



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

Balladares Mena, Natalia Isabella

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniería Mecánica

Ing. Riofrío Villena, Patricio Gustavo, PhD.

30 de julio de 2026



Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | ESPE-ECU

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR Balladares_Natalia

ID : bcd6ad439be5c5d6f0749a1833cb2dcbdddead2f



3%

Textos sospechosos

Nombre del fichero : TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR -
Balladares_Natalia.txt
Tamaño del archivo original : 8,09 MB
Número de palabras : 26.811

Depositante : PATRICIO GUSTAVO RIOFRIO VILLENA
Fecha de depósito : 29 de julio de 2026
Tipo de carga : interface
Fecha de fin de análisis : 29 de julio de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes <1%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA <1%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.

Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



Idiomas no reconocidos 3%

Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.
Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.



No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas <1%

Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.



Verificado digitalmente en ESPE+
Firmado digitalmente por:
PATRICIO GUSTAVO
RIOFRIO VILLENA

Ing. Riofrío Villena, Patricio Gustavo PhD.

Director



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **"Caracterización mecánica, microestructural, y corrosiva de piezas y probetas desagregadas y sinterizadas a base de filamentos poliméricos con alta carga metálica de acero 316L"** fue realizado por la señorita **Balladares Mena, Natalia Isabella**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; habiéndose efectuado una revisión integral de forma y de fondo conforme a los lineamientos y formatos institucionales vigentes. Además, fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 30 de julio de 2026



Ing. Riofrío Villena, Patricio Gustavo PhD.

Director

C.C.: 1707512545



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Balladares Mena, Natalia Isabella**, con cédula de ciudadanía n° 1724427222, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Caracterización mecánica, microestructural, y corrosiva de piezas y probetas desagregadas y sinterizadas a base de filamentos poliméricos con alta carga metálica de acero 316L** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 30 de julio de 2026

Balladares Mena, Natalia Isabella

C.C.: 1724427222



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Autorización de Publicación

Yo **Balladares Mena, Natalia Isabella**, con cédula de ciudadanía n° 1724427222, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Caracterización mecánica, microestructural, y corrosiva de piezas y probetas desagregadas y sinterizadas a base de filamentos poliméricos con alta carga metálica de acero 316L** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 30 de julio de 2026

Balladares Mena, Natalia Isabella

C.C.: 1724427222

Dedicatoria

Para mi mami Sonia por acompañarme en cada etapa, creer en mi capacidad, dame las fuerzas suficientes para afrontar y superar con éxito cada dificultad que se ha atravesado y por su lucha constante para impulsarme, todo este trabajo y sus retribuciones le pertenecen enteramente.

Para mi papi Edison por creer en mi desde el primer día y encaminarme desde una corta edad hasta el día de hoy, orientándome siempre hacia para mi mejor desarrollo personal. Su dedicación, fortaleza y sabiduría han sido y siempre serán mi mayor inspiración.

Para mis hermanitos Mateo y Kathy por siempre permanecer a mi lado, ser mi ejemplo a seguir, apoyarme con todo su amor y darme las fuerzas necesarias para alcanzar este sueño.

Para mis abuelitos Ricardo y María Isabel, y a mi tía Angélica quienes con su sabios consejos y ejemplo de vida me enseñaron el inmenso valor de la perseverancia y el trabajo duro, estoy eternamente gracias por su acogida.

Para mis abuelitos Pedro y Beatriz, por siempre darme su mano y acompañarme en los momentos más difíciles.

Agradecimiento

Mi más profundo agradecimiento a mi familia por su respaldo inquebrantable, su confianza me impulsó a culminar mis estudios y llegar de la mejor manera hasta esta meta.

A los amigos que me dejó la universidad, Mateo, Johan, Santiago y David, por su invaluable asistencia académica y momentos de felicidad que guardaré siempre en mi corazón, que la vida los mantenga siempre en mi camino y podamos compartir más experiencias.

A mi mejor amiga de toda la vida, Samy, a quien admiro por todos sus logros y constante lucha. Agradezco todas tus palabras de apoyo e interés en el progreso de cada etapa, gracias por todas tus recomendaciones y todo tu amor que me hecho sentir siempre acompañada y comprendida.

Finalmente a mi pequeñita y compañera gatuna, Campanita, por ser mi compañía incondicional en las largas madrugadas de estudio, gracias por ser mi respiro y enseñarme el significado del amor en la forma más pura.

Índice de contenidos

Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Resumen	19
Abstract	20
CAPÍTULO I	21
Aspectos generales	21
Introducción.....	21
Planteamiento del problema	23
Justificación e importancia.....	24
<i>Justificación</i>	24
<i>Importancia</i>	25
Objetivos	25
<i>Objetivo general</i>	25
<i>Objetivos específicos</i>	25
Alcance	26
CAPÍTULO II	27
Estado del Arte	27
Impresión, Desagregado y Sinterizado con filamentos metálicos de acero inoxidable 316L.	30
<i>Impresión</i>	30
<i>Desagregado</i>	32
<i>Sinterizado</i>	34

Aplicaciones de la manufactura en el campo médico y antecedentes del uso del acero inoxidable 316L.....	36
Caracterización de piezas y probetas desagregadas y sinterizadas obtenidas a través de impresión 3D-FDM con filamentos metálicos de acero inoxidable 316L:.....	37
Caracterización dimensional	37
Caracterización microestructural	41
Caracterización de porosidad.....	42
Caracterización mecánica.	43
<i>Ensayo de tensión</i>	43
<i>Ensayo de dureza</i>	44
Caracterización corrosiva.	45
CAPÍTULO III	47
Materiales y Equipos	47
Filamentos metálicos de acero inoxidable 316L.	47
Impresora 3D-FDM.	49
Horno para desagregado y sinterizado	51
Equipos para caracterizar las probetas y piezas desagregadas y sinterizadas: máquina de ensayos universal, durómetros, microscopio óptico, instrumentos de metrología, equipo para ensayos de corrosión.....	52
CAPÍTULO IV	64
Métodos y Procedimientos	64
Impresión, Desagregado y Sinterizado de piezas y probetas postprocesadas obtenidas a través de impresión 3D-FDM con filamentos de alta carga metálica de acero inoxidable 316L.	64
<i>Impresión 3D con filamentos de alta carga metálica</i>	64
Caracterización Mecánica	82
Caracterización Microscópica.....	87

	10
<i>Medición de porosidad</i>	89
Caracterización Dimensional	89
Caracterización Corrosiva	90
CAPÍTULO V	93
Resultados y Análisis.....	93
Cambio dimensional de piezas y probetas impresas en 3D	93
<i>Piezas impresas con el filamento Ultrafuse</i>	93
<i>Piezas impresas con el filamento Virtual Foundry</i>	122
Microestructura de las piezas sinterizadas	132
Porosidad de las piezas sinterizadas	137
Propiedades mecánicas del ensayo de tensión.....	138
<i>Ultrafuse en verde</i>	138
<i>Ultrafuse sinterizada</i>	140
<i>Virtual Foundry en verde</i>	144
<i>Material base acero inoxidable 136L</i>	145
Tipo de falla en el ensayo de tensión.....	146
Resultados de los ensayos de dureza	148
<i>Microdureza</i>	148
<i>Macro dureza</i>	150
Resultado de las pruebas de corrosión.....	151
CAPÍTULO VI.....	155
Conclusiones y Recomendaciones	155
Caracterización Mecánica	155
<i>Tensión</i>	155
<i>Dureza</i>	155
<i>Microestructura</i>	156

<i>Porosidad</i>	156
Caracterización Dimensional y de calidad	156
Caracterización Corrosiva	157
Conclusiones generales	157
Recomendaciones	158
Referencias	159
Anexos	166
Anexo 1: Insumos para el encapsulado de muestras	166
Anexo 2: Aparato e insumos para soldadura de muestras de acero inoxidable 316L	166
Anexo 3: Parámetros de impresión para filamento Ultrafuse	167
Anexo 4: Parámetros de impresión para filamento Virtual Foundry	173
Anexo 5: Parámetros de corte láser	178
Anexo 6: Piezas y probetas utilizadas para el ensayo de dureza	179

Índice de tablas

Tabla 1	Composición química del polvo metálico contenido en el filamento Ultrafuse 316L	48
Tabla 2	Composición química del filamento de acero inoxidable 316L	48
Tabla 3	Especificaciones técnicas impresora RAISE3D E2.....	49
Tabla 4	Especificaciones técnicas del horno tubular BR - 16MT- 60/300	52
Tabla 5	Especificaciones técnicas del equipo de ensayo a tensión INSTRON 8801	53
Tabla 6	Especificaciones técnicas del extensómetro INSTRON 2620 – 600	54
Tabla 7	Especificaciones técnicas del estereomicroscopio ZEISS Stemi 305	58
Tabla 8	Especificaciones técnicas del medidor de micro dureza DUROLINE – M	59
Tabla 9	Especificaciones técnicas del Service Diamond Hardness Tester por Louis Small 8 BLP.....	60
Tabla 10	Especificaciones técnicas de la fuente de alimentación GW Instek modelo GPC- 3030D.....	61
Tabla 11	Especificaciones técnicas de la Cortadora láser Cortadora láser	63
Tabla 12	Parámetros base de impresión para el filamento de Ultrafuse	64
Tabla 13	Piezas impresas con parámetros base para el filamento de Ultrafuse.....	65
Tabla 14	Combinaciones de parámetros para prismas cuadrangulares 10 x 10 x 3 mm	68
Tabla 15	Probetas de filamento Ultrafuse y sus parámetros de impresión modificados	69
Tabla 16	Parámetros base de impresión para el filamento de The Virtual Foundry.	71
Tabla 17	Piezas impresas con parámetros base para el filamento de Virtual Foundry	72
Tabla 18	Probetas impresas con filamento de Virtual Foundry y sus parámetros de impresión	74
Tabla 19	Programación para desagregado en atmósfera estándar	75
Tabla 20	Programación para sinterizado en atmósfera estándar	76
Tabla 21	Programación para desagregado en vacío	77
Tabla 22	Programación para sinterizado en vacío	79

Tabla 23	Ciclos de desagregado y sinterizado para las piezas impresas mediante FFF.	80
Tabla 24	Probetas sometidas al ensayo de tensión.....	84
Tabla 25	Probetas sometidas al ensayo de dureza enfoques micro y macro	86
Tabla 26	Muestras analizadas microestructuralmente	87
Tabla 27	Medidas de prismas cuadrangulares 32 x 30 x 8 mm en verde (PRCU).....	94
Tabla 28	Medidas de discos $\varnothing$ 25 x 4 mm en verde designados como “DU”	95
Tabla 29	Medidas de probetas en verde de tensión P1U	97
Tabla 30	Medidas de probetas en verde de tensión P3U	98
Tabla 31	Medidas de cubos 10 x 10 x 10 mm (E5)	100
Tabla 32	Medidas de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm (PRU)	102
Tabla 33	Medidas probetas para ensayo de tensión sobredimensionadas al 20% (USFQ)...	104
Tabla 34	Medidas de probetas de tensión P2U	106
Tabla 35	Medidas probetas de tensión P17U.....	108
Tabla 36	Medidas probetas de tensión P18U.....	110
Tabla 37	Medidas probetas de tensión P18U sin carcaza	112
Tabla 38	Medidas de cubos 10 x 10 x 10 mm con boquilla 0,4 mm (E4)	113
Tabla 39	Calificaciones de combinaciones de los prismas rectangulares 10 x 10 x 3 mm.....	114
Tabla 40	Fotografías y observaciones de combinaciones de los prismas cuadrangulares 10 x 10 x 3 mm	115
Tabla 41	Medidas de discos $\varnothing$ 25 x 4 mm (DV).....	122
Tabla 42	Medidas de cubos 10 x 10 x 10 mm (E4)	123
Tabla 43	Medidas de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm (PRV).....	125
Tabla 44	Medidas de probetas para ensayo de tracción sobredimensionadas al 10% (TV) ..	127
Tabla 45	Medidas de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm a 45° (PRV).....	129
Tabla 46	Medidas para hueso húmero derecho (HUV).....	131
Tabla 47	Datos de ensayo a tensión de probetas PU (AC 0,2 AE 0,3)	139

Tabla 48	Datos de ensayo a tensión de probetas USFQ (AC 0,2 AE 0,3)	140
Tabla 49	Datos de ensayo a tensión de probetas P2U (AC 0,1 ; AE 0,4)	141
Tabla 50	Datos de ensayo a tensión de probetas P17U (AC 0,3 ; AE 0,2)	142
Tabla 51	Datos de ensayo a tensión de probetas P18U (AC 0,3 ;AE 0,4)	143
Tabla 52	Datos del ensayo de tensión para las probetas en verde de Virtual Foundry	144
Tabla 53	Datos para las probetas de ensayo de tensión del material base 316L.	145
Tabla 54	Fallas en probetas sinterizadas	147
Tabla 55	Fallas en probetas en verde y material base	148
Tabla 56	Datos de microdureza de las muestras	149
Tabla 57	Datos de macrodureza de las muestras	150
Tabla 58	Medidas de probetas para ensayo de corrosión	151

Índice de figuras

Figura 1	Micrograffías de piezas fabricadas con FDM vs fabricada con SLM	29
Figura 2	Partes comunes de las impresoras 3D	31
Figura 3	Esquema de fabricación de piezas metálicas por tecnología metalmecánica.....	35
Figura 4	Valores para el sobredimensionamiento de las piezas.	39
Figura 5	Parámetros de impresión recomendados	39
Figura 6	Filamento Ultrafuse 316L	47
Figura 7	Filamento de acero inoxidable 316L Virtual Foundry	48
Figura 8	Impresora RAISE3D E2 con estructura	49
Figura 9	Calentador de filamento metálico.....	50
Figura 10	Cama de acero flexible y cama metálica gris con lámina de PEI	51
Figura 11	Horno tubular al vacío	51
Figura 12	Máquina de ensayos universal INSTRON 8801	53
Figura 13	Extensómetro INSTRON 2620 – 600.....	54
Figura 14	Calibrador Vernier	54
Figura 15	Buehler Handimetl strip grinder 39-1471	55
Figura 16	Pulidora BUEHLER ECOMET I.....	56
Figura 17	Agua regia	56
Figura 18	Microscopio óptico Meiji Techno IM7 200.....	57
Figura 19	ZEISS Stemi 305	57
Figura 20	Medidor de micro dureza DUROLINE – M.....	58
Figura 21	Service Diamond Hardness Tester by Louis Small 8 BLP	59
Figura 22	Insumos principales para el ensayo de corrosión.....	61
Figura 23	Insumos adicionales	62
Figura 24	Cortadora láser de metales HONGNIU HN-1313.....	62
Figura 25	Esquema de prisma cuadrangular 10 x 10 x 3 mm	67

Figura 26 Esquema de cubos de 10 x 10 x 10 mm.....	69
Figura 27 Gráfica Temperatura – Tiempo del programa de desagregado al ambiente	75
Figura 28 Gráfica comparativa de Temperatura – Tiempo de los programas de sinterizado al ambiente	77
Figura 29 Gráfica comparativa de Temperatura – Tiempo de los programas de desagregado en vacío.....	78
Figura 30 Gráfica comparativa de Temperatura – Tiempo de los programas de sinterizado en vacío.....	80
Figura 31 Probeta para ensayo de tensión según normativa ASTM D 638 – 03, tipo IV	83
Figura 32 Probeta para ensayo de tensión según normativa ASTM D 638 – 03, tipo IV, sobredimensionadas al 20%	83
Figura 33 Probetas para ensayo de tensión según normativa ASTM D 638 – 03, tipo IV, sobredimensionadas al 10%	83
Figura 34 Probeta para ensayo de tensión según normativa ASTM E8, espécimen de tamaño inferior	84
Figura 35 Probetas destinadas al ensayo de corrosión.....	91
Figura 36 Esquema del circuito basado en los lineamientos de la práctica A de la normativa ASTM A262.....	92
Figura 37 Orientación espacial y sistema de coordenadas de las probetas	93
Figura 38 Esquema de medidas de prisma rectangular volumétrico de 32 x 30 x 8 mm (PRCU)	94
Figura 39 Fotografías de prismas cuadrangulares volumétricos 32 x 30 x 8 mm en verde (PRCU).....	94
Figura 40 Esquema de medidas de discos $\varnothing$ 25 x 4 mm designados como “DU”	95
Figura 41 Fotografías de discos $\varnothing$ 25 x 4 mm en verde designados como “DU”	96
Figura 42 Esquema de medidas de probetas para ensayo de tensión	97

