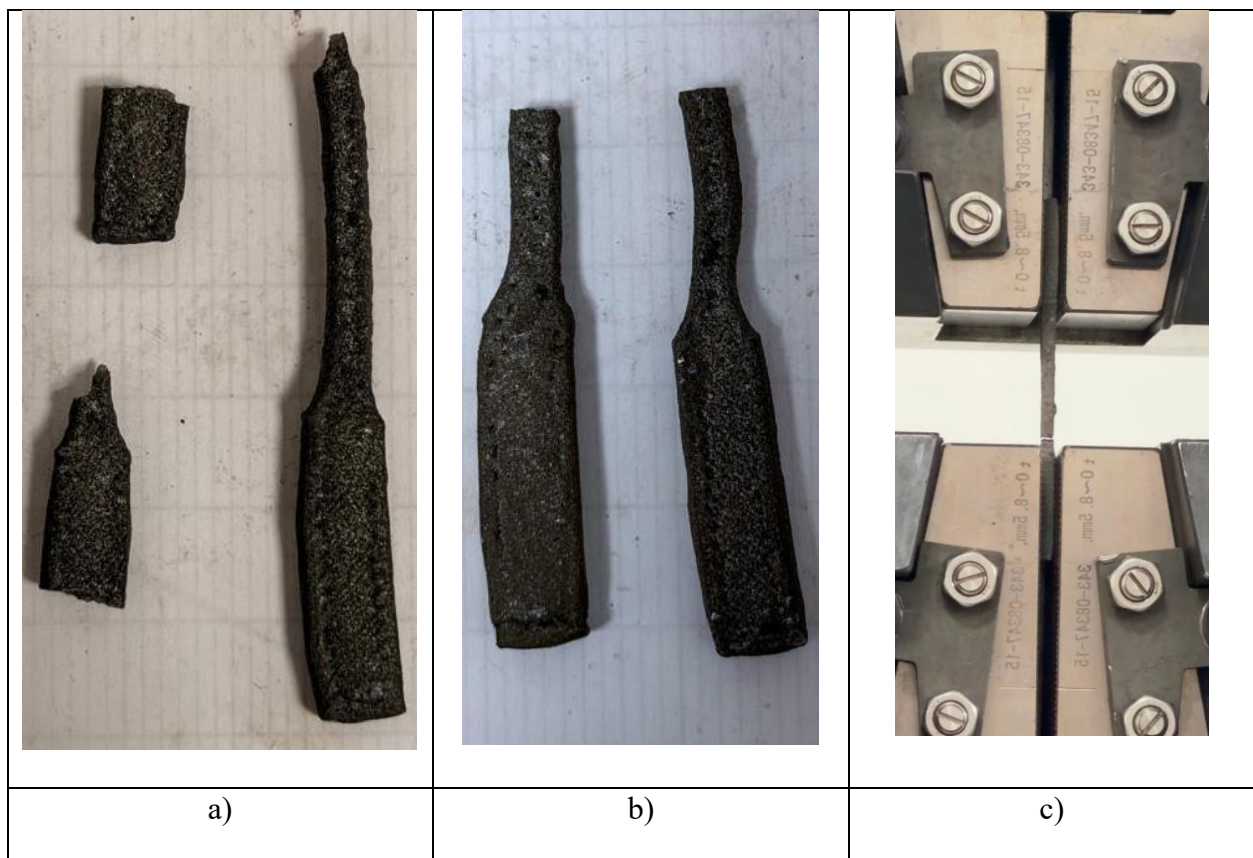
4.3.1 Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción realizados sobre las probetas de acero inoxidable SAE 316L fabricadas mediante manufactura aditiva por extrusión de filamento presentaron fallas prematuras asociadas a la baja integridad mecánica del material posterior al proceso de sinterización. Durante la instalación de la probeta 1 en las mordazas de la máquina universal de ensayos, la muestra se fracturó antes del inicio de la prueba, por lo que no fue posible registrar datos mecánicos. La

