

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
MECÁNICA**

**Caracterización mecánica, microestructural, y corrosiva de piezas
y probetas desagregadas y sinterizadas a base de filamentos
poliméricos con alta carga metálica de acero 316L**

Autora: Balladares Mena Natalia Isabella

Director: Ing. Riofrío Villena, Patricio Gustavo PhD.



Fecha: 2026/08/06

Índice

01

Planteamiento del Problema

Contexto, justificación y relevancia del estudio

02

Objetivos

Objetivo general, específicos y delimitación

03

Marco Teórico

FDM, desagregado y sinterizado

04

Metodología de Investigación

Materiales, equipos y procedimientos

05

Análisis de Resultados

Calidad superficial, dimensional, microestructural, mecánico y corrosivo

06

Conclusiones y Recomendaciones

Hallazgos principales y líneas futuras



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Planteamiento del Problema



Sector Biomédico Ecuatoriano

Poca fabricación de prótesis e implantes médicos. El sistema de salud depende de la importación, encareciendo costos y ampliando tiempos de entrega.



Limitaciones de Métodos

Mecanizado CNC, fundición e inyección generan gran desperdicio. Prótesis costosas por adaptación a la anatomía del paciente.

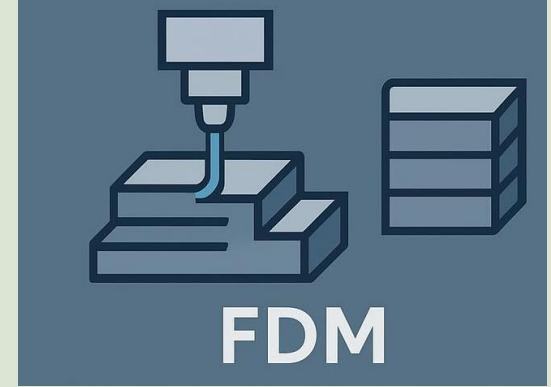


Brecha de Conocimiento

Escasez de documentación local sobre el comportamiento de piezas metálicas fabricadas con filamentos de acero 316L, sometidas a ciclos térmicos.



Ventajas



- ❑ Menor costo de equipamiento
- ❑ Libertad de diseño geométrico
- ❑ Mínimo desperdicio de material
- ❑ Aplicación en medicina ortopédica

Justificación e Importancia

Justificación Científica

Generar una base documentada sobre el comportamiento de las piezas fabricadas.

Aporte técnico al proyecto de investigación “Fabricación de Prototipos Médicos no Probados en Humanos con Filamentos de Alta Carga Metálica por Impresión 3D”, en desarrollo.



Justificación Técnica

El FDM supera a métodos tradicionales en flexibilidad de diseño, uso eficiente del material y reducción de costos.



Importancia Industrial

Los hallazgos sirven como directriz para futuras investigaciones en fabricación de implantes médicos y uso de biomateriales de bajo costo, buenas propiedades mecánicas y alta resistencia a la corrosión.



Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar piezas fabricadas por impresión 3D-FDM con filamentos de matriz polimérica de alta carga metálica de acero inoxidable 316L, sometidas a procesos térmicos de desagregado y sinterizado, evaluando su comportamiento microestructural, mecánico y corrosivo.

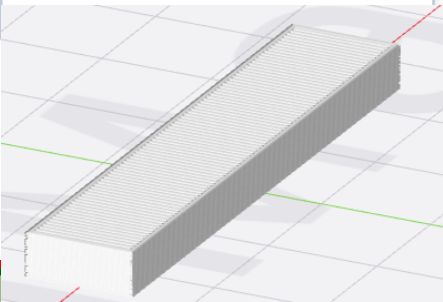
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1 Ejecutar el estado del arte de la caracterización de piezas y probetas desagregadas y sinterizadas obtenidas por impresión 3D-FDM con filamentos metálicos de acero 316L.
- 2 Elaborar el diseño experimental para la caracterización de piezas y probetas desagregadas y sinterizadas.
- 3 Imprimir, desagregar y sinterizar piezas y probetas a partir de filamentos con alta carga metálica de acero inoxidable 316L.
- 4 Caracterizar dimensional, microestructural, mecánica, porosa y corrosivamente las piezas y probetas obtenidas.

Proceso FDM con Filamentos Metálicos — Etapas

1 DISEÑO CAD

Modelo 3D exportado en formato STL. Software de laminado (ideaMaker) genera el G-Code con los parámetros de impresión.



2 PIEZA EN VERDE

FDM deposita filamento de alta carga metálica capa a capa. Composición: Matriz de polímero aglutinante polvo metálico



3 PIEZA MARRÓN

Desagregado: eliminación del polímero por vía térmica. Pieza porosa y frágil.



4 PIEZA SINTERIZADA

Sinterizado: Aumentar la temperatura acercándose al punto de fusión del acero inoxidable 316L, para reducir el espacio entre las partículas para un mayor contacto. Pieza sólida y metálica



Proceso de Desagregado y Sinterizado

Desagregado

Calentamiento lento para descomponer polímeros en fase gaseosa.

En atmósfera al ambiente y atmósfera de vacío para reducir oxidación.

Deja únicamente las partículas de metal unidas de forma frágil.

Sinterizado

Temperatura de trabajo entre 70% -90% del punto de fusión del acero 316L (~1262-1360 °C).

Unir partículas metálicas de la pieza marrón, reducir porosidad y aumentar densidad.

Produce una contracción dimensional anisotrópica que debe compensarse con sobredimensionamiento de 20% (Ultrafuse) y 10% (Virtual Foundry).