Figura 43	Fotografías de probetas en verde de tensión designadas como “P1U”	97
Figura 44	Fotografías de probetas en verde de tensión P3U	99
Figura 45	Esquema de medidas de cubos 10 x 10 x 10 mm (E5)	100
Figura 46	Fotografías de cubos 10 x 10 x 10 mm (E5)	101
Figura 47	Esquema de medidas de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm (PRU)	102
Figura 48	Fotografías de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm en verde y sinterizadas (PRU)	103
Figura 49	Fotografías de probetas para ensayo de tensión sobredimensionadas al 20% verde y sinterizadas (USFQ)	105
Figura 50	Fotografía de probetas de tensión designadas como P2U verde y sinterizadas....	107
Figura 51	Fotografía probetas de tensión P17U en verde y sinterizadas	109
Figura 52	Fotografías probetas de tensión designadas como “P18U”	111
Figura 53	Fotografías de cubos 10 x 10 x 10 mm con boquilla 0,4 mm (E4)	113
Figura 54	Gráficas de calificación promedio vs altura de capa y ancho de extrusión	120
Figura 55	Desprendimiento de la balsa para las diferentes combinaciones de los prismas cuadrangulares 10 x 10 x 3 mm	120
Figura 56	Fotografías de discos $\varnothing$ 25 x 4 mm (DV)	122
Figura 57	Fotografías de cubos 10 x 10 x 10 mm (E4)	124
Figura 58	Fotografías de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm (PRV)	127
Figura 59	Fotografías de probeta para ensayo de tracción sobredimensionadas al 10% (TV)	128
Figura 60	Fotografías de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm a 45° (PRV)	130
Figura 61	Esquema de medidas de hueso húmero derecho (HUV)	131
Figura 62	Fotografías de hueso húmero derecho (HUV)	132
Figura 63	Micrografía de plancha de acero inoxidable 316L	133
Figura 64	Micrografía de varilla de soldadura ER316L	134

Figura 65 Micrografía de Muestra 3 de probeta USFQ-1	135
Figura 66 Muestra 4 de probeta USFQ-1	136
Figura 67 Micrografía procesada en ImageJ de E4.4	137
Figura 68 Micrografía procesada en ImageJ de E5.5	138
Figura 69 Gráfico esfuerzo- deformación para las probetas de tensión PU (AC 0,2 ; AE 0,3).....	139
Figura 70 Gráfico esfuerzo - deformación para las probetas de tensión USFQ (AC 0,2 ; AE 0,3)	140
Figura 71 Gráfico esfuerzo - deformación para las probetas con P2U (AC 0,1 ; AE 0,4).....	141
Figura 72 Gráfico esfuerzo- deformación para las probetas con P17U (AC 0,3 ; AE 0,2).....	142
Figura 73 Gráfico esfuerzo - deformación para las probetas con P18U (AC 0,3 ; AE 0,4).....	143
Figura 74 Gráfico esfuerzo- deformación para las probetas en verde de Virtual Foundry	144
Figura 75 Gráfico esfuerzo- deformación para las probetas fabricadas con el material base 316L	146
Figura 76 Microestructura de la Muestra 3	152
Figura 77 Microestructura de la Muestra 4	152
Figura 78 Microestructura de la Probeta 1 – 316L	153
Figura 79 Microestructura de la Probeta 2 – 316L	154

Resumen

El presente trabajo se enfocó en la caracterización dimensional, mecánica, microestructural y corrosiva de piezas y probetas desagregadas y sinterizadas a base de filamentos poliméricos con alta carga metálica de acero 316L Ultrafuse y Virtual Foundry. Previamente se determinó cualitativamente la calidad superficial y facilidad de desprendimiento de balsa en función de los parámetros de altura de capa y ancho de extrusión, donde la mejor fue la combinación 0,2 mm altura de capa y 0,4 mm ancho de extrusión que además presentó facilidad de desprendimiento de balsa. Como parte de la caracterización dimensional se estudió probetas en verde y sinterizadas, las probetas para el filamento Ultrafuse presentaron cambios dimensionales diferentes a los que indica el fabricante habiéndose encontrado un promedio global de 13% y para el filamento Virtual Foundry el valor coincide con el 10% establecido por el fabricante. La caracterización mecánica se ejecutó mediante el ensayo de tracción de la norma ASTM D638, de piezas en verde y sinterizadas, donde las probetas sinterizadas muestran valores muy bajas en relación a las indicadas por el fabricante y a las del material laminado 316L, obteniendo una resistencia en el rango de 28,21 MPa a 142,77 MPa, con fractura frágil. Para la resistencia se midió la macrodureza y microdureza de las piezas sinterizadas, los resultados indican que esta crece con el grado de compactación y densidad de las muestras. Las zanjas y bordes oscuros que rodean a los granos de las muestras sinterizadas de acero inoxidable, aparecieron una vez que se aplicó la prueba corrosiva según el estándar ASTM A262 que revela cierta susceptibilidad, diferente a la presentación de lámina. Adicionalmente las ampollas encontradas en las piezas sinterizadas indican que se debe mejorar los ciclos de temperatura. En suma, existe dificultad para obtener piezas sinterizadas totalmente satisfactorias por varios factores que intervienen de la impresión 3D, desagregado y sinterizado, y sienta las bases para futuros estudios de sinterizado de piezas médicas por impresión 3D con filamentos de alta carga metálica de acero inoxidable 316L.

Palabras clave: Dimensional, microestructural, mecánica, corrosiva, impresión 3D

Abstract

This study focused on the dimensional, mechanical, microstructural, and corrosion characterization of disaggregated and sintered parts and test specimens made from polymer filaments with a high metal content of 316L steel using Ultrafuse and Virtual Foundry. Surface quality and ease of build-up removal were previously determined qualitatively based on layer height and extrusion width parameters, with the best results obtained from the combination of a 0.2 layer height and a 0.4 extrusion width, which also exhibited ease of build-up removal. As part of the dimensional characterization, green and sintered specimens were studied; the specimens for the Ultrafuse filament exhibited dimensional changes different from those indicated by the manufacturer, with an overall average of 13%, while for the Virtual Foundry filament, the value matched the 10% established by the manufacturer. Mechanical characterization was performed using the tensile test specified in ASTM D638 on green and sintered specimens. The sintered specimens exhibited very low values compared to those indicated by the manufacturer and those of 316L laminated material, with tensile strengths ranging from 28.21 MPa to 142.77 MPa, with brittle fracture. To assess strength, the macrohardness and microhardness of the sintered parts were measured; the results indicate that strength increases with the degree of compaction and density of the samples. The dark grooves and edges surrounding the grains in the sintered stainless steel samples appeared after the corrosion test was performed according to ASTM A262, revealing a certain susceptibility that differs from that of sheet metal. Additionally, the blisters found in the sintered parts indicate that the temperature cycles need to be improved. In summary, there are challenges in producing fully satisfactory sintered parts due to various factors involved in 3D printing, deagglomeration, and sintering, and this lays the groundwork for future studies on the sintering of medical parts produced via 3D printing using 316L stainless steel filaments with high metal content.

Keywords: Dimensional, microstructural, mechanical, corrosion, 3D printing.

CAPÍTULO I

Aspectos generales

Introducción

La fabricación aditiva (FA) o manufactura aditiva (MA) también conocida comúnmente como impresión 3D, es un conjunto de técnicas para la elaboración de piezas diseñadas en un software tipo CAD que se van construyendo capa por capa y de forma controlada. Esta permite generar diseños de configuraciones complejas tridimensionales de forma personalizada que sería difícil de producir con otros métodos de fabricación tradicionales, posee buena dimensionalidad, aprovecha al máximo la materia prima, utiliza diferentes materiales ya sea metálicos, cerámicas o compuestos y, además, produce un mínimo de residuos (Suárez Ramírez, 2025).

La evolución de la manufactura aditiva resalta por su evolución hacia la utilización de una amplia gama de materiales entre los que destaca el metal. Inicialmente el material empleado exclusivamente en la fabricación aditiva fue el polímero, lo que restringía a su uso a la fabricación de prototipos para validación del diseño de manera visual dadas las distintas limitaciones mecánicas y funcionales de este material (Suárez Ramírez, 2025). Debido a estas restricciones y a las exigencias del sector industrial se aceleró la transición hacia el uso del metal, así se podrían aprovechar las capacidades de la maquinaria y convertirse en un proceso de manufactura digital directa para elementos finales.

De acuerdo a la normativa ISO/ASTM 52900 la manufactura aditiva se desglosa en siete (7) familias, el mecanismo físico que utiliza la impresora es el perteneciente a la familia de extrusión de materiales (MEX) que tiene por definición el diseñar piezas capa por capa donde se utilizará una boquilla u orificio calentado por el que atravesará el material base y lo dispersará con la geometría deseada (International Organization for Standardization (ISO) & ASTM International, 2021).

La técnica operativa exacta que se está aplicando a la presente investigación es una categoría de la extrusión de materiales y se conoce comercialmente como modelado por deposición fundida (FDM) o también como fabricación por filamento fundido (FFF) que de trata prácticamente de la manufactura de piezas que se construyen en capas progresivamente, esto por la deposición de material, estrictamente un filamento continuo sea polimérico o de alta carga metálica, el cual es empujado de forma mecánica a través de una boquilla a altas temperaturas y finalmente depositado estratégicamente (Zhou et al., 2024).

El filamento a utilizar es un material compuesto que se denomina de alta carga metálica ya que su composición se trata de un sistema polimérico que funciona como aglutinante y en ella un alto contenido de polvo metálico (Lottizarei et al., 2024). En concreto uno de los filamentos a usar es el BASF (Ultrafuse 316L) con 90% de polvo en peso de acero inoxidable 316L y The Virtual Foundry (316L Filament) con 86,1% de polvo metálico acero 316L (The Virtual Foundry, 2024).

Una vez impresas las piezas por medio del uso de la impresora Raise3D E2 cuya base se usó una balsa para adherencia a la cama denominado ligante polimérico (dependiendo del filamento de alta carga metálica y la cama), se realizó el control dimensional con un calibrador pie de rey de apreciación 0,02 mm e inspección visual para determinar su acabado superficial y en qué condiciones se encuentran las piezas en verde.

Estas piezas serán colocadas en un recipiente o crisol y colocadas dentro de un horno tubular en el cual se programa los rangos de tiempo y temperatura para llevar a cabo los procesos térmicos. Inicialmente con el ciclo de desagregado se somete a ciertas temperaturas para evaporar el polímero aglutinante y obtener una pieza totalmente metálica denominada pieza en marrón que tiene la singularidad de ser porosa y muy frágil. Por consiguiente, se realiza el ciclo de sinterizado que implica aumentar aún más la temperatura de tal manera que se acerque al punto de fusión del acero inoxidable 316L, que tiene como finalidad reducir el

espacio que quedó entre las partículas teniendo un mayor contacto y así generar una pieza sólida (Forward AM, n.d.).

Tras los procesos mencionados, las probetas metálicas serán sometidas a examinación mediante una serie de ensayos cuya intención es la de determinar qué tan viable es su uso a futuro dentro de la industria manufacturera. Las metodologías serán:

Caracterización microestructural y porosidad: Mediante el uso de la norma ASTM E3 “Preparation of Metallographic Specimens” que permitirá observar los granos, determinar sus límites y observar sus fases. Adicionalmente se podrá cuantificar la porosidad usando un software para el análisis de micrografías.

Caracterización mecánica: Se aplicó el ensayo de tracción mediante la norma ASTM E8/E8M “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, este nos proporciona información sobre la resistencia y ductilidad de los materiales sometidos a esfuerzos de tracción uniaxiales. De igual manera se realizará el estudio de su dureza para estimar la resistencia mecánica del material al ser aplicada una deformación plástica de manera local por penetración.

Caracterización corrosiva: La susceptibilidad a la corrosión intergranular se evaluará usando la norma ASTM A262 “Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels”, específicamente la práctica A por ser la más simple y práctica.

Planteamiento del problema

Dentro de la medicina se ha innovado en la creación de prototipos médicos los cuales generalmente son fabricados por medio del uso del mecanizado CNC, modelo por inyección e impresión 3D (Pantoja et al., 2025). Sin embargo, la dificultad de las diferentes configuraciones anatómicas humanas y los diferentes procedimientos quirúrgicos generan la necesidad de explorar nuevos campos para la innovación en la producción de estos prototipos, por eso se trata de buscar nuevos métodos como es el uso de la tecnología por fusión de lechos de polvo

(PBF), no obstante, presenta varias problemáticas por su gran equipamiento, costo, limitación de uso de material, defectos microscópicos y macroscópicos, además de la gran cantidad de residuos; por otra parte, es de interés la exploración del uso de la impresión 3D haciendo énfasis del uso de materiales compatibles con el cuerpo humano (Lotfizarei et al., 2024).

En el sector biomédico ecuatoriano se divisa una clara escasez dentro de la industria metalmeccánica respecto a la fabricación de prótesis. Barreras como los altos costos de la materia prima, de los equipos especializados o la falta de infraestructura apropiada, obligan al sistema de salud a mantener una fuerte dependencia a la importación de los componentes que da como resultados la extensión del tiempo de entrega, encarecimiento y por ende la salud del paciente, excluyendo a aquellos que no cuentan con el poder adquisitivo para seguir con este proceso (Cisneros Loja et al., 2025).

Ante los desafíos técnicos que implica la manufacturas de piezas metálicas complejas, es que se desarrolla esta investigación para evaluar experimentalmente la viabilidad de la manufactura aditiva combinada con procesos térmicos. La caracterización integral de las probetas y piezas, dará el aporte técnico directo al desarrollo del proyecto de investigación: “Fabricación de Prototipos Médicos no Probados en Humanos con Filamentos de Alta Carga Metálica por Impresión 3D”, el cual se encuentra en desarrollo.

Justificación e importancia

Justificación

La investigación aportará con conocimiento mediante la generación de una base documentada sobre el comportamiento dimensional, microestructural, mecánico y corrosivo de piezas fabricadas localmente con filamentos de alta carga metálica de acero inoxidable 316L tras haber sido sometidas a los procesos de desagregado y sinterizado. El presente estudio propone una alternativa técnica frente a diversos procesos de manufactura tradicionales incluyendo operaciones como torneado, fresado, taladrado, corte láser, corte por plasma, fundición, modelado por inyección, forja, laminado, trefilado, entre más, que requieren la

intervención de mano de obra y herramientas que a su vez generan gran desperdicio de materia prima. Es así que el modelado por deposición fundida (FDM) se considera de mayor flexibilidad con respecto a la libertad de diseño, uso eficiente del material y reducción de costos.

Importancia

La validación experimental mediante la exposición de los resultados obtenidos dará paso a impulsar la transición de la impresión 3D de una aplicación puramente experimental a la fabricación de componentes funcionales con un proceso rentable y eficiente. De esta manera los hallazgos servirán como directriz técnica para futuras investigaciones orientadas a la fabricación de implantes médicos que habilitarán estudios posteriores de biocompatibilidad y a su vez facilitando trascender hacia otras aplicaciones tecnológicas.