probeta 2 logró instalarse en el equipo; sin embargo, presentó fractura prácticamente instantánea antes de generar una curva representativa esfuerzo-deformación, registrándose una fuerza máxima cercana a 4.13 N y una tensión aproximada de 0.27 MPa. Por su parte, la probeta 3 logró soportar parcialmente la carga aplicada, alcanzando una fuerza máxima de 846.78 N, una tensión máxima aproximada de 62.84 MPa y una deformación cercana al 2.51 % antes de fracturarse. Los resultados de las probetas 2 y 3 son presentados en los apéndices. Las probetas después de los ensayos de tracción son mostradas en la Figura 26.

Figura 26

Probetas de tracción ensayadas



Nota. a) Probeta 1 b) Probeta 2 c) Probeta 3

Los resultados obtenidos evidencian un comportamiento predominantemente frágil del material fabricado mediante FFF metálico, presentándose una capacidad limitada para soportar deformación plástica antes de la fractura. Este comportamiento puede relacionarse directamente con las características microestructurales observadas previamente en el proyecto, donde el análisis metalográfico evidenció presencia de porosidad residual, discontinuidades entre capas y heterogeneidad en la consolidación del material posterior al sinterizado. La existencia de estos defectos internos favorece la concentración local de esfuerzos y facilita la iniciación y propagación de grietas bajo cargas de tracción, reduciendo significativamente la resistencia mecánica del material.

Asimismo, los resultados obtenidos muestran concordancia con los ensayos de impacto realizados previamente, donde las probetas presentaron baja capacidad de absorción de energía y comportamiento frágil durante la fractura. La relación entre baja tenacidad y presencia de porosidad residual ha sido ampliamente reportada en materiales fabricados mediante manufactura aditiva metálica por extrusión de filamento, debido a que los vacíos internos y las uniones incompletas entre capas actúan como concentradores de esfuerzo que aceleran la falla del material bajo sollicitaciones mecánicas (Gonzalez-Gutierrez, 2018).

Resultados similares fueron reportados por Carminati et al. (2022), quienes evaluaron probetas de acero inoxidable AISI 316L fabricadas mediante Metal Material Extrusion, observando una disminución considerable en las propiedades mecánicas respecto al material convencional debido a defectos internos asociados al proceso de sinterización y a la presencia de porosidad residual. De manera similar, (Cerlincă et al., 2024) reportaron comportamiento anisotrópico y dispersión en los resultados de tracción de piezas fabricadas mediante FDM metálico utilizando filamentos comerciales de The Virtual Foundry, atribuyendo estas variaciones

a diferencias en densificación, orientación de impresión y defectos generados durante la fabricación.

En términos generales, las fallas prematuras observadas durante los ensayos de tracción indican que las condiciones de impresión y sinterización empleadas no permitieron obtener probetas con suficiente integridad estructural para desarrollar ensayos completamente representativos bajo los lineamientos de la norma ASTM E8/E8M. Sin embargo, el comportamiento observado resulta consistente con la microestructura, los niveles de porosidad y la baja resistencia al impacto obtenidos experimentalmente en el presente trabajo, así como con las limitaciones reportadas en la literatura científica para componentes metálicos fabricados mediante tecnologías FFF.

4.3.2 Ensayos de dureza

Los resultados del ensayo de microdureza mostrados en la Tabla 7 deben interpretarse considerando la heterogeneidad microestructural del material fabricado mediante manufactura aditiva por extrusión de filamento y posterior sinterización. El análisis metalográfico evidenció la presencia de múltiples constituyentes microestructurales, así como porosidad residual distribuida de manera no uniforme dentro de la matriz metálica. Esta condición implica que la respuesta mecánica del material no es homogénea, sino que varía localmente dependiendo de la región analizada.