Impresora RAISE3D E2

- ☐ FDM / FFF
- ☐ Doble extrusor
- ☐ Volumen: 330×240×240 mm
- ☐ Boquillas: acero endurecido 0,4 / 0,6 mm
- ☐ T° boquilla máx.: 300°C



Filamentos

Filamento	BASF Ultrafuse 316L	Virtual Foundry 316L Filamet
Carga metálica	90% polvo acero 316L	86,1% polvo acero 316L
Aglutinante	10% mezcla de polímeros	13,9% PLA (aglutinante)
Diámetro	1,75 mm	1,75 mm
Boquilla	Boquilla 0,4 mm (recomendada)	Boquilla 0,6 mm (recomendada)
Composición	Fe (base) · Ni: 0,07-0,25% · Cr: 0,07-0,25% · Mo: <0,01%	Fe: 40-63,75% · Cr: 4-17% · Ni: 4-17% · Mo: 4,25% · PLA: <20%





Horno Tubular BR - 16MT

- ☐ Sistema de vacío para atmósfera controlada (bomba).
- ☐ Hasta los 1600°C
- ☐ Programación de ciclos Temp - Tiempo
- ☐ Crisoles: alúmina y acero AISI 304



Materiales, Equipos y Procedimientos para la Caracterización

Caracterización dimensional

- ❑ Calibrador pie de rey (apreciación 0,02 mm)



Calidad superficial

Calificación de calidad superficial y facilidad de desprendimiento de balsa de forma cualitativa.



Dimensional

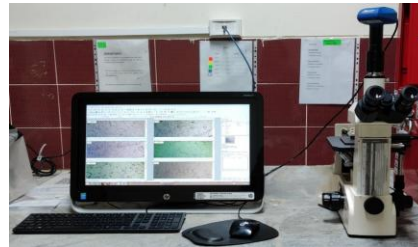
Calibrador pie de rey (0,02 mm)

Medición de longitud, ancho y espesor de piezas en verde y sinterizadas. Cálculo de variación % respecto al diseño CAD.

$$\%D = \frac{DD - DS}{DD} * 100\%$$

Caracterización microestructural

- ❑ Microscopio óptico
- ❑ Estereomicroscopio



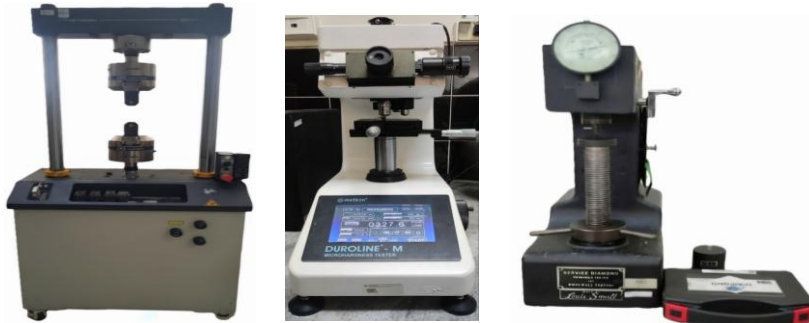
Microestructural

ASTM E3 (Preparación metalográfica)

Desbaste gradual hasta lija 2000, ataque químico y microscopía óptica. Análisis de granos, límites y fases austeníticas.

Caracterización mecánica

- ❑ Máq. ensayos universal INSTRON 8801
- ❑ Durómetro DUROLINE-M (Vickers HV)
- ❑ Durómetro Service Diamond Hardness Tester, 8BLP.



Tracción



ASTM D638 (verdeysinterizadas) / ASTM E8 (metal base)

ASTM D638 - Probetas tipo IV.
ASTM E8 - Espécimen de tamaño inferior
Equipo INSTRON 8801 - Extensómetro.
Sobredimensionamiento: 20% (Ultrafuse)
Velocidad de 5 mm/min.

Dureza



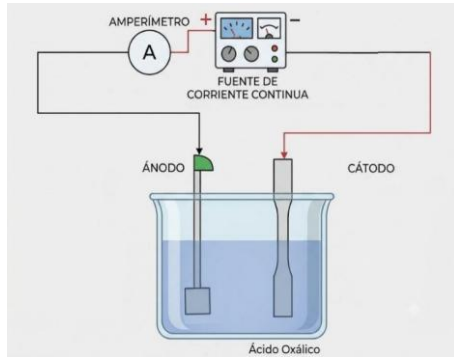
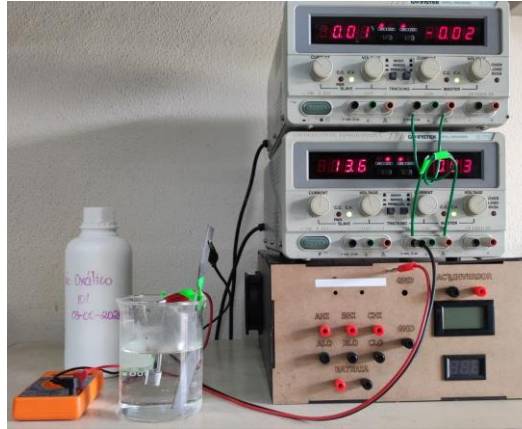
ISO 6507/ASTM E384 (Vickers) + ISO 6508/ASTM E18 Rockwell By C

Microdureza: DUROLINE-M, 500 gf, 5 s, 100x, indentador Vickers certificado.

Macro dureza: durómetro 8BLP, escalas HRB (bola 1/16" con 100 kgf) y HRC (cono diamante y 150 kgf).