Objetivos

Objetivo general

Caracterizar piezas fabricadas por medio de impresión 3D en base a 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

Ejecutar el estudio del arte de la caracterización de piezas y probetas desagregadas y sinterizadas obtenidas a través de impresión 3D-FDM con filamentos metálicos de acero inoxidable 316L.

Elaborar el diseño experimental para la caracterización de piezas y probetas desagregadas y sinterizadas obtenidas a través de impresión 3D-FDM con filamentos metálicos de acero inoxidable 316L.

Imprimir, desagregar y sinterizar piezas y probetas a partir de filamentos con alta carga metálica con acero inoxidable 316L.

Caracterizar piezas y probetas desagregadas y sinterizadas obtenidas a través de impresión 3D-FDM con filamentos metálicos de acero inoxidable 316L: mecánica, dimensional, porosidad, microestructural y corrosiva.

Alcance

El alcance se delimita en evaluar las propiedades mecánicas, microestructurales, resistencia a la corrosión y dimensionales de piezas elaboradas con impresión 3D utilizando dos tipos de filamento con alta carga metálica de acero inoxidable 316L una vez sometidas a desagregado y sinterizado. El estudio abarca la caracterización física de las probetas realizando ensayos cuyos criterios establecidos en la normativa internacional serán respetados y ejecutados. Es de importancia destacar que, para la manufactura de las piezas, los parámetros de impresión serán utilizados de estudios experimentales previos y aquellos validados por los fabricantes del filamento adquirido como es el caso de The Virtual Foundry, al igual de las curvas de tiempo y temperatura para cada material base, de esta manera garantizando la replicabilidad metodológica utilizando los mismos equipos existentes en el laboratorio.

CAPÍTULO II

Estado del Arte

La manufactura aditiva (MA) surge como una nueva tecnología que pretende transformar la producción a nivel industrial debido a la flexibilidad que ofrece para crear diseños tridimensionales complejos y la capacidad de optimizar el uso de material. Sus primeros asentamientos datan desde 1948 donde Robert Deckard que desarrolló el proceso de sinterización selectiva por láser (SLS) del cual resultó un cubo plástico sinterizado de manera selectiva por láser. Posteriormente en 1987 fundó una empresa especializada en sistemas de prototipado y fabricación para otras empresas. De esta forma la manufactura aditiva tuvo un auge lo que impulsó a Deckard a inventar nuevos polímeros para aplicar en este proceso (Sher, n.d.). En 1989 S. Scott Crump patenta la primera impresora con tecnología FDM mediante la extrusión. Un hito fundamental ocurrió en el año 2005 que el proyecto “RepRap” desarrolló una impresora 3D siendo el modelo base para la construcción de equipos similares posteriores debido a que implicaba un menor costo de fabricación ya que su composición era a base de piezas plásticas capaces de ser fabricadas por la misma impresora (CEFAM, n.d.). Hasta la presente época, estas constantes innovaciones han consolidado e impulsado a generar nuevas formas de manufactura de elementos de alta complejidad, haciendo que los procesos sean más eficientes y precisos. Los sectores favorecidos con esta tecnología son el aeroespacial, automotriz, herramental, médico, industrial y de bienes de consumo, el beneficio radica principalmente en el bajo costo de equipamiento y la velocidad para la producción (Rane & Strano, 2019).

Existen diversas familias de manufactura aditiva como lo menciona la norma ISO/ASTM 52900 (2021) que las clasifica en:

1. Inyección de aglutinante (Binder Jetting - BJT): En lugar de calentar el material al punto de derretirlo, un cabezal de impresión coloca microgotas de pegamento líquido sobre una capa de polvo, uniendo las partículas.
2. Deposición de energía dirigida (Directed Energy Deposition - DED): Por medio de un láser o plasma que se ubica en un punto estratégico que funde la materia prima en forma de polvo o alambre en el momento justo que tiene contacto con la pieza.
3. Extrusión de materiales (Material Extrusion - MEX): Una boquilla u orificio a alta temperatura deposita de forma selectiva material que es empujado a través de este formando capas.
4. Inyección de material (Material Jetting - MJT): Un cabezal deposita microgotas de material base que generalmente son ceras o resinas sensibles a la luz que son solidificadas con luz ultravioleta en el instante que tienen contacto con la superficie.
5. Fusión de lecho de polvo (Powder Bed Fusion - PBF): Con el uso de una fuente de energía térmica ya sea un láser o un haz de electrones, se funde y aglomera de manera selectiva las regiones dentro de una cama con el material base en polvo, sea polímero o metal.
6. Laminación de láminas (Sheet Lamination - SHL): El material como papel, plástico o metal en forma de láminas se une con pegamento o soldadura ultrasónica, para posteriormente dar la forma deseada por medio de un láser o cuchilla que va recortando capa a capa.
7. Fotopolimerización en cubeta (Vat Photopolymerization - VPP): Una cuba es llenada con resina líquida de fotopolímero y un láser o rayo de luz ultravioleta solidifica la superficie de manera estratégica y en capas.

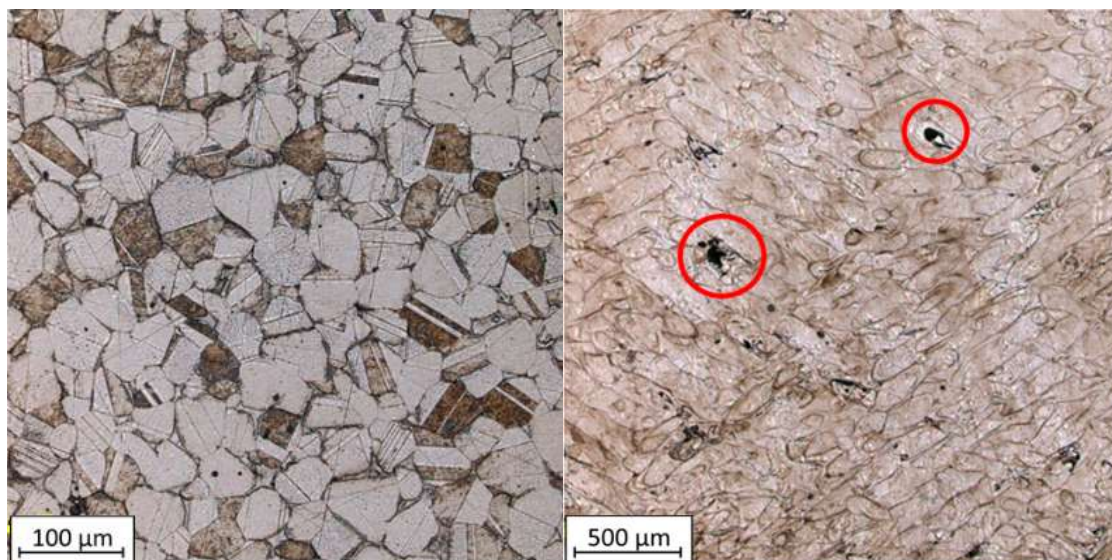
En la actualidad, la técnica de modelado por deposición fundida, la cual se mencionó anteriormente que resulta ser una técnica de la familia extrusión de materiales, se ha ido adaptando al uso de diversos materiales junto con la aplicación de procedimientos de

desagregado y sinterizado, permitiendo la creación de piezas de composición metálica o cerámicas funcionales (Rane & Strano, 2019).

Uno de los métodos más utilizados para la fabricación aditiva es la PBF, cuya aplicación tecnológica más aplicada es la fusión selectiva por láser (Selective Laser Melting - SLM) que hace el uso de un láser con alta potencia para fundir polvo metálico y generar una pieza sólida. Según investigaciones usando acero inoxidable 316L, piezas fabricadas por procedimiento presentó propiedades microestructurales como menos porosidad, mayor grado de solidez y mayor dureza, frente a piezas producidas por FDM sometidas a desagregado y sinterizado, cuya comparación se observa en la **Figura 1**, sin embargo, un limitante es el costo a nivel operativo y equipamiento por lo que se vio como una solución el uso de la técnica de extrusión de materiales (Kluczyński et al., 2023).

Figura 1

Micrografías de piezas fabricadas con FDM vs fabricada con SLM



Nota. Tomado de “A Comparative Investigation of Properties of Metallic Parts Additively Manufactured through MEX and PBF-LB/M Technologies”, por Kluczyński et al.(2023).

En cuanto al proceso de DED es muy utilizado en el ámbito de producción de materiales metálicos monomateriales y multilaterales mediante la técnica de deposición de energía dirigida

por láser (Laser Direct Energy Deposition - LDED), los resultados de las piezas obtenidas por este procedimiento señalan una densificación y una resistencia mecánica superiores al utilizar láser de alta potencia, pero resulta que esto genera una alta concentración de energía y por ende forma las zonas afectadas por el calor (ZAC) que modifican la microestructura del material, es por esto que las piezas fabricadas por FDM erradican esta situación a pesar de presentar alta porosidad y menor resistencia mecánica (Mazeeva et al., 2024a).

El acero 316L cuya composición en polvo es parte de los filamentos, resulta ser uno de los biomateriales con las ventajas de bajo costo, buenas propiedades mecánicas, mayor disponibilidad, fácil de procesar con buena resistencia a la corrosión por su bajo contenido de carbono. Esto le da la apertura de ser utilizado para fabricar componentes capaces de reemplazar a los originales dentro del cuerpo humano (Talha et al., 2013).

Impresión, Desagregado y Sinterizado con filamentos metálicos de acero inoxidable 316L.

Impresión

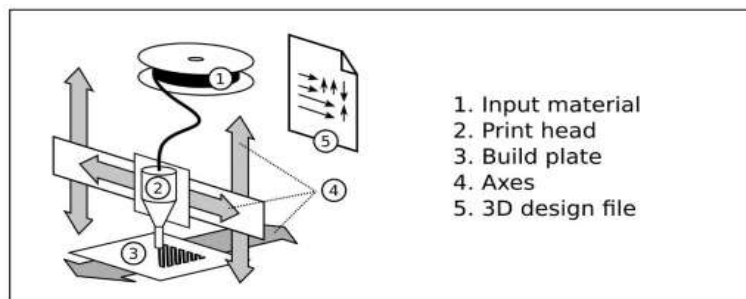
El filamento de alta carga metálica es un material compuesto que fusiona la flexibilidad de la aplicación de plásticos en la manufactura aditiva, con las propiedades físicas y químicas de la metalurgia de polvos.

El primer paso para empezar con la fabricación de piezas es el diseño de un modelo tridimensional por medio del uso de un software de diseño asistido por computador (CAD) que se lo exporta en un formato estándar de mallado, generalmente es el STL. Posteriormente por medio de un programa de laminado que prácticamente corta el modelo en varias rebanadas para poder procesarlo y es aquí donde se colocan los parámetros para generar las instrucciones para la impresión, el software exporta un archivo de código máquina (G-Code). En cuanto a la máquina, se la debe calibrar y cargar el filamento asegurando una constante alimentación de material. Una vez interpretado el archivo G-Code por la impresora 3D, deposita el material en forma de hilo, de manera estratégica y continua que se van apilando hasta formar

una forma tridimensional también conocida pieza en verde cómo se puede ilustrar en la **Figura 2** (BASF, n.d.).

Figura 2

Partes comunes de las impresoras 3D



Nota. Adaptado de “3D Printing: Overview, Impacts, and the Federal Role”, por Sargent Jr & Schwartz (2019).

Entre los principales parámetros a definir son la altura de capa, ancho de extrusión, velocidad de impresión, temperaturas de cama y extrusores, solapamiento de relleno, dirección de relleno, factor de escalado, flujo y densidad de relleno. No solo estos influyen en la calidad final de la pieza en verde, también el tamaño de las boquillas. Además, es importante acotar que, al contener un alto contenido de polvo metálico, hace el que el filamento se lo considere de cierta forma en un material abrasivo por lo que es importante utilizar los accesorios para la impresora que sean los más adecuados, en este caso boquillas de acero endurecido para que tengan una mayor resistencia al desgaste con un tamaño adecuado al tipo de filamento de alta carga, por otro lado se debe tener una correcta limpieza en toda la máquina durante la utilización de la misma (BASF, n.d.).

Los parámetros incluso tienen influencia en los procesos de sinterizado, como es el caso de Hassan et al. (2021) donde se aplicó un diseño experimental factorial para estudiar la influencia de los parámetros de impresión en la pieza tras atravesar los ciclos de calentamiento utilizando el filamento que contenía polvo de acero inoxidable SS316L y aglutinante Embemould K83. Aquellas variables modificadas fueron: altura de capa, orientación de la pieza

y velocidad de extrusión, que dieron como resultado en la parte dimensional una contracción casi uniforme, asegurando un procedimiento térmico estable y con resultados predecibles; en la parte microestructural comparando entre las distintas alturas de capa y velocidades de extrusión, se observaron pocas diferencias tanto en la porosidad como en el tamaño de grano. Finalmente, los parámetros que dieron una mejoría en las propiedades de las piezas sometidas al sinterizado fueron: altura de capa de 0,5 mm, orientación vertical y velocidad de extrusión de 12,5 mm/s.

Entre los patrones de relleno disponibles son lineal, diagonal a 45°, vertical a 0° y 90° y más, los cuales influyen en el comportamiento mecánico de las piezas como es la tracción. En cuanto a los patrones de 45°, 0° y 90°, no tienen mayor influencia en la densidad y la resistencia a flexión en la pieza ya metálica, el patrón que, si ha logrado un cambio más sustancial con una menor generación de poros, dando una mayor resistencia a la tracción. Sin embargo, la combinación de parámetros es importante ya que cada uno ofrece una propiedad que en conjunto resulta en mejores comportamientos ya que en algunos estudios, los patrones diagonales y rectilíneos junto con parámetros de impresión optimizados y con ciertos tamaños de boquilla, resultaron con mejor resistencia a la tracción en filamento BASF UF 316L SS (Raza et al., 2024).

Desagregado

Una vez obtenida la pieza en verde, se debe eliminar la parte polimérica o aglutinante, que es el polímero que une a las partículas metálicas, para que su composición sea enteramente metálica pero altamente porosa ya que el espacio está destinado para la unión de las partículas metálicas y por ende la posterior reducción dimensional de las piezas además de la pérdida de masa en el sinterizado. La pieza resultante de este proceso se denomina “pieza marrón” Es así que, dependiendo de su composición, la eliminación puede ser realizada por los métodos:

- Termoquímica: Es un proceso denominado desagregado catalítico en cual consiste en exponer a un reactivo en un ambiente gaseoso, generalmente en ácido nítrico en una atmósfera de nitrógeno (BASF, n.d.), dentro de un horno catalítico donde se aumenta la temperatura hasta aproximadamente 120°C para eliminar el plastificante. Entre sus ventajas incluye ser un proceso rápido y el no provocar hinchazón térmica en las piezas (Kluczyński et al., 2023).
- Térmica: Se basa puramente en la aplicación de calor, las piezas en verde se ingresan en un horno y se someten a una curva de calentamiento lenta que descompone en forma gaseosa a los polímeros contenidos y provoca una notable pérdida de masa, además la atmósfera tiene una gran influencia ya que parte de la composición de la pieza es carbono que al reaccionar con el oxígeno del ambiente pueden llegar a formar óxidos (Kluczyński et al., 2023). Un calentamiento prolongado interviene en la formación de grietas o que las piezas experimenten un abombamiento que al contrario de un calentamiento rápido genera presiones internas que proliferan la formación de abombamientos por la dificultad del escape del polímero en forma de gas, además el uso del vacío y atmósferas inertes disminuyen la formación de la oxidación (Suárez Ramírez, 2025).
- Por solventes: El componente se sumerge el componente en un baño químico con agentes líquidos, el compuesto depende de la solubilidad del aglutinante y se expone a una temperatura controlada, este proceso sirve para la eliminación de algunos componentes del polímero. Adicionalmente se somete a un desagregado térmico para eliminar totalmente el aglutinante de la pieza (Rane & Strano, 2019). La metodología tiene la finalidad de retirar el componente polimérico de manera segura y mantener la geometría exacta, la primera parte abre los canales para que el segundo proceso de desagregado pueda eliminar

con esta especie de ventilación, de forma gaseosa el compuesto completo, lo que disminuye hinchazones o desperfectos en la figura final (Spina & Morfini, 2024).