En este contexto, los valores obtenidos corresponden a mediciones puntuales que reflejan el comportamiento mecánico de zonas específicas del material, permitiendo identificar variaciones locales de dureza asociadas a la complejidad microestructural generada durante el proceso FFF y las etapas posteriores de desaglomerado y sinterización.

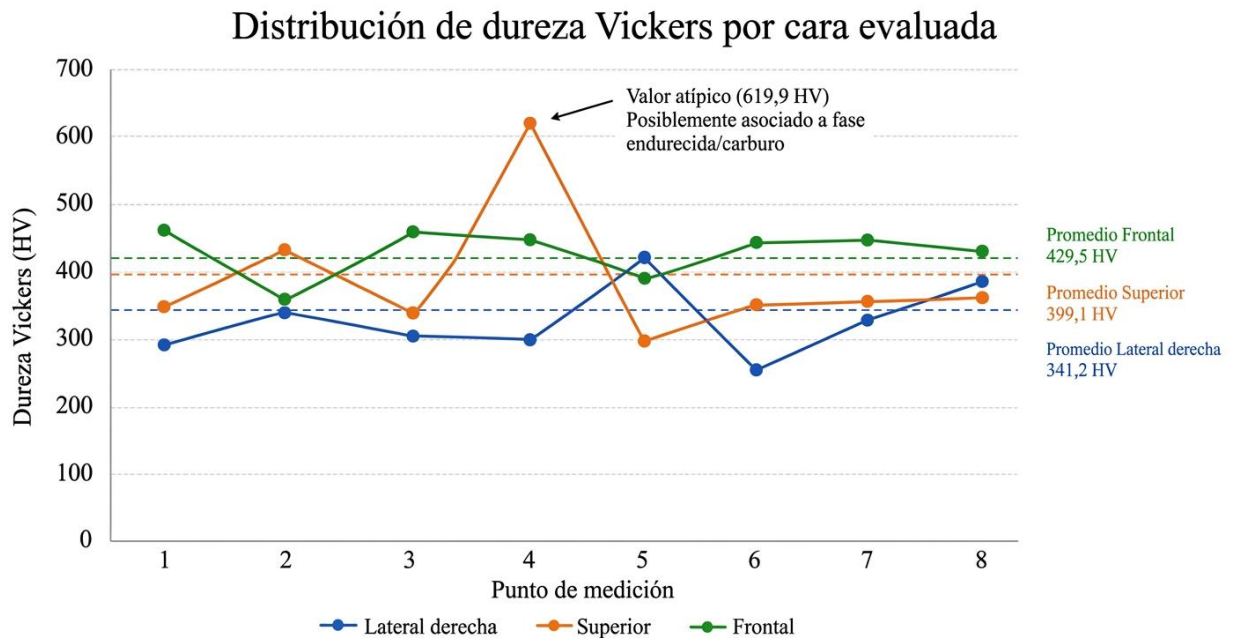
Adicionalmente, la medición complementaria de dureza Vickers realizada con una carga de 1 kgf arrojó un valor de 372 HV, el cual permite aproximar el comportamiento global del material al involucrar un mayor volumen de microconstituyentes y reducir parcialmente el efecto local de la heterogeneidad microestructural.

Tabla 7

Microdureza Vickers

Medición	Frontal (HV)	Lateral Derecha (HV)	Superior (HV)
1	463.9	299.1	343.3
2	360.9	364.0	427.0
3	460.9	332.8	359.7
4	451.5	331.0	619.9
5	403.0	429.8	314.8
6	455.0	258.4	364.5
7	447.2	370.0	372.0
8	444.0	420.3	363.0
Promedio	435.3 ± 35.8	350.7 ± 56.5	395.5 ± 89.4

Los resultados presentados en la Tabla 7 evidencian una variación significativa en los valores de dureza entre las diferentes caras analizadas, siendo la cara frontal la que presenta el mayor promedio, seguida de la cara superior y, finalmente, la cara lateral derecha. Este comportamiento refleja una respuesta mecánica no uniforme del material, asociada tanto a la naturaleza del proceso de fabricación como a la orientación de impresión empleada durante la deposición capa por capa. Esto se evidencia de mejor manera a partir del análisis gráfico de la dureza por cada cara medida que se presenta en la Figura 27.