Caracterización corrosiva

- ☐ Fuente de poder
- ☐ Ánodo (Piezas ensayadas)
- ☐ Cátodo (acero inox.)
- ☐ Ácido oxálico
- ☐ Vasos de precipitación
- ☐ Cables



Corrosión



ASTMA262 — Práctica A

Susceptibilidad a ataque intergranular en aceros inoxidable austeníticos. Análisis micrográfico comparativo sinterizadas vs material base.

$$C = \frac{1 A}{cm^2}$$

Porosidad



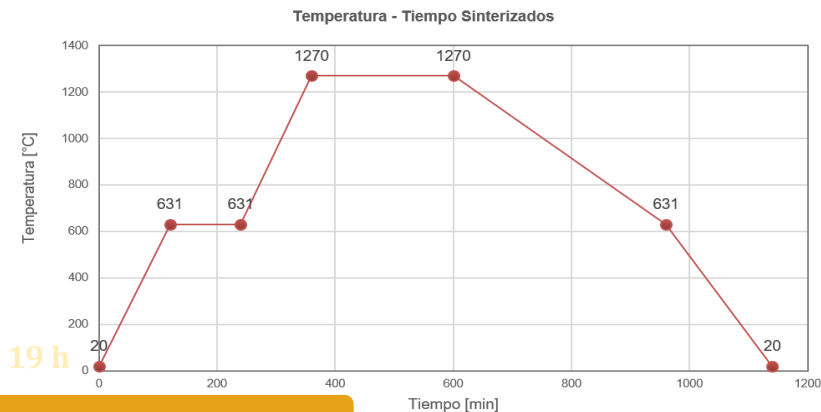
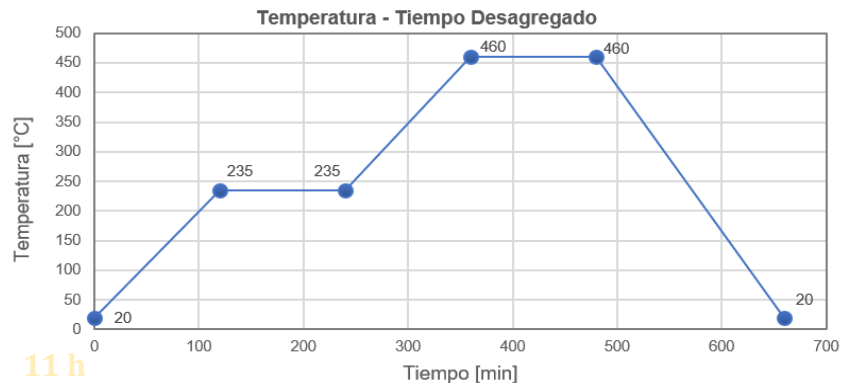
Software ImageJ — análisis de micrografías
ASTME1245

Práctica para determinar el contenido de inclusiones no metálicas o de constituyentes. Fracción de área vacía en sección transversal = fracción de volumen vacío en una pieza tridimensional (principio de Delesse).

Diseño Experimental

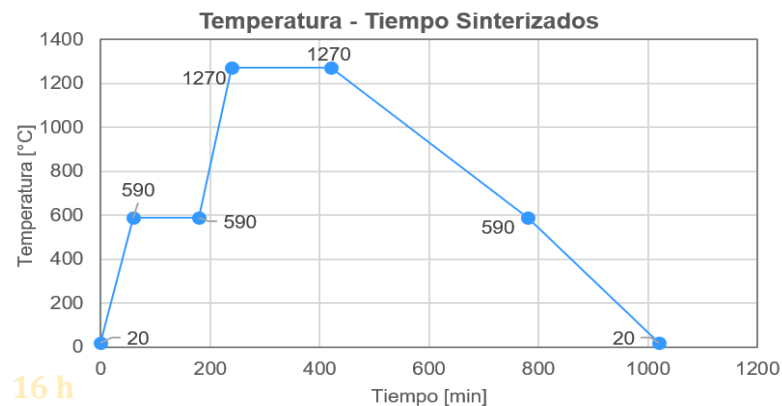
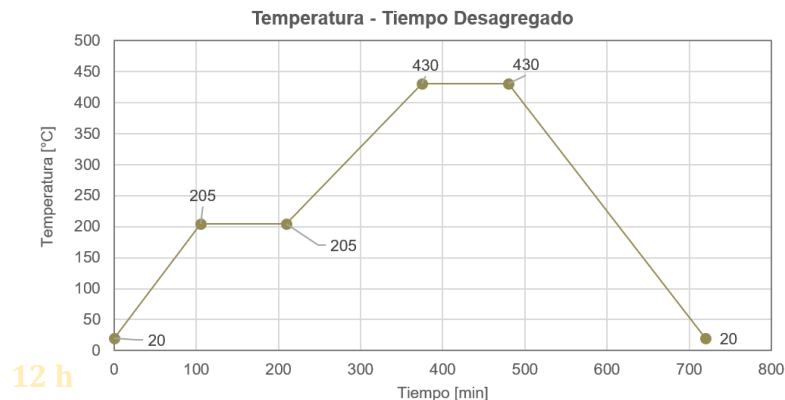
Ciclos Térmicos — Programas

Atmósfera Normal



4. METODOLOGÍA

Atmósfera de Vacío



Parámetros de Impresión Base

Parámetro	Ultrafuse 316L	Virtual Foundry
Boquilla recomendada	0,4 mm	0,6 mm
Altura de capa	0,2 mm	0,1 mm
Ancho de extrusión	0,3 mm	0,6 mm
T° extrusor izquierdo	240 °C	235°C
Interfaz de cama	Balsa	Fijador
Ángulo de relleno	45°	90°
Velocidad de impresión	30 mm/s	50 mm/s
Patrón de relleno	Líneas	Rectilíneo
Densidad de relleno	100 %	100%