Sinterizado

Es el proceso de culminación de la manufactura aditiva, consiste en unir las partículas metálicas de la pieza marrón ya que del desagregado tienen una estructura altamente porosa, haciéndolas más densas y sólidas, por es que se produce una contracción dimensional al reducir el tamaño de los poros, dicho fenómeno debe tomarse en cuenta durante el diseño y según múltiples estudios, es anisotrópica. Este fenómeno viene determinado por los parámetros de impresión, ya que mientras más espacios haya entre el tejido de la impresión, mayor será la contracción y menor será su densidad (Gonzalez-Gutierrez et al., 2018).

Esta unión se consigue por medio de colocar los elementos dentro de un horno y exponerlos a presiones y temperaturas por debajo de del punto de fusión del material metálico que compone el filamento, generalmente del 70% al 90% de su punto de fusión, para mantener la forma impresa (Gonzalez-Gutierrez et al., 2018). Es importante recalcar que la dirección de la impresión y demás parámetros tienen mayor influencia en la reducción de la pieza posprocesamiento que su misma orientación durante el proceso de desagregado y sinterizado (BASF, n.d.). La pieza resultante de este proceso se denomina “pieza sinterizada” o “pieza blanca” y lo que se desea como resultado de las piezas sinterizadas es una alta densidad y sin defectos en su superficie (Raza et al., 2024).

La atmósfera dentro del horno supone una de las variables más importantes para obtener un resultado óptimo, esta se puede dividir en las categorías:

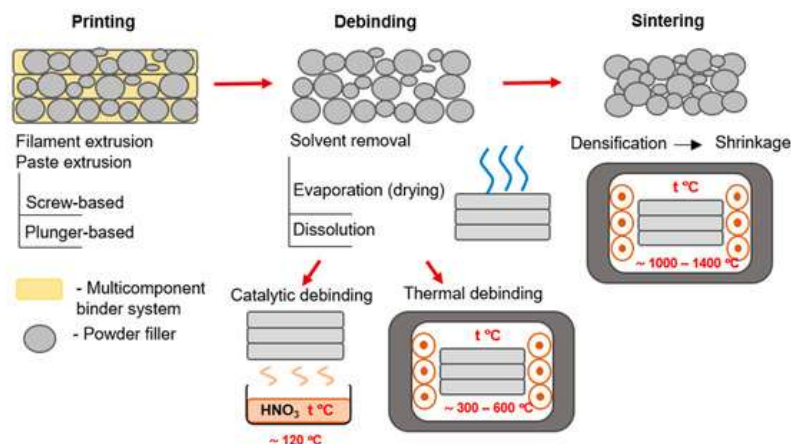
- **Atmósfera reductora:** Se usa gas reactivo, principalmente hidrógeno puro. Su función es la expulsar el oxígeno y atacar a las capas de óxido que recubren a las partículas de acero (BASF, n.d.).

- **Atmósfera inerte:** La inyección de gases nobles como argón o nitrógeno. Desplazan el oxígeno al ambiente para que no permanezca dentro del horno y oxide a la pieza (Gonzalez-Gutierrez et al., 2018).
- **Sinterizado al vacío:** Para evitar inyectar gases, se utilizan bombas que extraen totalmente el oxígeno al interior del equipo, esto reduce la formación de oxidación en las piezas y disminuye la formación de burbujas en su superficie. Es de las atmósferas protectoras con los mejores resultados y una con baja cantidad de carburos (Naranjo, 2022).

Es así que las piezas impresas con filamento de alta carga metálica tienen que atravesar los procesos de desagregado y sinterizado, ya sean abordados por diferentes técnicas tomando como ejemplo la **Figura 3**, para obtener como producto final un componente compuesto en su totalidad por metal, en este caso, acero inoxidable 316L.

Figura 3

Esquema de fabricación de piezas metálicas por tecnología metalmeccánica.



Nota. Procesos de impresión, desagregado y sinterizado para elementos fabricados con filamento de alta carga metálica. Adaptado de “*Multi-Metal Additive Manufacturing by Extrusion-Based 3D Printing for Structural Applications: A Review*”, por Mazeeva et al. (2024b).

Aplicaciones de la manufactura en el campo médico y antecedentes del uso del acero inoxidable 316L.

El material AISI 316L ha sido reconocido como material de grado quirúrgico lo que da un buen preámbulo del contacto seguro y prolongado con tejidos corporales y fluidos sin causar reacciones negativas. El cuerpo humano resulta ser un entorno muy agresivo al poseer un pH muy variable, sin embargo, estudios han demostrado una buena resistencia a la corrosión ante un componente muy corrosivo como es el ácido oxálico (Álvaro & Ferrero, 2013). Dicho acero debe poseer una buena relación resistencia-peso debido a que da una vista previa de lo que puede llegar a soportar las cargas mecánicas del cuerpo (en huesos largos o en instrumentación espinal) sin deformarse permanentemente (International Organization for Standardization., 2013).

Este acero forma parte de las tres principales aleaciones que se implantan de forma permanente en el cuerpo humano, presenta una característica principal que es el bajo contenido en carbono (simbolizado con la letra L), diseñado para evitar que ocurra el fenómeno de sensibilización que se trata sobre la formación de carburos de cromo en los límites de grano cuando este tipo de acero está expuesto a temperaturas entre 450 y 415° C durante cierto tiempo, es así que deja zonas con cantidades bajas de cromo y se hacen propensas a corrosión y finalmente provocar una falla macroscópica (Ratner et al., 2013). Posee una biocompatibilidad aceptable, densidad suficiente para soportar ciertas cargas, por eso se le ha dado un uso muy común en implantes ortopédicos, uñas de trauma, Instrumentos quirúrgicos, columnas de cromatografía y para aplicaciones neurológicas (AMETEK, n.d.).

Un estudio sobre la impresión de placas de acuerdo a la anatomía de la fractura y a la forma ósea de seis pacientes cadavéricos que presentaban fracturas de meseta tibial. Una vez fabricadas con acero inoxidable 316L de grado médico por medio de del proceso de fusión por láser, se procedió a realizar la correspondiente esterilización para finalmente implantarlas quirúrgicamente. A pesar de un correcto procedimiento hay algunas variantes fuera del proceso

de fabricación de la pieza que influyen en el funcionamiento como es la biocompatibilidad con el cuerpo humano, instalaciones óptimas, inmovilidad prolongada, irritación del tejido blando suprayacente, entre otros (An et al., 2021).

En el caso del modelamiento de fémur de una rata utilizando como material base el acero inoxidable 316L y manufacturado por medio de la fusión por lecho de polvo, no se presentó descomposición y eliminación de tejido óseo en implantes con polvos residuales, pero muestran una buena regeneración ósea y capacidad de integración debido a su rugosidad original. En el grupo que se realizó la prueba se presentó el mismo grado de inflamación que mostraba una buena seguridad biológica (Tang et al., 2023).

Caracterización de piezas y probetas desagregadas y sinterizadas obtenidas a través de impresión 3D-FDM con filamentos metálicos de acero inoxidable 316L:

El tipo de procesamiento de modelado por deposición fundida de metal conlleva varias etapas, cada una con características distintivas que alteran a la estructura y fisonomía de las piezas hasta llegar a la etapa final de la sinterización. Lo que se pretende analizar es cómo influye el cambio de ciertos parámetros de impresión, series de desagregado y de sinterizado, para determinar finalmente que dirección se le puede dar al conjunto de técnicas realizadas según los resultados.

Caracterización dimensional

Entre los diferentes métodos más utilizados según el equipamiento para realizar las mediciones según la normativa ISO/ASTM 52902 de International Organization for Standardization (2019) son:

- Instrumentos de medición manuales: Realizan una medición física entre dos caras paralelas como son las mordazas del calibrador pie de rey. Con esto se puede realizar mediciones lineales simples como son el largo, ancho, espesor y diámetros.

- Máquinas de medición por coordenadas (CMM): Son equipos de alta precisión que mediante un palpador registra coordenadas en el espacio cartesiano (X,Y,Z). Utilizado comúnmente para geometrías complejas que exigen mayor precisión.
- Sistemas de escaneo óptico 3D: Son equipos que realizan mediciones sin necesidad de contacto físico con la pieza. Por medio del uso de láseres de una cámara de alta resolución la cual captura múltiples puntos por segundo, haciendo una especie de escaneo.

El parámetro cuantitativo más importante es la dimensional, debido a que es el principal cambio después de someter los elementos impresos al desagregado y sinterizado. Es la primera validación hacia el resto de las caracterizaciones ya sea la mecánica o corrosiva ya que estas dependen en mayor medida de la geometría. Un análisis revela que la precisión dimensional y el comportamiento mecánico dependen fundamentalmente de la dirección de fabricación y el espaciado entre capas, por eso es que la solución más viable es reducir la altura de capa, aunque esto suponga mayor tiempo de fabricación y al mismo tiempo expone a la pieza a acumular una gran cantidad de calor internamente causando hinchazones en su geometría Singh et al. (2017).

La pieza en verde es expuesta a series de temperatura donde se produce la pérdida del aglutinante, esto genera una contracción de volumétrica significativa. Como lo menciona BASF (n.d.) para el filamento Ultrafuse 316L, la contracción en el eje Z suele ser mayor a la de los ejes X y Y, lo que determina que este fenómeno es anisotrópico. Por esto ha determinado porcentajes de sobredimensionamiento correspondientes a cada eje que ayudan a aproximar la reducción de la pieza, orientado a obtener los valores originales diseñados como se observa en la **Figura 4** utilizando una serie de parámetros dentro de sus recomendaciones que se muestran en la **Figura 5**. Cabe recalcar que también es influenciado por los parámetros de impresión seleccionados además de los factores de una correcta calibración y funcionamiento

de la máquina como se menciona en Suárez Ramírez (2025) cuya impresora fue capaz de realizar piezas con tolerancias de $\pm 0,02$ mm en todos los ejes, boquilla adecuada y rendimiento del programa utilizado para la impresión, incluso cada atipo de filamento tiene su respectivo comportamiento dimensional además de que se deben tomar en cuenta los ciclos de calentamiento.

Figura 4

Valores para el sobredimensionamiento de las piezas.

Printing Axis	Average Shrinkage	Scaling / Oversizing Factor
X & Y	16.6%	120%
Z	19.3%	124%

Nota. Contracción y escalado para procedimiento de sinterizado en filamento Ultrafuse 316L.

Adaptado de “*Ultrafuse Metal Filaments User Guidelines for 3D Printing Metal Parts*”, por BASF

(n.d.)

Figura 5

Parámetros de impresión recomendados

Parameter	Value	Comment
Nozzle size	0,3 - 0,8 mm	Depending on level of detail required and print time
Line width	±10-20% Nozzle size	Recommended
Retraction distance	1,5 mm / 5,0 mm	Direct / Bowden extruder
Retraction speed	45 mm/s	Recommended
Layer height	0,10-0,25 mm	No more than 60% of the nozzle size recommended
Outlines	1-3	Too many outlines can result in wall separation
Infill Density (Solid Part)	105% Lines	Rectilinear types have shown to produce highest densities
Infill Overlap	20-35%	Overlap between the infill and the walls must be ensured
Infill type (Hollow)	>60% Gyroid, Grid or Triangle	Minimum infill above 60% for best results, but lower values possible with testing
Infill Line Directions	[45, -45]	Recommended
Nozzle temperature	245°C	Calibrate to ensure actual temperature matches slicer temperature settings
Bed temperature	90-105°C	Calibrate to ensure actual temperature matches slicer temperature settings
Cooling	None	Part cooling generally increases warpage but can be helpful during bridging
Print Speed	25 mm/s	Slower printing speeds produce denser more accurate results
Extrusion Rate	Max 25 cm ³ /h	By nozzle size 0,4 mm, lower rates are recommended
Scaling	XY 120% Z 124%*	See Shrinkage & Oversizing factor

Nota. Adaptado de “*Ultrafuse® Metal Filaments User Guidelines for 3D Printing Metal Parts*”, por BASF (n.d.).

En el caso del filamento Virtual Foundry de acero inoxidable 316L supone que su reducción es de aproximadamente del 7 al 10% en sus ejes X y Y, el eje Z siendo el más afectado por lo que se recomienda aumentar ligeramente su sobredimensionamiento, este valor determinado según los parámetros de impresión que dieron un mejor acabado superficial como fueron: caudal de 135%, temperatura de extrusor de 225 °C, boquilla de 0,6 mm, altura de capa entre 0,1 y 0,3 mm, (The Virtual Foundry, n.d.).

Con una serie de cubos de medidas reducidas, se realizó una serie de experimentos en los cuales se utilizaron parámetros fijos de impresión como: temperatura de cama de 60°C, densidad de relleno de 100%, caudal de 100%, altura de capa de 0,2 mm, boquilla de 0,4 mm, patrón de relleno rectilíneo y ventiladores apagados. El parámetro de control fue la temperatura de la boquilla que tuvo variaciones de 195°C a 220°C en intervalos de 5°C, todas con los mismos ciclos de temperatura para el posprocesamiento. Para las probetas en verde para las temperaturas de 195°C a 205°C las piezas fueron fieles a la geometría del CAD, pero aquellas

con temperaturas de 210°C a 220°C, hubo exceso de material en los bordes de las piezas por la afusión excesiva del filamento acumulado en el orificio de la boquilla y evidentemente alterando las medidas tomadas. Respecto a las piezas metálicas, además que todas las probetas experimentaron un abultamiento, uno en forma de escaleras en las probetas de 200°C y 210°C y una distorsión en forma de A en aquellas impresas a 215°C y 220°C (Musa et al., 2024).

Caracterización microestructural

Se trata de un procedimiento para poder revelar y observar las características a nivel microscópico tales como componentes, estructura y fases del material utilizando un microscopio óptico de barrido (SEM). Para esto se extrae una muestra de la pieza a analizar para empastillarla, se le da una lijada progresiva desde la hoja con número de grano más pequeño, que sirve para aplanar la muestra, hasta una hoja con un número de granos lo más grande posible. Posterior a esto se pule con un paño cuyo tamaño de grano está en la escala de micras, se ataca químicamente y se procede a examinar (ASTM International, 2017b).

En una investigación que utilizó como filamento Ultrafuse 316L SS y como parámetros de impresión: orientación de impresión en plano, patrón de relleno diagonal a 45°, densidad de relleno 100%, temperatura de la cama de 100°C, temperatura de extrusor de 230°C y altura de capa de 0,2mm. Preparó probetas utilizando desde el papel lija desde los 60 hasta los 4000 granos obteniendo un acabado tipo espejo y se pule con pulimento policristalino con tamaño de grano de 6 μm , 3 μm y 1 μm . Posteriormente se realiza un ataque electroquímico con ácido oxálico al 10% en volumen con 5 Voltios durante 30 o 40 segundos para observar bajo un microscopio electrónico, los granos. Es así que se obtuvo como resultados, con las piezas metálicas que los límites de grano son visibles, la cantidad de grano indica una mayor resistencia a la tensión y aumento de ductilidad con ciertas temperaturas de sinterización (Raza et al., 2023).