Figura 27*Distribución de dureza Vickers por cara evaluada*

Asimismo, se observa una dispersión considerable en los valores de dureza dentro de cada cara, incluyendo mediciones puntuales superiores a 600 HV, lo que confirma la presencia de una microestructura heterogénea. Estos valores superan ampliamente los rangos típicos reportados para el acero inoxidable 316L obtenido por métodos convencionales, el cual en condición recocida suele presentar durezas entre 150 y 220 HV, y en estado trabajado en frío entre 250 y 300 HV (DebRoy, 2018). Lo anterior indica la existencia de zonas localmente endurecidas dentro del material. La coexistencia de valores elevados y dispersos de dureza sugiere que el material presenta regiones con distintos niveles de densificación y posibles variaciones microestructurales generadas durante el proceso de sinterizado. Esta interpretación es consistente con las micrografías obtenidas, donde se observaron diferencias en la distribución de porosidad y en la respuesta al ataque químico entre las distintas caras analizadas. Adicionalmente, la orientación del relleno y la trayectoria de

deposición podrían haber influido en la difusión térmica y en la consolidación local del material, favoreciendo un comportamiento anisotrópico tanto en la microestructura como en la respuesta mecánica. En conjunto, estos resultados confirman que el acero inoxidable 316L fabricado mediante FFF y sinterizado presenta un comportamiento mecánico heterogéneo y anisotrópico, en el que las propiedades locales dependen directamente de la orientación de impresión, la densificación alcanzada y la microestructura desarrollada durante el proceso de fabricación.

4.3.3 Ensayos de impacto

Los resultados obtenidos del ensayo de impacto para las probetas fabricadas por AM y de manera convencional se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8

Impacto Charpy AM y convencional

Probeta	Manufactura aditiva (J)	Convencional (J)
1	4.09	90.74
2	9.81	90.74
3	4.09	78.48
Promedio	6.00 ± 3.30	86.65 ± 7.08

Durante el ensayo de impacto se evidenció una diferencia significativa en el modo de falla entre ambos materiales. Las probetas fabricadas mediante manufactura aditiva se fracturaron completamente tras el impacto, lo que indica una baja capacidad de absorción de energía y un comportamiento predominantemente frágil. En contraste, las probetas correspondientes al material convencional no se fracturaron totalmente, permaneciendo parcialmente unidas y presentando

deformación plástica en la zona de la entalla, característica típica de materiales con mayor tenacidad.

El valor promedio de energía absorbida para las probetas fabricadas mediante manufactura aditiva fue de 6.00 ± 3.30 J, mientras que el acero inoxidable SAE 316L fabricado mediante rutas convencionales alcanzó un promedio de 86.65 ± 7.08 J, evidenciando una capacidad considerablemente superior de absorción de energía antes de la fractura.

La baja resistencia al impacto del material fabricado mediante FFF puede asociarse principalmente a la presencia de porosidad residual, distribución heterogénea de vacíos y posibles discontinuidades interlaminares generadas durante el proceso de fabricación. Estos defectos internos actúan como concentradores de esfuerzos, favoreciendo la iniciación y propagación rápida de grietas bajo cargas dinámicas, reduciendo significativamente la capacidad del material para absorber energía antes de fracturarse (DebRoy et al., 2018)

Asimismo, la consolidación incompleta del material durante la etapa de sinterización puede generar interfaces débiles entre partículas y entre capas depositadas, disminuyendo la capacidad de deformación plástica del material y promoviendo un comportamiento más frágil. Este fenómeno se encuentra estrechamente relacionado con la naturaleza capa por capa del proceso FFF y con las variaciones locales de densificación observadas en el análisis microestructural.