Calidad superficial y facilidad de desprendimiento de balsa

Combinación Óptima de Parámetros de Impresión

Prismas cuadrangulares
10 x 10 x 3 mm

Malo

Ancho de extrusión 0,1–0,2 mm

Grandes vacíos, capas de difícil definición, apariencia muy irregular

Bueno

Ancho de extrusión 0,3–0,4 mm

Buenos acabados superficiales, capas bien definidas, mínimos espacios

Regular

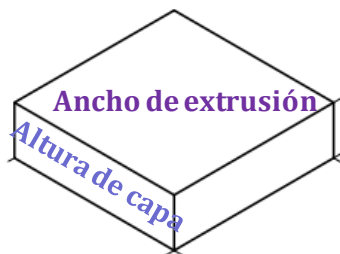
Altura de capa 0,1 mm

Mayor definición de capas pero más lenta sin implicar mejor calidad

Aceptable

Altura de capa 0,3–0,4 mm

Impresión más rápida con calidad similar a capas finas



Hallazgos en Calidad de Balsa

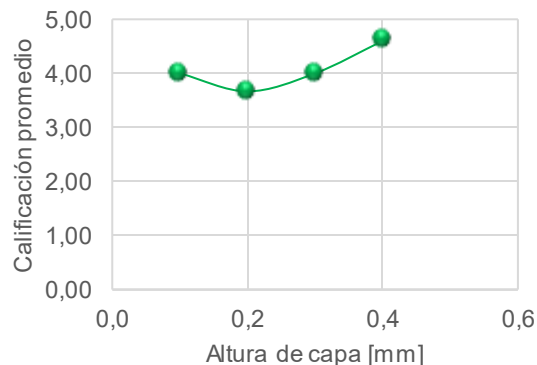
La balsa fina permite mejor
➤ desprendimiento que la balsa estándar.

Boquilla recomendada de 0,4 mm
➤ para Ultrafuse y 0,6 mm para Virtual Foundry.

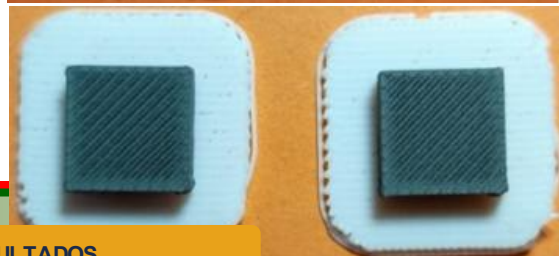
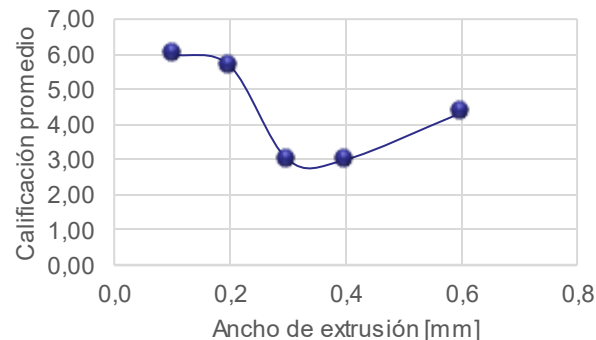
El uso de boquillas más grandes
➤ genera impresiones con muchos desperfectos.

Calidad superficial y facilidad de desprendimiento de balsa

Altura de Capa



Ancho de extrusión

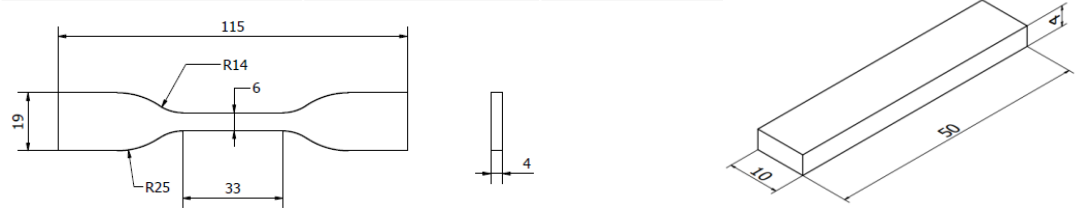
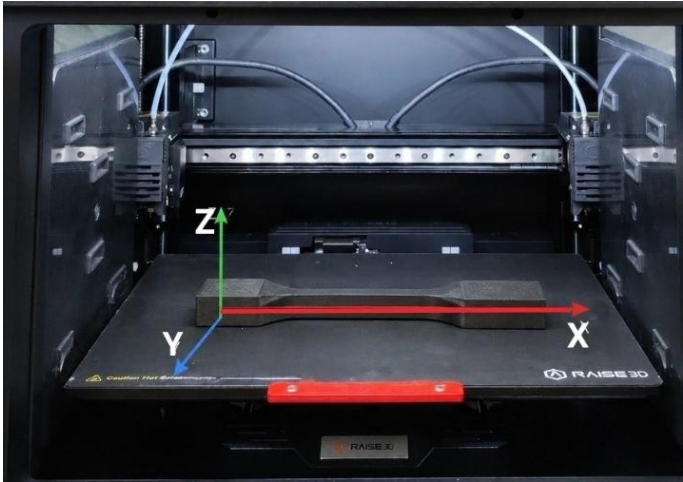


Designación	Altura de capa [mm]	Ancho de extrusión [mm]
P1	0,1	0,2
P2	0,1	0,4
P3	0,1	0,6
P5	0,3	0,3
P7	0,2	0,3
P9	0,2	0,4
P11	0,4	0,4
P14	0,3	0,6
P15	0,4	0,6

Caracterización Dimensional — Piezas Sinterizadas

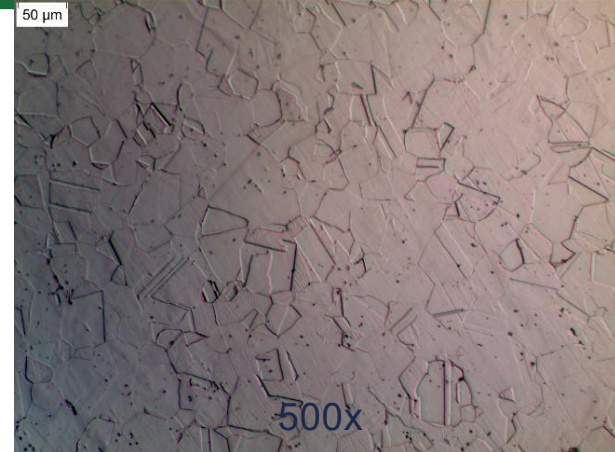
Variación dimensional (%) medidas de piezas sinterizadas respecto al diseño CAD (contracciones)