Las propiedades mecánicas tienen una fuerte relación con el manejo de los ciclos de temperatura ya que es una etapa muy influyente en la elaboración de las piezas y por ende en

sus características microscópicas, es así que Tadi & Mamilla (2026) realiza una variación en las temperaturas de desagregado con solvente que tuvo un comportamiento más adecuado a los 45°C, esto se determinó ya que en cuanto a su microestructura que obtuvo que la pieza estaba totalmente constituida por la fase austenítica, su estructura cristalográfica con orientaciones aleatorias, lo que favoreció al comportamiento mecánico debido a que esta característica hace que el material tenga un comportamiento más isotrópico.

Caracterización de porosidad.

La porosidad es la fracción de espacios huecos en relación con el volumen total del material. La relación con la densidad es inversamente proporcional debido a que gracias a los ciclos de desagregado y sinterizado, las partículas metálicas se compactan generando una pieza más sólida y por ende con mayor cantidad de material sin dar paso en lo posible a la formación de poros. Esta medida puede ser estudiada de cuatro maneras (Spierings et al., 2011) (Randall, 2005):

- Gravimétrico (Principio de Arquímedes): El procedimiento es el de primero pesar la probeta en seco, posteriormente se la sumerge en algún líquido (agua destilada o aceite de baja viscosidad) para que ingrese en los poros, finalmente volver a pesarla en estado saturado (ASTM International, 2017a).
- Análisis digital de imágenes: Es un método que se basa en cuantificar de forma estadística las características de una cara transversal de la pieza. Una probeta preparada previamente, es fotografiada con un microscopio electrónico de barrido, las imágenes son procesadas para obtener un contraste entre el material y los poros, así con un software de análisis calculará la fracción de área vacía utilizando el principio de estereología de Delesse quien establece que la fracción de área ocupada por una fase (poros) es igual a la fracción volumétrica que este elemento microestructural ocupa en toda la pieza (ASTM International, 2016).

- Tomografía computarizada de rayos X: Se emite un haz de rayos X a través de una probeta que gira 360° para crear un modelo en 3D de manera digital y exacta (Madejski & Muna, 2026).
- Picnometría de gas: Método preciso a nivel volumétrico. La muestra a estudiar se introduce en una cámara hermética para inyectar helio o nitrógeno, se recopilan los cambios de presión y usando la ley de Boyle, se puede medir el volumen de la estructura metálica (ASTM International, 2022).

Relacionado a las piezas fabricadas con filamento Virtual Foundry 316L cuya temperatura de extrusor fue el parámetro variable. La evaluación fue de tipo cuantitativa y medida con el principio de Arquímedes que contrastó los datos de las piezas ensayadas con el valor teórico de 8 g/cm^3 , con una temperatura de 200°C las piezas alcanzaron una densidad de 97,6% que prestó mínimamente vacíos y defectos internos. Por otro lado, aquellas piezas con temperaturas inferiores a ese umbral como fueron las de 195°C , su densidad redujo a 81,9% revelando múltiples porosidades y defectos superficiales.

Las conclusiones que determina Raza et al.(2023) en su investigación en cuanto al uso del filamento Ultrafuse 316L fueron: con la metodología del principio de Arquímedes se obtuvo un valor de 7470 kg/m^3 en el material sinterizado, comparable con un acero fabricado por fundición que posee una densidad de aproximadamente 8000 kg/m^3 , es decir, una densidad relativa del 93,4%.

Caracterización mecánica.

Ensayo de tensión

La tensión es la resistencia que presentan los materiales internamente frente a una fuerza aplicada que provoca su estiramiento. El ensayo en se lo realiza en una máquina universal de ensayos que aplicará cierta fuerza en los extremos de la probeta a cierta velocidad de forma controlada, mientras sucede eso, un extensómetro registra la fuerza aplicada y el alargamiento de la probeta hasta llegar a una deformación plástica. Todos estos datos permiten

generar una curva de esfuerzo – deformación para determinar indicadores como la resistencia, módulo de elasticidad, límite de fluencia y el porcentaje de alargamiento. (ASTM International, 2013).

Mediante una investigación se realizó pruebas con el sinterizado en distintas atmósferas que arrojó como resultados que ante una sinterización al vacío se obtuvo una alta resistencia mecánica de 540 MPa debido a su alta densidad y contracción en el horno (Raza et al., 2024).

Como es parte de la producción de las piezas, la impresión y sus parámetros tienen mucho en el actuar de estas, Kurose et al.(2020) desarrollaron su propio filamento con 60% de carga metálica y mediante la fabricación por filamento fundido se realizaron variaciones en el ancho de extrusión y orientación de impresión, aquellas piezas con un ancho de 0,1 mm y las capas perpendiculares a la tracción arrojaron el valor más alto de resistencia a la tracción de 453 MPa, ajustándose al valor general que experimentan los filamentos de alta carga metálica.

Ensayo de dureza

La dureza se define como la resistencia que opone un material a ser deformado plásticamente de forma localizada al aplicar una carga controlada contra la superficie que origina huellas. Es así que se lo puede medir con distintas técnicas:

- Por indentación: Se utiliza un indentador con cierta geometría que hace el uso de fuerza para presionar el material. La diferencia radica en la forma del indentador y la medición de área o profundidad (ASTM International, 2018).
- Por rebote: Se mide la velocidad de impacto y el rebote de un objeto pequeño que es disparado para impactar contra la superficie de la pieza (International Organization for Standardization, 2015).
- Por rayado: Método cualitativo en el que se evalúa la resistencia a ser deformada de manera permanente de la superficie de un material por la interacción con un objeto más duro que se desliza (ASTM International, 2017c).

Raza et al. (2023) cuyo fin fue el de estudiar la variación de la temperatura de sinterización, concreta que se logró dos durezas, una de 245 HV en una pieza sinterizada a 1230°C a pesar de haber resultado con alta porosidad (por ende menor densidad) y menor límite de grano y por otro lado piezas con dureza de tipo indentada de 189 HV que fueron sinterizadas a 1360°C, siendo esta última la mejor y más representativa ya que arrojó mejores resultados estructurales como mayor densidad y mejor unión de granos metálicos, acotando otras características mecánicas.

A manera de identificar los mejores parámetros de impresión que definan una buena densidad en la etapa final de fabricación, Carminati et al. (2022) generó una combinación óptima de patrón de relleno lineal, velocidad de 20 mm/s, ancho de extrusión de 0,1 mm y temperatura de boquilla de 170°C y así se obtuvo en base a la dureza con indentador de aproximadamente 55 ± 4 HRB y 132.2 ± 3.8 HV, estas medidas mostraron distribuciones uniformes a lo largo de las piezas lo que determina un comportamiento isotrópico pero más bajo en un 32% y 15 %, respectivamente, en relación a un acero convencional 316L.

Por otro lado, la ficha técnica del filamento establece que una probeta sinterizada de Ultrafuse llega a alcanzar los 561 MPa con una elongación del 53% y para la dureza unos 128 HV10 (BASF, n.d.).

Caracterización corrosiva.

La corrosión es el deterioro de un material ante un ataque químico presente en su entorno. Así se puede dividir en los métodos principales para su caracterización:

- Método gravimétrico: Se realiza la medición de la pérdida de masa que experimenta un espécimen al permanecer expuesto a un entorno controlado con agentes agresivos durante cierto tiempo (ASTM International, 2021).

- Métodos electroquímicos: Se mide de forma analítica la respuesta electroquímica que tiene la pieza al sumergirla en un reactivo y aplicar corriente eléctrica (ASTM International, 2015).

En el diseño y puesta en marcha de un sistema de vacío impulsado con dos bombas de Álvaro & Ferrero (2013) para lograr realizar el procedimiento de desagregado y sinterizado de piezas fabricadas mediante la tecnología FFF y de esa manera realizó la caracterización utilizando el método electroquímico y obtuvo que el enfriamiento post-sinterizado influye en la microestructura obteniendo formas tipo “step” clasificando al material en uno de alta resistencia al ataque intergranular.

CAPÍTULO III

Materiales y Equipos

Filamentos metálicos de acero inoxidable 316L.

Los filamentos son la parte más esencial para la fabricación de las probetas, estos contienen alta carga metálica en su composición, por esto se utilizó dos tipos de filamentos: “Ultrafuse 316L” de BASF que se muestra en la **Figura 6** con una composición en peso de 90% de polvo de acero inoxidable 316L y 10% de una mezcla de polímeros en la presentación de 1,75 mm de diámetro (BASF, 2019) cuya composición química de la fase metálica se observa en la **Tabla 1** con el porcentaje en peso, y, por otro lado, “Filamento de acero inoxidable 316L” de The Virtual Foundry de la **Figura 7** con 86,1% de polvo metálico acero inoxidable 316L y 13,9% de polímero aglutinante de 1,75 mm de diámetro (The Virtual Foundry, 2024) que la composición total se puede observar en la **Tabla 2**. Adicionalmente como parte del proceso se utiliza filamento de ácido poliláctico (PLA) “RAIDE3D” en cual sirve como interfaz de adhesión a la cama de la impresora 3D.

Figura 6

Filamento Ultrafuse 316L



Tabla 1

Composición química del polvo metálico contenido en el filamento Ultrafuse 316L

Fe [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	Oxietileno [%]
50 – 75	7 – 25	7 – 25	< 10	< 0,1

Nota. Adaptado de “*Determinar el comportamiento viscoelástico de polímeros con alta carga metálica de acero inoxidable 316L impresos por 3D-FDM*”, por Cárdenas (2025).

Figura 7

Filamento de acero inoxidable 316L Virtual Foundry

**Tabla 2**

Composición química del filamento de acero inoxidable 316L

Fe [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	PLA [%]
40,00 – 63,75	4,00 – 17,00	4,00 – 17,00	4,25	< 20,00

Nota. Adaptado de “*Safety Data Sheet of Stainless Steel 316L Filamet™*”, por The Virtual Foundry (2026b).

Impresora 3D-FDM.

Para realizar la parte de la impresión 3D se utilizó la impresora RAISE3D E2 que se muestra en la **Figura 8**, a la izquierda la impresora 3D y a la derecha una estructura montada sobre la impresora utilizada para facilitar la alimentación del filamento Virtual Foundry. Las especificaciones se muestran en la **Tabla 3** junto con software de laminado “ideaMaker” versión 5.3.1 Beta.

Figura 8

Impresora RAISE3D E2 con estructura



Tabla 3

Especificaciones técnicas impresora RAISE3D E2

Parámetro	Valor
Tecnología de impresión	Fabricación por filamento fundido (FFF)
Tamaño de la máquina (Ancho x Prof. x Altura)	607 x 596 x 465 mm
Sistema de cabezal	Extrusores dobles o independientes.

Volumen de impresión (Ancho x Prof. x Altura)	1 Extrusor 330 x 240 x 240 mm 2 Extrusores 295 x 240 x 240 mm
Diámetro del filamento	1,75 mm
Entrada de fuente de alimentación	100-240 V AC, 50/ 60 Hz 230 V @ 2 A
Entrada de fuente de alimentación	24 V DC, 350 W
Altura de capa	Compatibilidad con boquillas: 0,2, 0,4, 0,6, 0,8
Temperatura máxima de la boquilla	300 °C
Temperatura máxima de plataforma de construcción	110°C
Materiales compatibles	PLA/ ABS/ ASA/ PETG/ PC/ PETG ESD/ TPU 95A/ PVA+
Tipos de archivos	STL/ OBJ/ 3MF/ OLTP
Sistemas operativos soportados	Windows/ macOS/ Linux
Conectividad	Wi-Fi, LAN, Puerto USB, Cámara en Vivo

Nota. Adaptado de “E2 Technical Specifications” por Raise3D (2024).

Como se indicó, en el caso de la impresión con el filamento de The Virtual Foundry se implementó una estructura como se observa en la **Figura 8** para poder adaptar el calentador de la **Figura 9** el cual elevaba la temperatura del filamento hasta los 60°C para ablandarlo y facilitar su ingreso al cabezal de impresión.

Figura 9

Calentador de filamento metálico



Como se divide en la **Figura 10**, para las impresiones se utilizó dos camas distintas: de acero flexible y metálica gris, para las última base se colocó una lámina plástico de PEI (polieterimida) para facilitar la adherencia de las piezas, además de rociar fijador de cabello, específicamente el fijador “Har Spray Fijación Extrafuerte”.

Figura 10

Cama de acero flexible y cama metálica gris con lámina de PEI



Horno para desagregado y sinterizado

El horno es de tipo tubular que puede trabajar al vacío de la serie BR - 16MT- 60/300 capaz de alcanzar hasta los 1600°C que se observa en la **Figura 11**, este sistema viene compuesto de un tiristor (SCR), termopar tipo B y un regulador de temperatura, en el cual se ingresarán las piezas sostenidas dentro de un crisol de alúmina. Sus especificaciones técnicas se aprecian en la **Tabla 4**.

Figura 11

Horno tubular al vacío



Tabla 4

Especificaciones técnicas del horno tubular BR - 16MT- 60/300

Parámetro	Valor
Potencia nominal	4 kW
Voltaje nominal	220 V 60Hz
Alta temperatura	1600 °C
Temperatura nominal	1500 °C
Velocidad de calentamiento	≤ 15 °C/min
Velocidad de calentamiento recomendada	10 °C/min
Precisión del control de temperatura	±1
Vacío límite	5 Pa
Tubo	Ø 60 x 300 mm
Elemento calefactor	Resistencia de disiliciuro de molibdeno MoSi ₂

Nota. Adaptado de “*Product description and user manual*”, por CSAL (2024).

Equipos para caracterizar las probetas y piezas desagregadas y sinterizadas: máquina de ensayos universal, durómetros, microscopio óptico, instrumentos de metrología, equipo para ensayos de corrosión.

Para la parte concerniente a la caracterización mecánica se van a realizar dos ensayos. El primero implica el estudio de la resistencia a la tensión y se dará uso a la máquina de ensayos universales serie 8801 de la marca INSTRON señalada en la **Figura 12**, ubicada en el laboratorio de Mecánica de Materiales dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, en conjunto con el extensómetro serie 2620 – 600 de la marca INSTRON que tiene como función medir el alargamiento que sufre la probeta durante la experimentación, **Figura 13**. Las especificaciones de ambos se muestran en **Tabla 5** y **Tabla 6**, respectivamente.

Figura 12

Máquina de ensayos universal INSTRON 8801



Tabla 5

Especificaciones técnicas del equipo de ensayo a tensión INSTRON 8801

Parámetro	Valor
Capacidad de fuerza	±100 kN
Carrera del actuador	150 mm (6,9 in)
Controlador	Digital 8800MT
Tipos de pruebas	Estáticas y Dinámicas
Altura estándar	1023 mm (40.3 in)
Sistema de elevación	Elevación y bloqueo hidráulico
Presión hidráulica requerida	207 bar (3000 psi)
Entorno de operación	+10 a +38°C (+50 a +100°F), humedad 10-90% no condensante

Nota. Adaptado de “8801 SERVOHYDRAULIC FATIGUE TESTING SYSTEM”, por INSTRON (2024b).

Figura 13

Extensómetro INSTRON 2620 – 600

**Tabla 6**

Especificaciones técnicas del extensómetro INSTRON 2620 – 600

Parámetro	Valor
Longitud de extensión	12,5 mm
Longitud de calibración	25 mm
Rango de escala completa	± 5 mm
Deformación máxima	20 %
Rango de frecuencia	0 – 50 Hz

Nota. Adaptado de “2620-600 Series Dynamic Strain Gauge Extensometers”, por INSTRON (2024a).

Respecto a la evaluación dimensional con una apreciación de 0,02 mm se utilizará un calibrador Vernier que se logra contemplar en la **Figura 14**.