Adicionalmente, la presencia de regiones localmente endurecidas, evidenciadas previamente en los resultados de dureza, puede contribuir al incremento de fragilidad del material cuando se combina con la porosidad existente, disminuyendo la tenacidad global del sistema (Herzog, Seyda, Wycisk, et al., 2016)

En contraste, el acero inoxidable SAE 316L fabricado mediante rutas convencionales presenta una microestructura más homogénea y continua, con menor presencia de defectos internos

y una mayor cohesión metalúrgica, favoreciendo la absorción de energía mediante deformación plástica antes de la fractura.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que el acero inoxidable SAE 316L fabricado mediante FFF y posterior sinterización presenta una reducción drástica de sus propiedades mecánicas significativamente inferior en comparación con el material convencional. Este comportamiento se encuentra directamente relacionado con la heterogeneidad microestructural, la presencia de porosidad residual y los defectos inherentes al proceso de manufactura aditiva y densificación térmica.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron caracterizar el comportamiento del acero inoxidable SAE 316L fabricado mediante manufactura aditiva, y utilizando una impresora 3D Crealty Ender 3 S1 y posteriores tratamientos térmicos de desaglomerado y sinterización realizados en un horno tubular Carbolite TZF, empleando la técnica de extrusión de filamento. La evaluación dimensional evidenció una contracción anisotrópica posterior al sinterizado, registrándose reducciones entre 7.25 % y 15.75 %, siendo el eje Z la dirección con mayor contracción. El sobredimensionamiento del 10 % permitió compensar parcialmente la reducción dimensional observada en las probetas fabricadas, confirmando la influencia de la orientación de impresión, la geometría de la pieza y las condiciones térmicas sobre la estabilidad dimensional final del material. Adicionalmente, la liberación y escape de gases durante las etapas de desaglomerado y sinterización pudo contribuir a la generación de deformaciones, expansión localizada y variaciones dimensionales observadas en algunas probetas, afectando la densificación homogénea del material.

El análisis microestructural mostró una estructura heterogénea compuesta principalmente por una matriz austenítica (γ), presencia de porosidad residual y posibles fases secundarias asociadas al proceso de fabricación y sinterización. Los porcentajes de porosidad obtenidos fueron aproximadamente 8.7 % en la cara frontal, 7.4 % en la lateral derecha y hasta 19 % en la cara superior, evidenciando una consolidación no uniforme del material y la influencia del proceso capa por capa característico del FFF. Los ensayos de microdureza presentaron valores promedio de 435.3 ± 35.8 HV en la cara frontal, 350.7 ± 56.5 HV en la lateral derecha y 395.5 ± 89.4 HV en la cara superior, además de una dureza global aproximada de 372 HV en HV1. También se registraron mediciones puntuales superiores a 600 HV, indicando regiones localmente endurecidas y una importante heterogeneidad microestructural.

En los ensayos mecánicos, las probetas fabricadas mediante manufactura aditiva presentaron valores de impacto Charpy de 4.09 J, 9.81 J y 4.09 J, con un promedio de 6.00 ± 3.30 J, considerablemente inferiores al promedio de 86.65 ± 7.08 J obtenido para el acero inoxidable 316L convencional. Asimismo, durante los ensayos de tracción se presentaron fracturas prematuras en varias probetas, impidiendo obtener curvas esfuerzo-deformación completas y resultados concluyentes bajo los criterios de la norma ASTM E8/E8M:22, por lo que dichos resultados no deben considerarse definitivos para describir el comportamiento real del material. Finalmente, se concluye que las propiedades finales del acero inoxidable SAE 316L fabricado mediante FFF dependen significativamente de los parámetros de impresión, las condiciones de sinterización y la calidad y calibración de los equipos utilizados, donde factores como la estabilidad de la impresora y la uniformidad térmica del horno tubular influyen directamente en la densificación, la formación de porosidad y el comportamiento mecánico final del material.

6. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la presente investigación, es conveniente adecuar los parámetros de impresión y sinterización del acero inoxidable 316L fabricado mediante FFF, con el fin de reducir la porosidad residual y mejorar la uniformidad microestructural y mecánica del material. Variables como la orientación de impresión, densidad de relleno y condiciones térmicas pueden influir directamente en la consolidación final de las piezas.

Asimismo, es importante complementar la caracterización microestructural mediante técnicas avanzadas como microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis OES o EDS, con el propósito de identificar con mayor precisión las fases presentes y posibles precipitados formados durante el proceso térmico.

Para futuras investigaciones, sería pertinente utilizar sistemas de sinterización con atmósfera controlada o inerte, ya que esto podría mejorar los mecanismos de difusión entre partículas metálicas y disminuir fenómenos de oxidación que afectan las propiedades finales del material.

Resulta conveniente mejorar las condiciones de impresión y sinterización para incrementar la densificación del material y reducir la porosidad residual, factores que influyen directamente en la resistencia mecánica y en la fractura prematura observada en las muestras evaluadas.

Finalmente, resulta necesario ampliar la cantidad de probetas evaluadas en los diferentes ensayos mecánicos y dimensionales, con el fin de obtener resultados más representativos y reducir la influencia de variaciones locales asociadas al proceso de manufactura aditiva y sinterización del material.

Referencias

- Baddoo, N. R. (2008). Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11), 1199–1206. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.011>
- 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>
- Bittner, M., Felzmann, R., Gonzalez-Gutierrez, J., & Schuschnigg, S. (2022). *Shrinkage and deformation analysis of metal material extrusion parts during debinding and sintering*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(9), 7201–7212. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06684-2>
- Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2), 659–681. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2017.05.009>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020a). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
- Cerlincă, D.-A., Tamaşag, I., Beşliu-Băncescu, I., Severin, T.-L., & Dulucianu, C. (2024). Experimental investigation of FDM manufacturing of 316l stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 135(3–4), 1449–1463. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14602-8>
- Chang, I., & Zhao, Y. (2013). *Advances in powder metallurgy*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857098900>

- Costa, J. M. and S. F. J. G. and C. R. D. S. G. and B. A. P. M. (2023). Current status and future perspectives of fused filament fabrication for polymeric and metallic materials. *Materials*, 16.
- Cruz Sanchez, F. A., Boudaoud, H., Hoppe, S., & Camargo, M. (2017). Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues. *Additive Manufacturing*, 17, 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.013>
- Davis, J. R. (2019a). *Stainless Steels*. ASM International.
- DebRoy, T., Wei, H. L., & Zuback, J. S. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- Ferro, P., Fabrizi, A., Elsayed, H., & Savio, G. (2023). Multi-Material Additive Manufacturing: Creating IN718-AISI 316L Bimetallic Parts by 3D Printing, Debinding, and Sintering. *Sustainability (Switzerland)*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/su151511911>
- Foundry, T. V. (2023). *Filamet 316L Technical Data Sheet*.
- Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. En *Journal of Materials Engineering and Performance* (Vol. 23, Número 6, pp. 1917–1928). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- Galati, M., & Minetola, P. (2019). Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts. *Materials*, 12(24), 4122. <https://doi.org/10.3390/ma12244122>
- George F. Vander Voort. (2004). *Metallography and Microstructures* (Vol. 9). ASM international.