Grupo	ΔX (%)	ΔY (%)	ΔZ (%)
USFQ (UF)	12,52	6,30	6,30
P2U (UF)	11,90	8,54	9,33
P18U (UF)	13,15	13,15	6
Prismas rectangulares (VF)	10	7,62	-
Hueso húmero (VF)	11,74	13,33	-

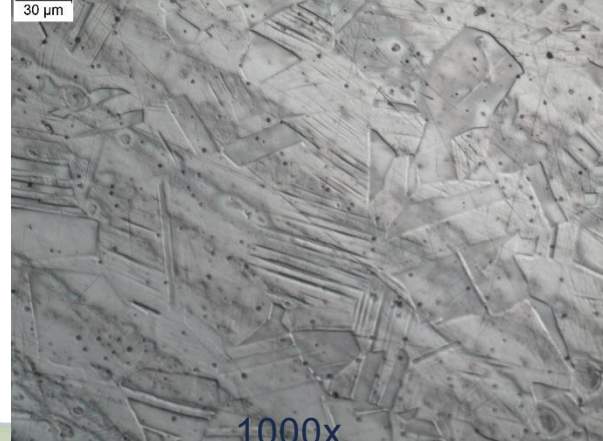
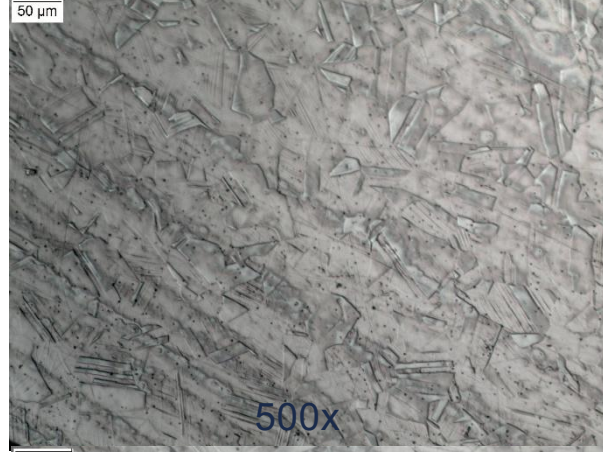


Caracterización Microestructural

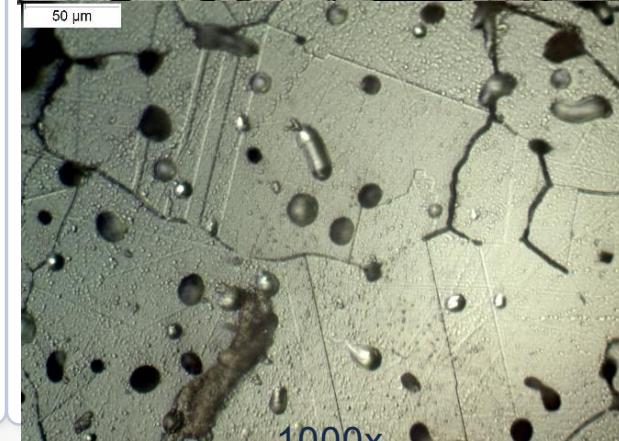
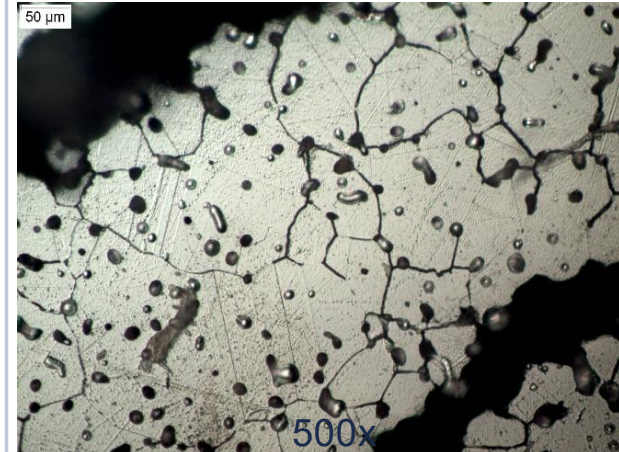
**Plancha Acero 316L
(Material Base)**



**Varilla ER316L
(Soldadura)**



**Probeta USFQ-1
(FDM Sinterizada)**



Porosidad de Piezas Sinterizadas

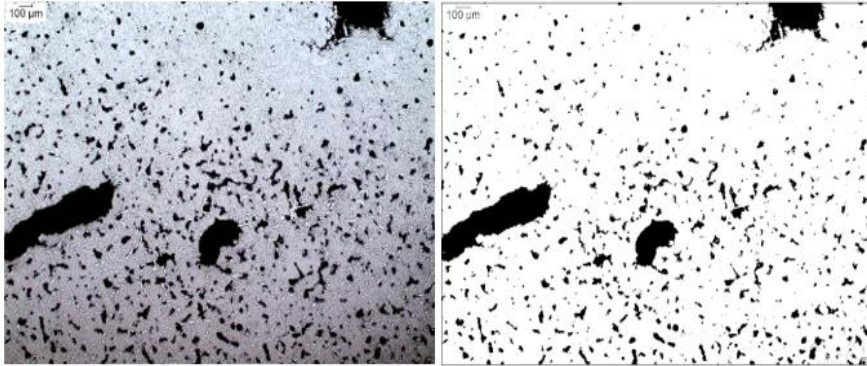
E4.4 — Filamento Virtual Foundry

9,4%

POROSIDAD

90,5%

DENSIDAD



Alta densificación. Ciclos térmicos efectivos. Mejor resultados.