Figura 14

Calibrador Vernier



Para realizar la observación de la estructura micrográfica de las probetas, se debe encapsular las muestras en una mezcla de resina epóxica preparada con los insumos que se muestran en el **Anexo 1**. Adicionalmente se le debe dar un tratamiento previo que es el lijado y pulido de las mismas, es por esto que se utilizó el pulidor manual BUEHLER HANDIMETI STRIP GRINDER 39-1471 para hacer uso de las lijas de carburo de silicio con números de grano: 100, 240, 360, 400, 600, 1000, 1200, 1500, 2000 y 2500, además de franela, **Figura 15**. Para finalizar con el acabado espejo se usó la pulidora BUEHLER ECOMET I donde se colocó un paño de pulido fino y como abrasivo final se utilizó alúmina, se observa en la **Figura 16**, la mesa giratoria posee un diámetro de 20 cm y su voltaje es de 110 V.

Figura 15

Buehler Handimetl strip grinder 39-1471



Figura 16

Pulidora BUEHLER ECOMET I



Como paso final para la revelación de la microestructura se realizará el ataque con el reactivo denominado agua regia que está compuesto por 10 ml de ácido nítrico, 20 ml de ácido clorhídrico y 30 ml de agua. Para que la mezcla penetre en el material a estudiar se lo realizará por fricción haciendo uso de isopos y la base de una caja Petri como se presenta en la **Figura 17**.

Figura 17

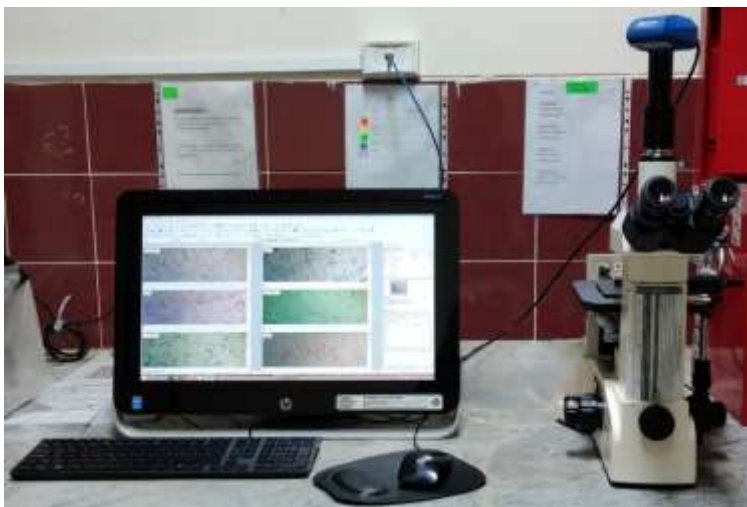
Agua regia



Se dio uso de un microscopio óptico de la marca Meiji Techno modelo IM7 200 junto con la cámara PaxCam3 divisado en la **Figura 18** y con la ayuda del programa PAX-it,

Figura 18

Microscopio óptico Meiji Techno IM7 200



Para realizar fotografías de las probetas a aumentos más pequeños se utilizó el estereomicroscopio ZEISS Stemi 305, cuya imagen se muestra en la **Figura 19** y las especificaciones técnicas en la **Tabla 7**.

Figura 19

ZEISS Stemi 305



Tabla 7

Especificaciones técnicas del estereomicroscopio ZEISS Stemi 305

Parámetro	Valor
Iluminación	Coaxial, LED
Tipo	Microscopio estereoscópico Greenough
Zoom	Continuo, manual, 0.8× a 4.0×
Resolución	200 Lp/mm (básico) / 400 Lp/mm (extendido)
Distancia de trabajo	110 mm (básico) / 43–185 mm (extendido)
Campo de visión	29 mm (básico) / 58 mm (extendido)
Interfaz	M52 (ópticas frontales), oculares d=30 mm

Nota. Adaptado de “*Stereo microscope Stemi 305 Instruction manual*”, por ZEISS (2022).

En el ámbito de la medición de la dureza se realizó de manera micro y macro, para esto se utilizó el medidor de micro dureza DUROLINE – M que se observa en la **Figura 20** y en la **Tabla 8** sus especificaciones técnicas . El segundo equipo para la medición de la dureza de tipo macro fue un durómetro industrial Service Diamond Hardness Tester por Louis Small modelo 8 BLP que se encuentra en la **Figura 21**.

Figura 20

Medidor de micro dureza DUROLINE – M



Tabla 8

Especificaciones técnicas del medidor de micro dureza DUROLINE – M

Parámetro	Valor
Mecanismo de torreta	Automático
Carga de ensayo	gf: 10, 25, 50, 100, 200, 300, 500, 1000
Tiempo de permanencia	5 – 99 segundos
Longitud máxima de medición	200 μm (En caso de 400x)
Unidad mínima de medición	0,1 μm
Escala de medición de dureza	HV, HK
Platina X-Y	Manual
Dimensiones	110 x 110 mm
Micrograduación mínima	1/100 mm
Movimiento máximo	25 x 25 mm
Exactitud	Cumple con: ASTM E-384, ISO 146, JJG260-91 y JIS B-7734

Nota. Adaptado de “*HARDNESS TESTING - DUROLINE - M/LV/V*”, por Metkon (n.d.).

Figura 21

Service Diamond Hardness Tester by Louis Small 8 BLP



Tabla 9

Especificaciones técnicas del Service Diamond Hardness Tester por Louis Small 8 BLP

Parámetro	Valor
Materiales metálicos	A.S.T.M. E 18-66
Pesas	40, 50, 60 kg
Escalas	A, B, C, D, E, F, G, H, K, L, M, P, R, S, V
Identadores	Diamante modelo Standard C y de bola de 1/16"
Yunques	2 planos y 2 en V
Cargas	10 – 150 kg
Unidad de medición	Dial mide la profundidad de penetración de 0.000080 pulgadas.

Nota. Adaptado de “*OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL - MACHINE FOR ROCKWELL HARDNESS TESTING*”, por Service Physical Testers (1980).

El ensayo de corrosión se realizó en base a la normativa ASTM A262, donde ASTM International (2015) establece que el ensayo A para ataque con ácido oxálico. Para este propósito fue necesario el utilizar fuentes de corriente continua que abastezcan la capacidad suficiente según las piezas a ensayar (las especificaciones técnicas se muestran en la **Tabla 10**), vasos de precipitación o de vidrio para los diferentes reactivos como son: ácido oxálico al 10 %, acetona y ácido nítrico al 30 %. Como parte de insumos adicionales son cables de prueba eléctricos tipo banana y cocodrilo, multímetro, termómetro digital, papel absorbente, agua caliente, además de las piezas que van a funcionar como cátodo y ánodos. Todo lo mencionado se puede observar en la **Figura 22** y en la **Figura 23**. Las probetas ensayadas fueron manufacturadas para cumplir con los requerimientos de la normativa, para ello se soldó las piezas con cautín, estaño y cloruro de zinc como se muestra en el Anexo 2.

Tabla 10

Especificaciones técnicas de la fuente de alimentación GW Instek modelo GPC-3030D

Parámetro	Valor
Salidas	2x (0-30V, 0-3A) 1x (Fija 5V, 3A)
Precisión	0,5 %
Potencia total	195 W
Pantalla	LED de 0,5 in y 3 ½ dígitos
Fuente de alimentación	AC 100V/120V/220V/240V $\pm$ 10%, 50/60Hz
Dimensiones (Ancho x Altura x Prof.)	255 x 125 x 346 mm

Nota. Se utilizaron dos fuentes conectadas en paralelo debido a que la corriente a suministrar era superior a 3A y 15 V. Adaptado de “GPC-3030D”, por GW INSTEK (n.d.).

Figura 22

Insumos principales para el ensayo de corrosión.



Nota. Fuente de poder, ánodo y cátodo, ácido oxálico, vaso de precipitación, cables y multímetro.

Figura 23

Insumos adicionales



Nota. Acetona, ácido nítrico, recipientes de vidrio, termómetro, agua caliente, papel absorbente.

Como parte adicional se realizó el corte de las piezas para extraer muestras y poder estudiarlas, este procedimiento se realizó con una cortadora láser para metales HN-1313 de la marca Hongniu ubicada en el laboratorio de Mecatrónica y Sistemas Dinámicos dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, su fotografía se ubica en la **Figura 24** y sus especificaciones en la **Tabla 11**.

Figura 24

Cortadora láser de metales HONGNIU HN-1313



Tabla 11

Especificaciones técnicas de la Cortadora láser Cortadora láser

Parámetro	Valor
Área de corte útil	X: 1300 mm
	Y: 1300 mm
Tipo de láser	Fibra
Potencia	1000 W – 3000 W
Precisión de posicionamiento	X: $\pm 0,03$ mm
	Y: $\pm 0,05$ mm
Precisión de reposicionamiento	$\pm 0,02$ mm
Materiales aplicables	Acero al carbono, acero inoxidable, aluminio, bronce y cobre
Cabezal de corte	Enfoque automático

Nota. Adaptado de la ficha técnica del equipo.

CAPÍTULO IV

Métodos y Procedimientos

Impresión, Desagregado y Sinterizado de piezas y probetas postprocesadas obtenidas a través de impresión 3D-FDM con filamentos de alta carga metálica de acero inoxidable 316L.

Impresión 3D con filamentos de alta carga metálica

Para llevar a cabo la impresión de cada pieza y probeta para cubrir los objetivos de control dimensional, calidad superficial, observación microestructural, porosidad, ensayos mecánicos y corrosivo, como primer paso consistió en su modelado CAD mediante el uso de softwares Inventor y SolidWorks cuyos formatos en STL se importaron luego al software ideaMaker y posteriormente se configuraron los parámetros de impresión adecuados para ambos filamentos: Ultrafuse y Virtual Foundry.

Impresión 3D con filamento Ultrafuse. Para imprimir las diferentes piezas y probetas con el filamento Ultrafuse, los parámetros fundamentales utilizados se muestran en la **Tabla 12**. Estos son adecuados conjuntamente con el uso de una balsa para evitar que la pieza se despegue de la cama.

Tabla 12

Parámetros base de impresión para el filamento de Ultrafuse

Parámetros Ultrafuse	Valor
Altura de capa	0,2 mm
Ancho de extrusión	0,3 mm
Balsa	0,3 mm (Fina)
Ángulo de relleno	45°
Velocidad de impresión	30 mm/s
Temperatura de cama	80 °C
Temperatura de extrusor izquierdo	240 °C
Densidad de relleno	100%
Patrón de relleno	Líneas

Enfriamiento	100%
--------------	------

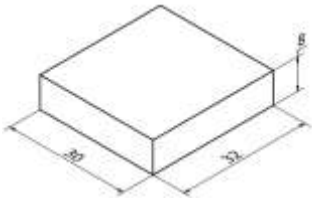
Nota. Los parámetros adicionales están detallados en el Anexo 3: Parámetros de impresión para filamento Ultrafuse. El tamaño recomendado de la boquilla es de 0,4 mm.

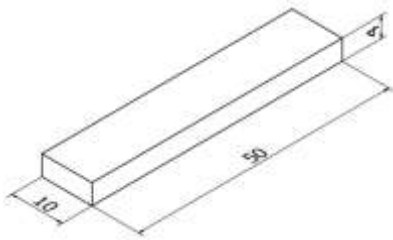
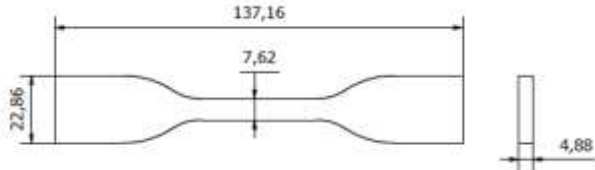
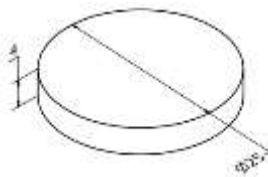
Conforme a trabajos previos y pruebas realizadas se determinó que la mejor manera para adherir las piezas a la cama, es una balsa, la cual fue elaborada por medio del procedimiento FDM con PLA blanco, esta se genera en el mismo software ideaMaker de forma automática y adaptativa a las piezas diseñadas (Cárdenas, 2025). Adicionalmente para aquellas piezas que posean longitudes grandes como son las probetas para los ensayos de tensión, se rocía a manera de pegamento el fijador usado comúnmente para el cabello.

Los parámetros anteriores fueron utilizados para realizar impresiones de varias piezas como se detalla en la **Tabla 13**. En esta se indica tipo, dimensiones, esquema y su designación, además del tamaño de boquilla utilizado. Las piezas y probetas serán sometidas al estudio de calidad superficial y dimensional como es el caso de uno de los prismas rectangulares diseñados por su gran volumen, otro tipo que son los prismas rectangulares pequeños y alargados, mientras que las probetas para ensayo de tensión y los discos se diseñaron adicionalmente para pruebas mecánicas y reológicas.

Tabla 13

Piezas impresas con parámetros base para el filamento de Ultrafuse

Tipo	Esquema	Boquilla [mm]	Piezas
Prisma rectangular volumétrico 32 x 30 x 8 mm		0,4	PRCU1 PRCU2 PRCU3 PRCU4

Prisma rectangular alargado 50 x 10 x 4 mm		0,6	PRU1 PRU2 PRU3 PRU4
Probeta para ensayo de tensión sobredimensionada al 20%		0,4	USFQ-1 USFQ-2 USFQ-3 USFQ-4 USFQ-5 USFQ-6
Disco $\varnothing$ 25 x 4 mm		0,6	DU1 DU2 DU3 DU4
Probeta para ensayo de tensión	Ver apartado de ensayo mecánico de tensión Figura 31	0,4	PU-1 PU-2 PU-3 PU-4 PU-5

Según las recomendaciones del fabricante que se mostraron en la **Figura 4** del estado del arte, se debe realizar sobredimensionamiento de las piezas en un 20% en los ejes X e Y, y un 24% en el eje Z por la contracción que sufren en el sinterizado, sin embargo, para una unificación se diseñará con un aumento de 20% en todos los ejes y posteriormente se estudió la contracción real. Este valor solo se aplicó a una parte de las probetas destinadas para ensayos de tensión, a las otras no se aplicó para ser ensayadas en verde.

Todos los diseños de las probetas en formato STL se realizaron el software Inventor, a excepción de las primeras probetas de tracción sobredimensionadas al 20% con los parámetros base del filamento de Ultrafuse que se desarrollaron en SolidWorks, pero al

observar que durante la exportación del CAD al programa ideaMaker se modificaban las medidas de las piezas diseñadas, se descartó el uso de SolidWorks.

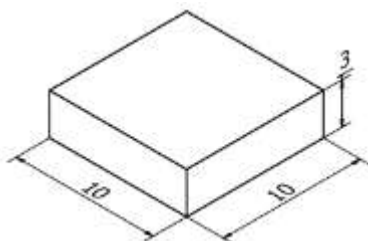
Las probetas destinadas para el ensayo de tensión fueron diseñadas conforme a la normativa aplicada ASTM D638, sin embargo, para el primer lote específicamente es que se utilizó el software de diseño SolidWorks lo que implicó una modificación en las medidas al importar al software de impresión ideaMaker que resultan ser ligeramente distintas a las diseñadas con la normativa. En estas figuras se aplicó el sobredimensionamiento del 20% cuyas medidas finales se encuentran en el correspondiente esquema de la **Tabla 13**.

Combinación de altura de capa y ancho de extrusión usados con el filamento

Ultrafuse para evaluar la calidad y facilidad de desprendimiento. Como punto de partida en base a los parámetros básicos se realizó cambios iterativos tanto de la altura de capa como ancho de extrusión además de la temperatura del extrusor izquierdo con el fin de evaluar la calidad superficial y despegue de la balsa, realizado para ciertas piezas que fueron los numerosos prismas cuadrangulares pequeños diseñados de ese tamaños para una fácil manipulación y estudio (**Figura 25**).