- German, R. M. (2014). *Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles*. Elsevier.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2014). *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition* (2a ed.).
- Gonzalez-Gutierrez, J., & Cano, S. (2018). Additive manufacturing of metallic components by material extrusion. *Materials*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/ma11050840>
- Handbook of Metal Injection Molding*. (2019). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01641-2>
- Herzog, D., Seyda, V., & Wycisk, E. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- International, A. (2022). *ASTM E8/E8M-23: : Standard test methods for tension testing of metallic materials*. ASTM International.
- International, A. (2023b). *ASTM E384-23: Standard test method for microindentation hardness of materials*. ASTM International.
- International, A. (2024). *ASTM E23-24: Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials*. ASTM International
- International, A. (2017). *ASTM E3-17: Standard guide for preparation of metallographic specimens*. ASTM International.
- International, A. (2020). *ASTM E407-20: Standard practice for microetching metals and alloys*. ASTM International.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology*. Pearson.
- Lippold, J. C. , & K. D. J. (2016). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. John Wiley & Sons.

- Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P., & Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 100707. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707>
- Mousapour, M., & Vaezi, M. (2020). Metal material extrusion: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 456–468. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.035>
- Musa, N. H., Mazlan, N., Yusuf, S. M., Nordin, N. A., Mazlan, S. A., & Gao, N. (2024). High Density Level and Hardness Values of Additively Manufactured 316L Stainless Steel Fabricated by Fused Filament Fabrication. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 34(2), 144–152. <https://doi.org/10.37934/araset.34.2.144152>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.02.012>
- Padilha, A. F. P. R. L. (2016). Deformation-induced martensitic transformation in austenitic stainless steels. *Materials Science Forum*, 879.
- Royer, A., Barrière, T., & Gelin, J.-C. (2016). Development and Characterization of a Metal Injection Molding Bio Sourced Inconel 718 Feedstock Based on Polyhydroxyalkanoates. *Metals*, 6(4), 89. <https://doi.org/10.3390/met6040089>
- Sánchez Arcia, A. H. (2022). *Acero inoxidable 316 L*. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/4579>

- Shanmugam, S. ; B. S. S. ; K. S. M. (2019). *Metallurgy and Processing of Stainless Steels*. Springer.
- Singh, S., Ramakrishna, S., & Singh, R. (2017). Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 185–200. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>
- Srivastav, A. K., Chawake, N., Yadav, D., Karthiselva, N. S., & Murty, B. S. (2020). *Localized pore evolution assisted densification during spark plasma sintering of nanocrystalline W-5wt.%Mo alloy*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2006.02340>
- Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., & Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*, 65(2), 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>
- Thompson, Y., Gonzalez-Gutierrez, J., Kukla, C., & Felfer, P. (2021). *Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel*. *Additive Manufacturing*, 47, 102289. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102289>
- Totten, G. E. (2007). *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. CRC Press.
- Tseng, S.-C., Chiu, C.-C., Qayyum, F., Guk, S., Chao, C.-K., & Prah, U. (2022). The Effect of the Energy Release Rate on the Local Damage Evolution in TRIP Steel Composite Reinforced with Zirconia Particles. *Materials*, 16(1), 134. <https://doi.org/10.3390/ma16010134>
- Warrier, Nirupama, & Kunal H. Kate. (2018). *Progress in Additive Manufacturing* (3a ed., Vol. 3).

Apéndices

En esta sección se presentan tablas y gráficas complementarias correspondientes a los resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados a las probetas fabricadas en acero inoxidable SAE 316L mediante tecnología FFF.

Resultados de tracción probeta 2

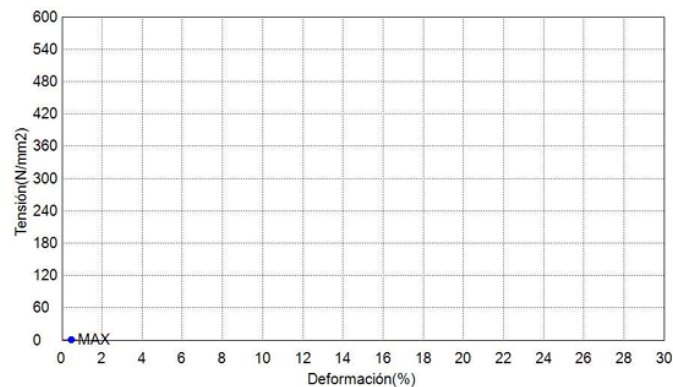
Universidad Industrial de Santander EIMCM traccion acero inoxidable 2