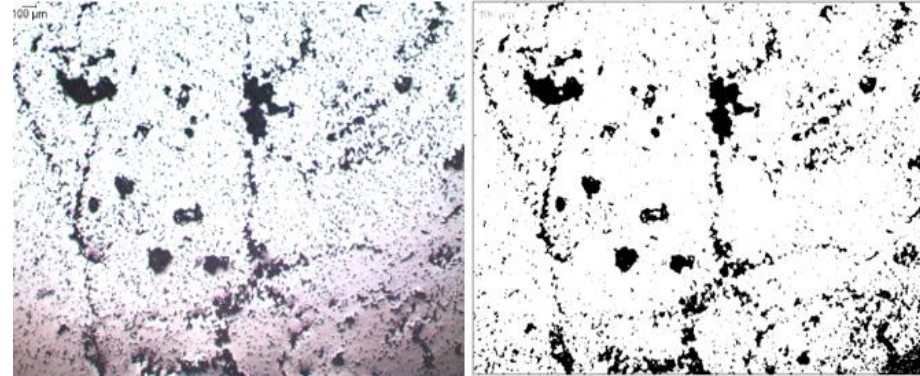
E5.5 — Filamento Ultrafuse

24,3%

POROSIDAD

75,7%

DENSIDAD



Densidad relativamente baja. Sinterización incompleta. Partículas metálicas unidas solo superficialmente.

Ensayo de Tracción — Probetas en Verde

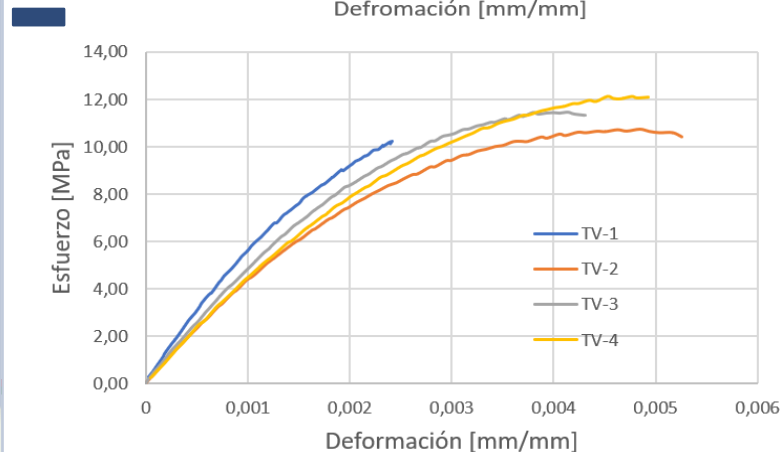
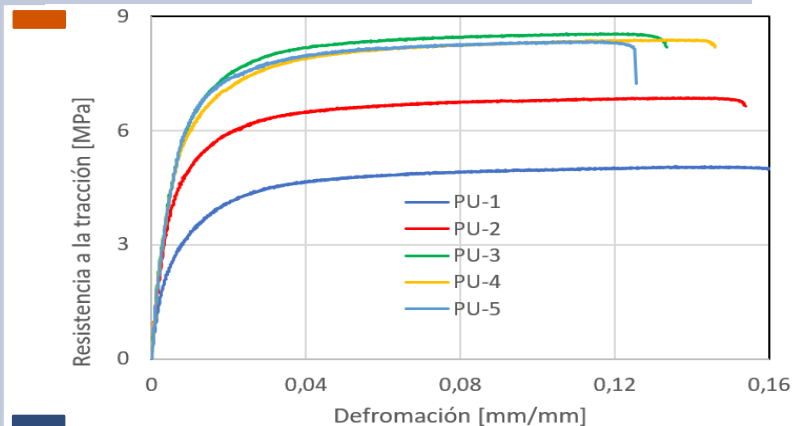
Resumen de Resultados

■ Ultrafuse (PU): Fractura frágil.

■ Virtual Foundry (TV): Fractura frágil similar.

Probeta	σ (MPa)	Deformación mm/mm
PU-1	σ mín 5,1	0,20
PU-3	σ máx 8,6	0,1
TV-1	σ mín 10,25	0,0024
TV-4	σ máx 12,14	0,0050

Curvas Esfuerzo-Deformación (Verde)