Figura 25

Esquema de prisma cuadrangular 10 x 10 x 3 mm



Con respecto a los prismas cuadrangulares de 10 x 10 x 3 mm se realizaron dieciséis (16) combinaciones en las cuales se varió únicamente la altura de capa y el ancho de extrusión en treinta y dos (32) prismas cuadrangulares de dimensiones 10 x 10 x 3 mm, es decir, dos probetas para cada combinación. Las alturas que se probaron fueron 0,1; 0,2; 0,3 y 0,4 mm, los

anchos a evaluar fueron 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,6 mm, esto se muestra en la **Tabla 14**, la nomenclatura de cada combinación se compone por la letra P de “prueba” seguida por un número de orden cronológico de su modificación. Esta metodología se realizó con el fin de evaluar de forma cualitativa el acabado de las piezas en verde en las caras superior y lateral por medio de calificaciones donde que aquella más baja significó un mejor acabado superficial. Para la evaluación se certificó que correspondan los parámetros de laminado con la estructura física de la pieza contando la cantidad de líneas en la cara lateral y el ancho de la cara superior, además de la definición de las líneas de impresión y que no posea muchos espacios entre estas.

Tabla 14

Combinaciones de parámetros para prismas cuadrangulares 10 x 10 x 3 mm

Denominación	Altura de capa [mm]	Ancho de extrusión [mm]
P1	0,1	0,2
P2	0,1	0,4
P3	0,1	0,6
P4	0,1	0,3
P5	0,3	0,3
P6	0,4	0,3
P7	0,2	0,3
P8	0,2	0,2
P9	0,2	0,4
P10	0,4	0,2
P11	0,4	0,4
P12	0,1	0,1
P13	0,4	0,1
P14	0,3	0,6
P15	0,4	0,6
P16	0,3	0,1

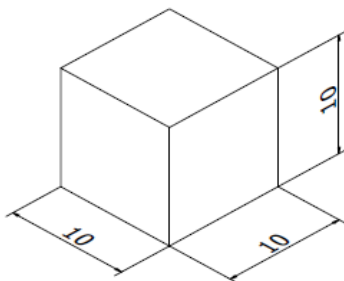
En base a los mejor calificados cualitativamente, se fabricó probetas para someterlas al ensayo de tensión utilizando esos parámetros de impresión que tendrán el mismo nombre que

llevaron las combinaciones, además de complementar las combinaciones anteriores con las faltantes como es el caso de las pruebas P17 y P18.

Como parte de investigación se realizó la impresión de cubos 10 x 10 x 10 mm (**Figura 26**) los cuales fueron generados con los parámetros base de impresión para el filamento de The Virtual Foundry mostrados en el apartado de impresiones para ese filamento.

Figura 26

Esquema de cubos de 10 x 10 x 10 mm



Todas las probetas cuyos parámetros no son los mismos a los descritos como fundamentales, se presentan en la **Tabla 15** junto con los cambios realizados y la denominación de las piezas, exceptuando los prismas rectangulares descritos anteriormente.

Tabla 15

Probetas de filamento Ultrafuse y sus parámetros de impresión modificados

Tipo	Parámetros modificados	Piezas
Cubo 10 x 10 x 10 mm	Parámetros base de impresión para Virtual Foundry de la Tabla 16 Boquilla: 0,8 mm	E5.1
		E5.2
		E5.3
		E5.4
		E5.5
		E5.6
Cubo 10 x 10 x 10 mm	Parámetros base de impresión para Virtual Foundry de la Tabla 16 Boquilla: 0,4 mm	E5.7
		E5.8

Probeta para tensión al 20% con P1	Altura de capa: 0,1 mm	P1U-1
	Ancho de extrusión: 0,2 mm	P1U-2
	Boquilla: 0,4 mm	P1U-3
		P1U-4
Probeta para tensión al 20% con P2	Altura de capa: 0,1 mm	P2U-1
	Ancho de extrusión: 0,4 mm	P2U-2
	Boquilla: 0,4 mm	P2U-3
		P2U-4
		P2U-5
		P2U-6
Probeta para tensión al 20% con P3	Altura de capa: 0,1 mm	P3U-1
	Ancho de extrusión: 0,6 mm	P3U-2
	Boquilla: 0,4 mm	P3U-3
		P3U-4
Probeta para tensión al 20% con P17	Altura de capa: 0,3 mm	P17U-1
	Ancho de extrusión: 0,2 mm	P17U-2
	Boquilla: 0,4 mm	P17U-3
		P17U-4
		P17U-5
Probeta para tensión al 20% con P18	Altura de capa: 0,3 mm	P18U-1
	Ancho de extrusión: 0,4 mm	P18U-2
	Boquilla: 0,4 mm	P18U-3
		P18U-4
		P18U-6
Probeta para tensión al 20% con P18	Altura de capa: 0,3 mm	P18U-5
	Ancho de extrusión: 0,4 mm	P18U-7
	Sin carcasa exterior	P18U-8
	Boquilla: 0,4 mm	P18U-9

Nota. Para las probetas P18 se examinaron nueve probetas (cinco con una combinación y cuatro sin carcasa). Los números se conservan de esta manera por organización de los datos recogidos.

En el caso de algunas de las probetas realizadas con los parámetros de la prueba P17 se aumentó la temperatura del extrusor izquierdo con el fin de mejorar el despegue de la balsa. Para pocas probetas generadas con los parámetros de la prueba P18 se eliminó la carcasa debido a la constante formación de ampollas después del proceso de sinterizado. En todas estas probetas se aplicó el sobredimensionamiento del 20% en todos los ejes.

Impresión 3D con filamento Virtual Foundry. Para la impresión con el filamento Virtual Foundry se utilizó los parámetros mejores puntuados de la investigación de Lokesha (2019) "Metal Filament 3D Printing of SS316L-Focusing on the printing process" publicada en la página del fabricante, cuyos parámetros fundamentales se muestran en la **Tabla 16**. El filamento no es compatible con el uso de balsa.

Tabla 16

Parámetros base de impresión para el filamento de The Virtual Foundry.

Parámetros Virtual Foundry	Valor
Altura de capa	0,1 mm
Ancho de extrusión	0,6 mm
Balsa	No
Ángulo de relleno	90°
Velocidad de impresión	50 mm/s
Temperatura de cama	55 °C
Temperatura de extrusor izquierdo	235 °C
Densidad de relleno	100%
Patrón de relleno	Rectilíneo
Enfriamiento	100%

Nota. Los parámetros adicionales se encuentran en el Anexo 4. El tamaño recomendado de la boquilla es de 0,6 mm.

Este filamento a temperatura ambiente resulta ser muy quebradizo por lo que fue necesario precalentarlo por medio del calentador de filamento a una temperatura de 60°C, esto con el objetivo de reblandecerlo y darle la flexibilidad necesaria durante el movimiento del

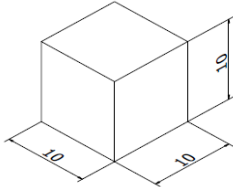
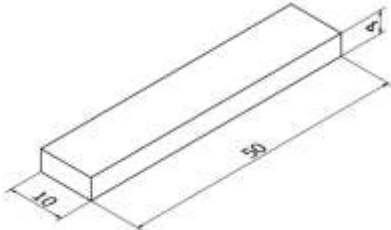
extrusor. El carrete del filamento y el aparato, fueron adaptados mecánicamente para mejorar el manejo del material base por medio de una estructura elaborada con piezas de PLA y tubería PVC mostrada en la parte de materiales y equipos.

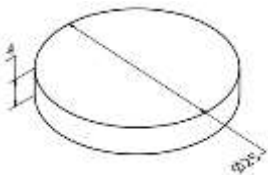
De la misma forma que posee ese comportamiento en forma de filamento, lo poseen las piezas impresas por lo que no se utilizó balsa porque durante el desprendimiento de la misma, parte de la pieza resultaba fracturada. La solución aplicada fue la de imprimir directamente en la cama gris metálica con la lámina PEI previamente colocada además de colocar a manera de pegamento el fijador comúnmente usado para cabello.

Con el uso de los valores de la **Tabla 16** se imprimieron piezas como se detalla en la **Tabla 17**. Las formas de la tabla se eligieron para comparar los resultados con aquellas piezas impresas con el filamento Ultrafuse y a su vez estudiar el acabado superficial en verde, las dimensiones y aspectos del postprocesado. Se adicionó una pieza ósea para realizar el estudio de una geometría irregular.

Tabla 17

Piezas impresas con parámetros base para el filamento de Virtual Foundry

Denominación	Esquema	Boquilla [mm]	Piezas
Cubo 10 x 10 x 10 mm		0,8	E4.1
			E4.2
			E4.3
			E4.4
			E4.5
Prisma rectangular 50 x 10 x 4 mm		0,6	PRV1
			PRV2
			PRV3
			PRV4
			PRV5
			PRV6
			PRV9

			PRV11
			PRV13
Probeta para ensayo de tracción	Ver apartado de ensayo mecánico de tensión	0,6	TV-1 TV-2 TV-3 TV-4
Probeta para ensayo de tracción sobredimensionada al 10%	Ver apartado de ensayo mecánico de tensión	0,6	TV-5 TV-6
Disco $\varnothing$ 25 x 4 mm		0,6	DV1 DV2 DV3 DV4
Hueso húmero		0,6	HUV

Nota. Para los prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm con estos parámetros se realizaron nueve piezas, los números faltantes fueron piezas que utilizaron una configuración distinta que se mostrará a continuación, la razón es por el orden de impresión y sinterización.

Todos los diseños de las probetas en formato CAD se realizaron con el software Autodesk Inventor Professional 2024.

Según se mencionó en el estado del arte de la caracterización dimensional para el filamento de The Virtual Foundry, se debe realizar sobredimensionamiento de las piezas en un 10% en los ejes X, Y y Z. Este valor se aplicó únicamente en las figuras destinadas a ensayos de tensión.

A partir de los parámetros de impresión base del filamento de Virtual Foundry se realizaron varios cambios adicionales con la finalidad de observar cambios en el acabado superficial ya sea en verde o en metal, lo mencionado se muestra en la **Tabla 18**.

Tabla 18

Probetas impresas con filamento de Virtual Foundry y sus parámetros de impresión

Denominación	Parámetros modificados	Piezas
Prisma rectangular 50 x 10 x 4 mm	Ángulo de relleno: 45° Boquilla: 0,6 mm	PRV7
		PRV8
		PRV10
		PRV12
Probeta para ensayo de tracción sobredimensionada al 10%	Temperatura de extrusor izquierdo: 210°C Boquilla: 0,6 mm	TV-7
		TV-8

Desagregado y Sinterizado de piezas y probetas en verde con filamentos Ultrafuse y Virtual Foundry

La programación de los ciclos térmicos se ingresó en el interfaz de control del horno tubular con sus respectivas nomenclaturas, donde las variables operativas fueron la temperatura y el tiempo. Como diseño experimental se ejecutó los ciclos bajo dos condiciones atmosféricas, a presión atmosférica estándar cuya programación fue estructurada tomando como modelo los ciclos establecidos por el fabricante The Virtual Foundry (The Virtual Foundry, 2026a), y bajo una atmósfera de vacío donde la programación fue establecida bajo las directrices del docente a cargo de la investigación.

La ejecución de los procedimientos térmicos requirió del uso de crisoles de acero inoxidable AISI 304 y alúmina a manera de interfaz física para alojar los especímenes dentro del horno. Una de las maneras para prevenir la deformación de las piezas durante el desagregado es el integrar un lecho de polvo refractario que cubra a las mismas.

En el caso de la operación al ambiente se usó el programa B-VF-2 para el desagregado como se observa en la **Tabla 19** y su respectiva gráfica en la **Figura 27**, para el sinterizado los programas HLT-VF-3, HLT-VF-4, HLT-VF-5 detallados en la **Tabla 20** y las gráficas en la **Figura 28**.

Tabla 19

Programación para desagregado en atmósfera estándar

Programa	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
B-VF-2	0	20
	120	235
	240	235
	360	460
	480	460
	660	20

Figura 27

Gráfica Temperatura – Tiempo del programa de desagregado al ambiente

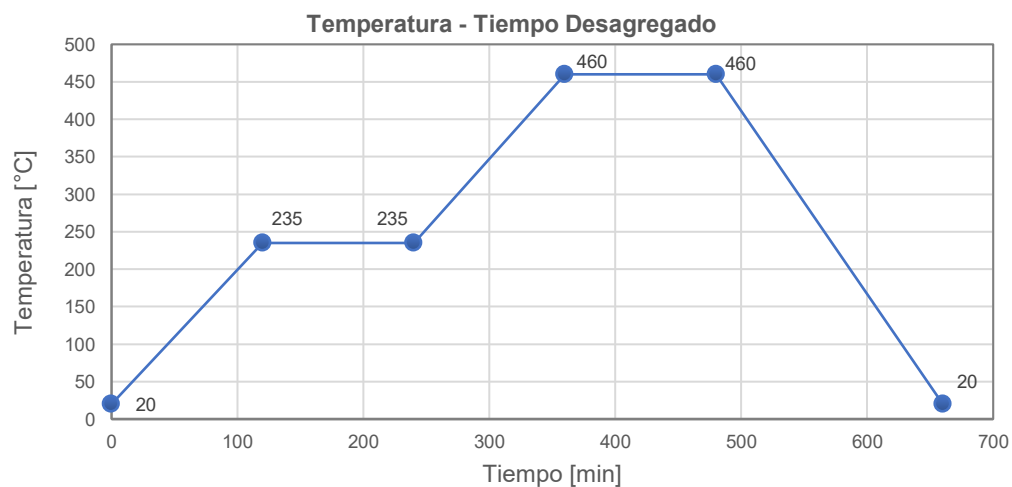


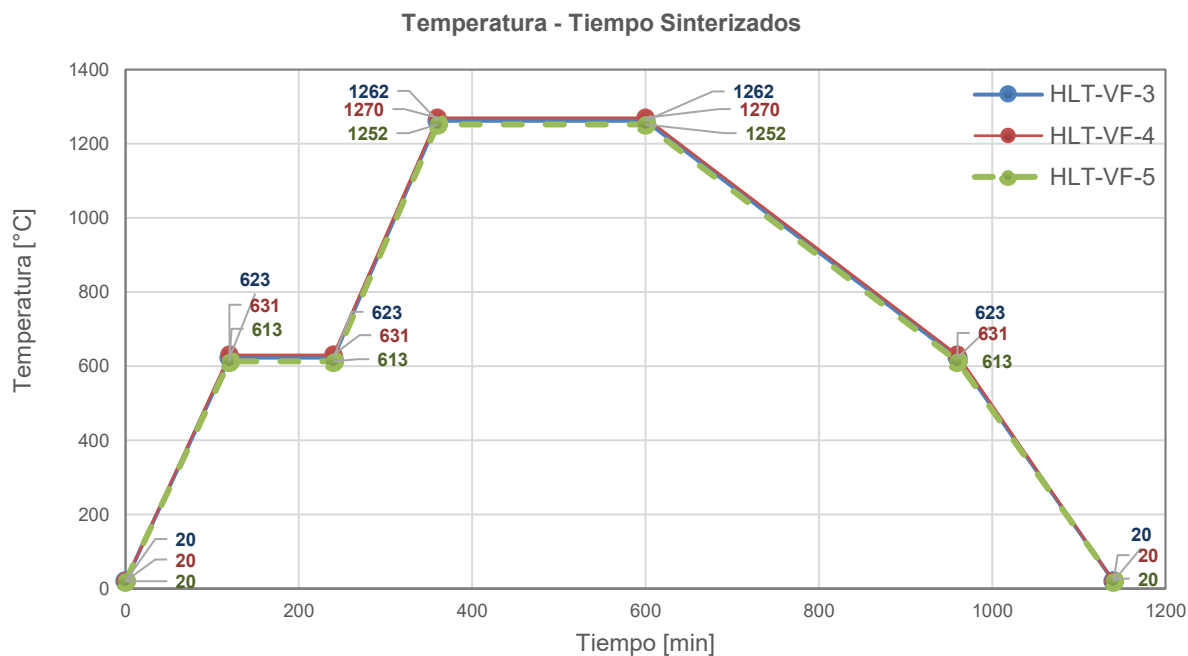
Tabla 20

Programación para sinterizado en atmósfera estándar

Programa	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
HLT-VF-3	0	20
	120	623
	240	623
	360	1262
	600	1262
	960	623
	1140	20
HLT-VF-4	0	20
	120	631
	240	631
	360	1270
	600	1270
	960	631
	1140	20
HLT-VF-5	0	20
	120	613
	240	613
	360	1252
	600	1252
	960	613
	1140	20

Figura 28

Gráfica comparativa de Temperatura – Tiempo de los programas de sinterizado al ambiente



Para los ciclos realizados al vacío, el desagregado operó bajo los programas D-U-1, D-U-2 y D-U-3 cuyos valores se divisan en la **Tabla 21** y su representación gráfica se encuentra en la **Figura 29**, para el sinterizado los programas S-UF-1, S-UF-2 y S-UF-3 detallados en la y las gráficas en la **Figura 30**. La intención para experimentar en este ambiente fue la de **Tabla 22** reducir la interacción entre el oxígeno y las piezas reduciendo por completo su oxidación para que de esta forma no altere sus propiedades y por ende su comportamiento en la realización de los ensayos.