Cliente	GIMBS	Nombre de producto	G001C25_P1
Operador	César Ramos Oviedo	Fecha de ensayo	14/05/2026
Maquina de ensayos	AG-X/MST-X/X-Type	No. de maquina	I33005203077
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
acero inoxidable	3,6700	4,2300	30,0000

Nombre Parametros	Max_Tensión Calc. at Entire Areas	Max_Deformación Calc. at Entire Areas	Rotura_Tensión Sensibilidad 10	Rotura_Deformación Sensibilidad 10
Unidad	N/mm2	%	N/mm2	%
acero inoxidable	0,26620	0,46858	--	--
Media	0,26620	0,46858	--	--
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Maximo	0,26620	0,46858	--	--
Rango	0,00000	0,00000	--	--

Nombre Parametros	Energia1 Calc. at Entire Areas	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas	Max_Deformacion Calc. at Entire Areas
Unidad	J	N	%
acero inoxidable	-0,00066	4,13259	0,46858
Media	-0,00066	4,13259	0,46858
Desviacion Estandar	--	--	--
Maximo	-0,00066	4,13259	0,46858
Rango	0,00000	0,00000	0,00000



Apéndice A. Resultados de tracción probeta 2

- Resultados de tracción probeta 3.

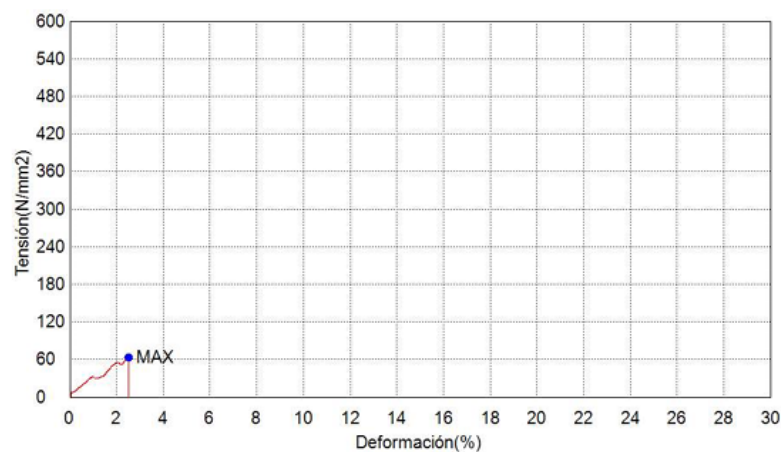
Universidad Industrial de Santander EIMCM traccion acero inoxidable 3

Cliente	GIMBS	Nombre de producto	G001C25_P1
Operador	César Ramos Oviedo	Fecha de ensayo	14/05/2026
Maquina de ensayos	AG-X/MST-X/X-Type	No. de maquina	I33005203077
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
acero inoxidable	3,5000	3,8500	32,2800

Nombre Parametros	Max._Tensión Calc. at Entire Areas	Max._Deformación Calc. at Entire Areas	Rotura_Tensión Sensibilidad 10	Rotura_Deformación Sensibilidad 10
Unidad	N/mm2	%	N/mm2	%
acero inoxidable	62,8411	2,51362	--	--
Media	62,8411	2,51362	--	--
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Maximo	62,8411	2,51362	--	--
Rango	0,00000	0,00000	--	--

Nombre Parametros	Energia1 Calc. at Entire Areas	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Deformacion Calc. at Entire Areas
Unidad	J	N	%
acero inoxidable	0,37456	846,783	2,51362
Media	0,37456	846,783	2,51362
Desviacion Estandar	--	--	--
Maximo	0,37456	846,783	2,51362
Rango	0,00000	0,00000	0,00000



Apéndice B. Resultados de tracción probeta 3