Ensayo de Tracción — Piezas Sinterizadas vs Material Base

142,77 MPa

USFQ (Ultrafuse)
Parámetros base
**Mejor grupo
sinterizado**

79,03 MPa

P2U (Ultrafuse)
AC 0,1 / AE 0,4
2° mejor grupo

47,84 MPa

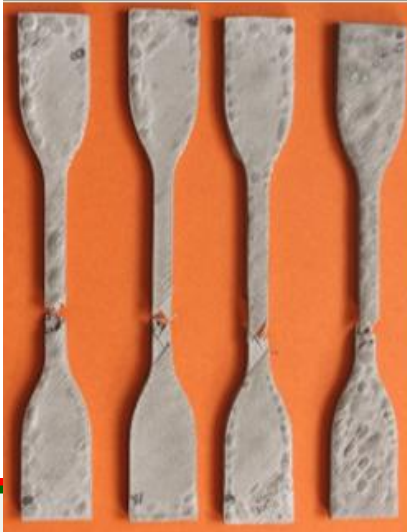
P17U (Ultrafuse)
AC 0,3 / AE 0,2

28,21 MPa

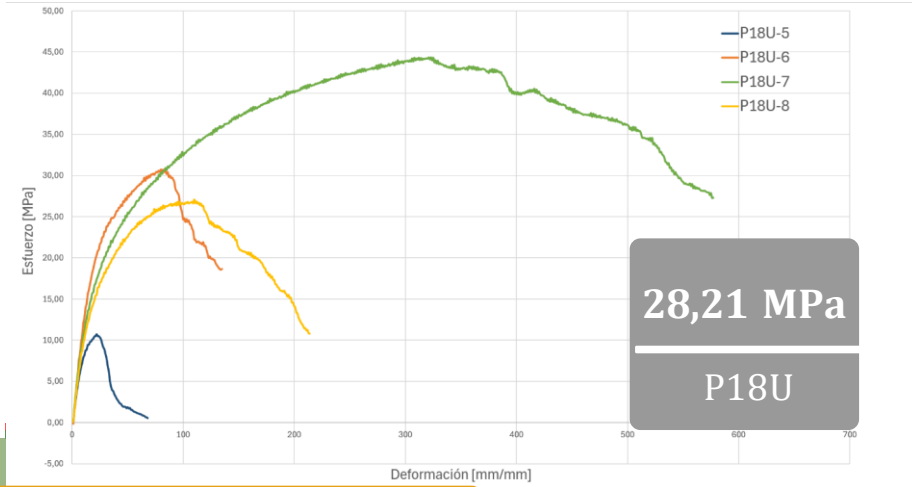
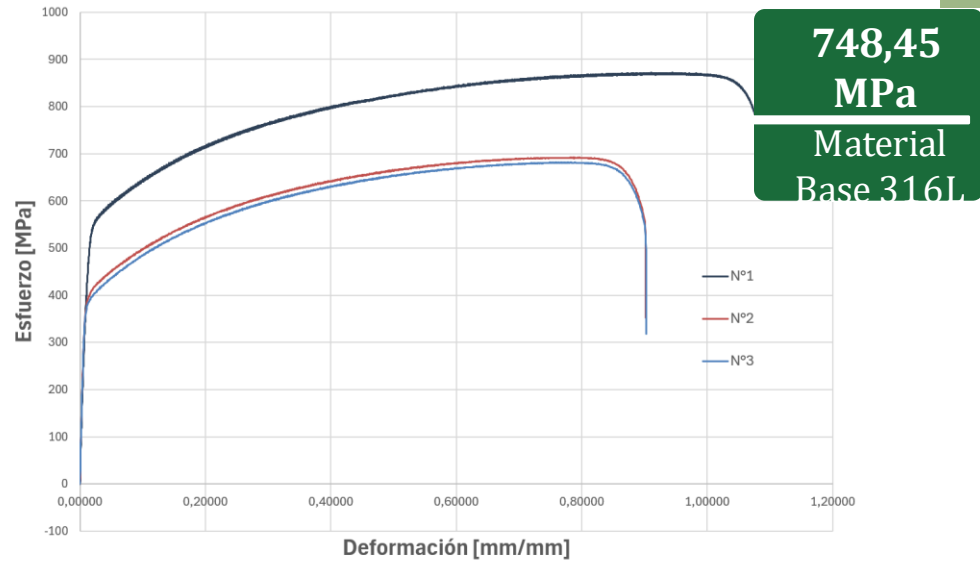
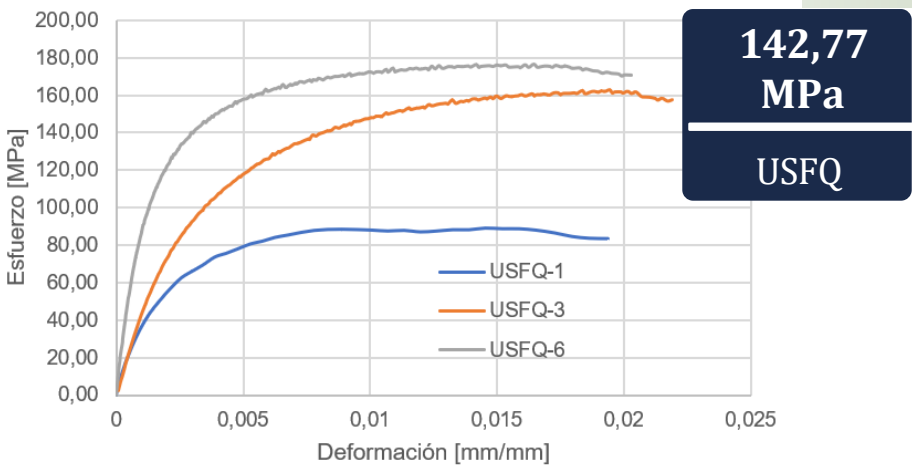
P18U (Ultrafuse)
AC 0,3 / AE 0,4

748,45 MPa

Material Base 316L
ASTM E8



Ensayo de Tracción — Piezas Sinterizadas vs Material Base



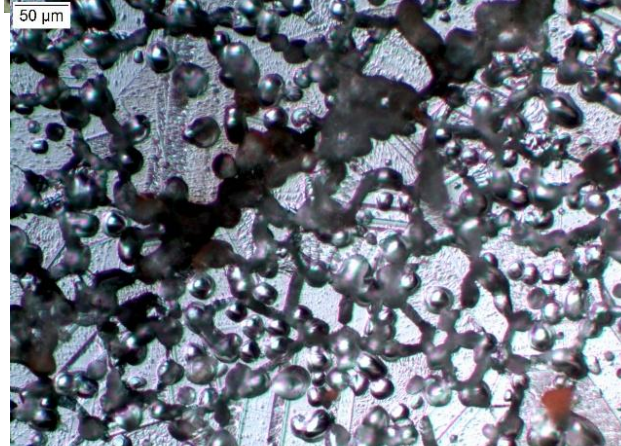
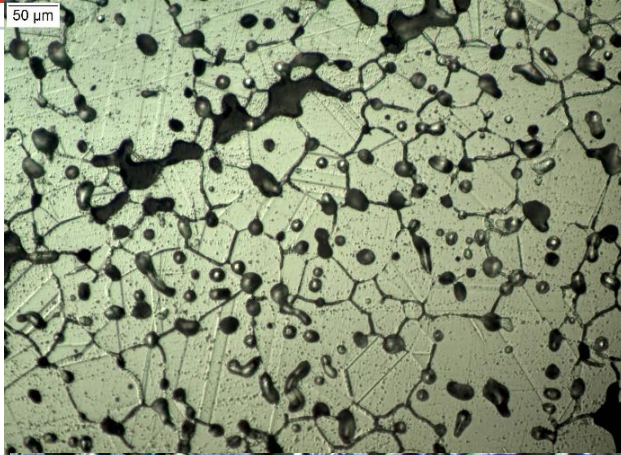
Probeta	σ (MPa) Mín - Máx	Deformación mm/mm Mín - Máx
USFQ	88,94 - 176,33	0,0611 - 0,0615
P18U	10,73 - 44,32	0,0007 - 0,0669
Base 316L	681,49 - 871,64	0,9024 - 1,0872

Ensayo de Dureza — Micro y Macro dureza

Probeta	HV (Micro)	HR (Macro)	Escala	Interpretación
Muestra 1 USFQ-1 (UF)	139,0	75,7	B	Material suave, sinterización correcta
Muestra 2 USFQ-1 (UF)	135,9	73,6	B	Distribución uniforme
P2U-1 (UF)	90,4	50,6	B	Baja dureza, pobre sinterización
P18U-2 (UF)	201,9	92,3	B	Mejor resultado UF, densificación aceptable
E4.3 (VF)	346,0	35,5	C	Alta dureza, buena densificación
E4.4 (VF)	417,2	42,7	C	Mejor resultado general, alta densidad

Caracterización Corrosiva — ASTM A262 Práctica A

Piezas Sinterizadas (USFQ-1) -> SOSPECHOSA



500x

Zanjas

Material Base Acero 316L -> ACEPTADA



Escalonada

Conclusiones Principales

01

Respecto al ensayo de tracción, la combinación de parámetros puede influir en las propiedades mecánicas y, por otra parte, debido a que el metal sinterizado alcanzó una resistencia de 142 MPa según el fabricante puede alcanzar una resistencia de aproximadamente de 500 MPa, y el metal base hasta 871 MPa, que el sinterizado logrado no es satisfactorio.

02

Las probetas de Virtual Foundry obtuvieron los valores más altos de durezas 417 HV y 42 HRC, similares a los del material base, lo que indica buena densificación durante la etapa del sinterizado, superando a las probetas fabricadas con Ultrafuse con 201,9 HV y 92,3 HRB.

03 Microestructuralmente, el material base en placa y las varillas de soldadura ER316L, en comparación con las probetas sinterizadas, poseen similar estructura pero con gran cantidad de poros. Esto puede deberse al efecto de los ciclos térmicos que no lograron una consolidación óptima y principalmente en el desagregado el escape de gases del polímero.

04 La cuantificación de la porosidad reveló que la pieza de Virtual Foundry presentó alta densidad de 7 g/cm³, mientras que el sinterizado del Ultrafuse reveló un valor de 6 g/cm³, en contraste con el material base que posee 8 g/cm³. Los ciclos térmicos aplicados al Virtual Foundry fueron los más efectivos para eliminar la matriz polimérica y consolidar la pieza de acero inoxidable. Se puede establecer que la densidad es un indicador de calidad relevante y puede influir en el comportamiento mecánico de las piezas.

05

Para las piezas impresas con el filamento Ultrafuse, el parámetro más influyente en el acabado superficial de las piezas resultó el ancho de extrusión, es así que anchos de 0,3 mm y 0,4 mm daban los mejores acabados. Entre las distintas combinaciones, la mejor fue altura de capa 0,2 mm y ancho de extrusión 0,4 mm.

06

En cuanto al cambio dimensional, las piezas sinterizadas con el filamento de Ultrafuse, experimentaron reducciones casi uniformes, obteniendo un promedio global del 13%, menor al recomendado por el fabricante de 20%. Mientras tanto las piezas sinterizadas con el filamento Virtual Foundry evidenciaron reducciones próximas al 10%, afirmando el dato del fabricante.

07

En la parte corrosiva, las probetas sinterizadas bordes de grano en forma de zangas negras y profundas, distinto al metal laminado. Esto mostraría una mayor susceptibilidad de las piezas sinterizadas al ataque corrosivo. Posiblemente debido al enfriamiento lento de los ciclos térmicos aplicados.

08

A pesar de que el filamento Virtual Foundry logró buenas características de dureza y compactación, es de difícil impresión 3D y difícil de replicar las condiciones de sinterizado. Por otro lado, el filamento Ultrafuse ofrece mejores características para la impresión 3D y para reproducibilidad de las condiciones de sinterizado requiriendo mayor investigación para obtener propiedades mecánicas y de acabado superficial.

Recomendaciones y Líneas Futuras



Optimizar el Desagregado

Ajustar ciclos para lograr un escape más controlado de los gases poliméricos, reduciendo la formación de ampollas e hinchazones.



Ensayar Combinación P9

Adoptar la combinación P9 con la mejor calidad superficial y despegue fácil de la balsa, aplicar el aumento dimensional de 13% y proceder con las pruebas de desagregado y sinterizado al vacío.



Piezas de Mayor Escala sin Carcasa

Complementar el estudio con piezas grandes sin carcasa en combinación de otros parámetros para mejorar el escape de gases y experimentar en geometrías médicas complejas.



Proyección Médica

Desarrollar estudios de biocompatibilidad de las piezas sinterizadas y evaluar su potencial como implantes médicos de bajo costo.

¡Gracias!

Caracterización mecánica, microestructural, y corrosiva de piezas y probetas desagregadas y sinterizadas a base de filamentos poliméricos con alta carga metálica de acero 316L