Tabla 21

Programación para desagregado en vacío

Programa	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
D-U-1	0	20
	120	205
	210	205

D-U-2	330	430
	420	430
	660	20
	0	20
	105	205
	210	205
	315	430
	420	430
D-U-3	660	20
	0	20
	105	205
	210	205
	375	430
	480	430
	720	20

Figura 29

Gráfica comparativa de Temperatura – Tiempo de los programas de desagregado en vacío

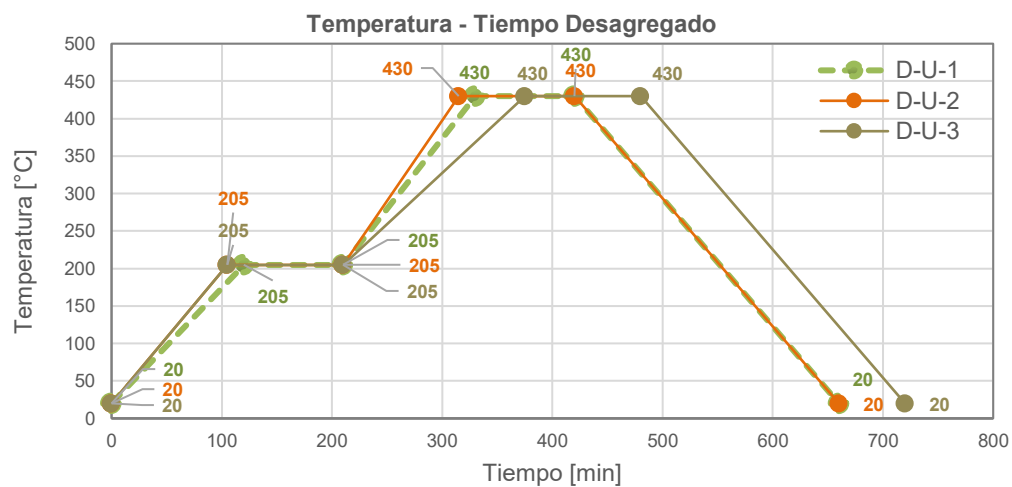


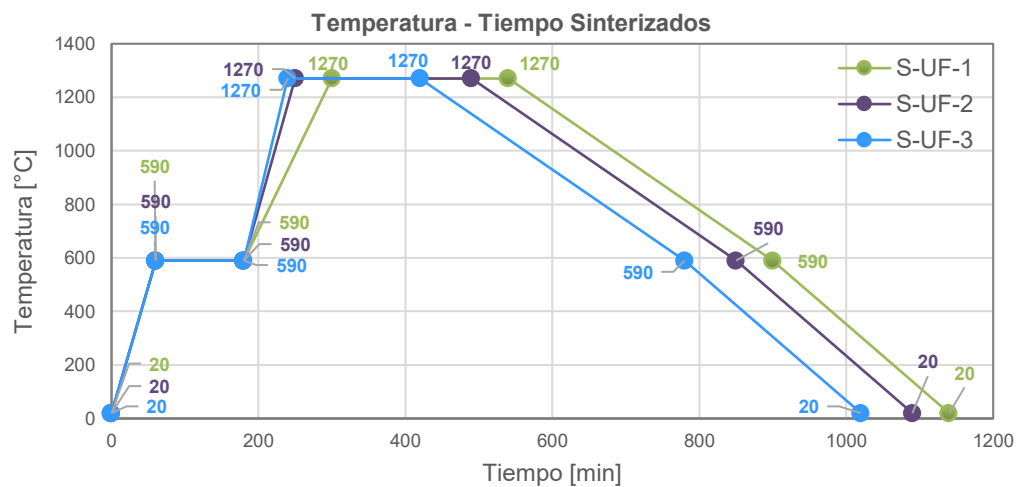
Tabla 22

Programación para sinterizado en vacío

Programa	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
S-UF-1	0	20
	60	590
	180	590
	300	1270
	540	1270
	900	590
	1140	20
S-UF-2	0	20
	60	590
	180	590
	250	1270
	490	1270
	850	590
	1090	20
S-UF-3	0	20
	60	590
	180	590
	240	1270
	420	1270
	780	590
	1020	20

Figura 30

Gráfica comparativa de Temperatura – Tiempo de los programas de sinterizado en vacío



Para resumir las consideraciones tomadas, ciclos aplicados y piezas utilizadas de ambos filamentos, se presenta la **Tabla 23**.

Tabla 23

Ciclos de desagregado y sinterizado para las piezas impresas mediante FFF.

Probetas Ultrafuse	Probetas Virtual Foundry	Ciclos	Consideraciones
E5.3, 0E5.4	E4.3, E4.4	B-VF-2 HLT-VF-3	Crisol de acero para desagregado y de alúmina para sinterizado Con polvos
PRU1 PRU2	PRV1 PRV2	B-VF-2 HLT-VF-4	Crisol de alúmina para desagregado y sinterizado Con polvos

-	PRV5 PRV6 PRV7 PRV8	B-VF-2 HLT-VF-5	Crisol de alúmina para desagregado y sinterizado Con polvos
-	PRV9 PRV10	B-VF-2 HLT-VF-3	Crisol de alúmina para desagregado y sinterizado Con polvos
-	TV 5 HUV	B-VF-2 HLT-VF-3	Crisol de alúmina para desagregado y sinterizado Con polvos
USFQ1 USFQ3 USFQ6	-	D-U-1 S-UF-1	Crisol de alúmina para desagregado y sinterizado
P2U-1	-	D-U-2 S-UF-2	Sin crisol
P18U-2	-	D-U-3 S-U-3	Crisol de acero para desagregado y sinterizado No polvos
P2U-3 P18U-5	-	D-U-3 S-U-3	Crisol de alúmina para desagregado y sinterizado
P18U-6 P18U-7	-	D-U-3 S-U-3	Crisol de alúmina para

			desagregado y sinterizado
P18U-8	-	D-U-3 S-U-3	Crisol de alúmina para desagregado y sinterizado
P2U-2 P2U-4	-	D-U-3 S-U-3	Crisol de alúmina para desagregado y sinterizado
P2U-5 P2U-6	-	D-U-3 S-U-3	Crisol de alúmina para desagregado y sinterizado
P17U-3 P17U-4	-	D-U-3 S-U-3	Crisol de alúmina para desagregado y sinterizado
P17U-5	-	D-U-3 S-U-3	Crisol de alúmina para desagregado y sinterizado
Cubos E5.7, E5.8	-	D-U-3 S-U-3	Crisol de alúmina para desagregado y sinterizado

Caracterización Mecánica

Ensayos de Tensión

Se utilizó la normativa para ensayos de tensión para plásticos ASTM D 638 – 03 la geometría tipo IV (**Figura 31**), la elección es debido a que se trata de un elemento compuesto por polímero no rígido en su estado en verde y para posteriormente en su estado en metal sean

comparables los resultados, se utilizó el equipo INSTRON 8801, se ensayaron las probetas de ambos filamentos, una parte de ellas aplicando el sobredimensionamiento del 20% (**Figura 32**) y otra con sobredimensionamiento del 10% (**Figura 33**), ambos destinados sometidos al sinterizado.

Figura 31

Probeta para ensayo de tensión según normativa ASTM D 638 – 03, tipo IV

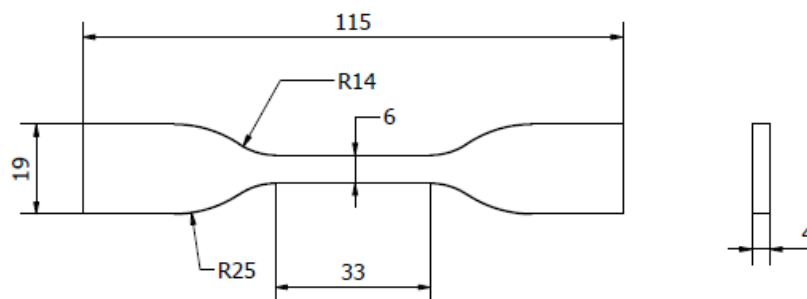


Figura 32

Probeta para ensayo de tensión según normativa ASTM D 638 – 03, tipo IV, sobredimensionadas al 20%

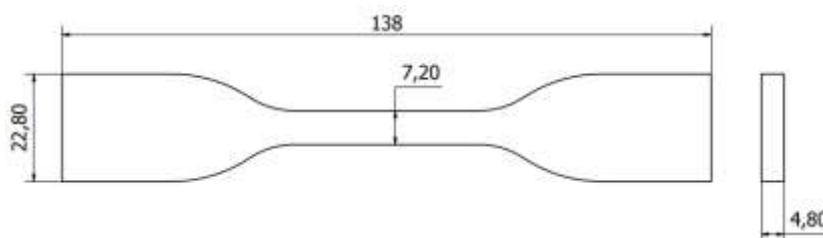
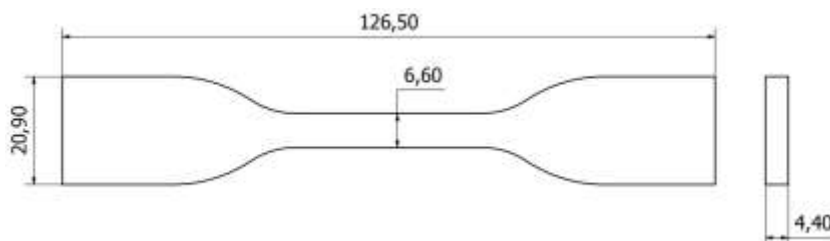


Figura 33

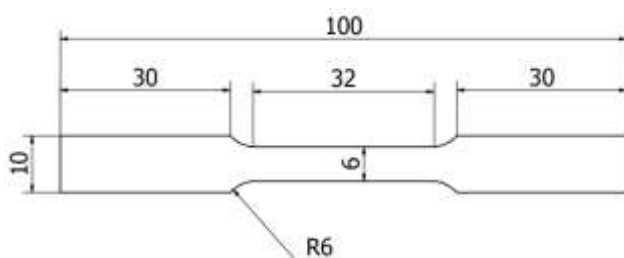
Probetas para ensayo de tensión según normativa ASTM D 638 – 03, tipo IV, sobredimensionadas al 10%



Complementariamente se ensayó en tres probetas del material base (acero inoxidable 316L) conforme los lineamientos de la ASTM E8, el espécimen de tamaño inferior debido a que es un material metálico compacto, las medidas se observan en la **Figura 34**, estas fueron perfiladas mediante corte láser, parámetros de corte en el **Anexo 5**.

Figura 34

Probeta para ensayo de tensión según normativa ASTM E8, espécimen de tamaño inferior



Para la colocación de las piezas en el equipo se realizó el trazado de marcas en la superficie de acuerdo con las dimensiones descritas en las respectivas normas, adicionalmente para el registro del alargamiento se hizo uso del extensómetro INSTRON 2620 – 600 y la velocidad aplicada fue entre 1 a 5 mm/min. Las probetas ensayadas se muestran en la **Tabla 24**.

Tabla 24

Probetas sometidas al ensayo de tensión

Probetas	Observaciones
USFQ1	Sinterizadas Ultrafuse
USFQ2	
USFQ3	
PU-1	Verde Ultrafuse
PU-2	
PU-3	
PU-4	
PU-5	
P2U-2	Sinterizadas

P2U-3	Ultrafuse
P2U-4	
P2U-5	
P17U-3	Sinterizadas
P17U-4	Ultrafuse
P17U-5	
P18U-5	
P18U-6	Sinterizadas
P18U-7	Ultrafuse
P18U-8	
TV-1	
TV-2	Verde
TV-3	Virtual Foundry
TV-4	
Material base 316L	-
N°1, N°2, N°3	

Ensayo de dureza para probetas sinterizadas

Se midió la dureza en los cubos y en las probetas de tensión sinterizadas, la medición se hizo tanto a nivel de microdureza como a nivel de macrodureza a fin de observar el comportamiento global del sinterizado y así como al interior de un solo hilo depositado por la boquilla de impresión. Los cubos se eligieron porque al seccionarlos mostraron una estructura muy compacta y libre de defectos superficiales, mientras que en el caso de las probetas de tracción se eligieron muestras donde era muy notorio los hilos sinterizados producto de la impresión 3D. Las muestras de los cubos fueron cortadas con aserrado fino mientras que algunas de las de tracción mediante corte láser. Para todas se realizó el acondicionamiento superficial adecuado con desbaste hasta alcanzar la lija de grano 2000 para nivelar y revelar el acabado del proceso. Las piezas y probetas utilizadas se muestran en la **Tabla 25** y gráficamente en Anexo 6.

Tabla 25

Probetas sometidas al ensayo de dureza enfoques micro y macro

Probetas	Consideraciones técnicas
Muestra 1 de USFQ-1	Microdureza: HRB
Muestra 2 USFQ-1	Microdureza: HRB
P2U-1	Microdureza: HRB
P18U-2	Microdureza: HRB
Sección de E4.3	Microdureza: HRC
Sección de E4.4	Microdureza: HRC

Microdureza. Como primer enfoque se estudió a escala microscópica utilizando el equipo DUROLINE – M equipado con un indentador de diamante Vickers certificado por ISO/DaKKs. La dureza Vickers se midió en las piezas sinterizadas usando como referencia la norma ISO 6507/ASTM E384 (Zwick Roell, n.d.).

Durante el procedimiento se colocó las piezas en la platina de soporte, se enfocó el área a ensayar evitando imperfecciones microestructurales como poros y espacios entre las líneas de impresión, se determina los parámetros a 500 gf de carga con tiempo de permanencia de cinco segundos, se observa la huella bajo el microscopio mediante un objetivo de 100x y finalmente la máquina toma la lectura de las diagonales de la huella para arrojar la medida de la dureza.

Para determinar el perfil de dureza de manera homogénea, se ejecutó un total de nueve huellas por probeta que se distribuyeron en tres zonas distintas de la superficie, cada zona con tres huellas continuas y alineadas con la separación pertinente indicada en la norma para impedir la alteración de los valores.

Macro dureza. Por otro lado la caracterización desde la perspectiva macroscópica se ejecutó por medio del durómetro 8 BLP. La ejecución inicia con la colocación del indentador y la

carga dependiendo de la dureza Rockwell a medir, en este estudio se utilizó las escalas B (bola de 1/16 in con 100 kgf) y C (cono de diamante con 150 kgf) debido a que durante la ejecución del ensayo ciertas piezas resultaban con una medida cercana a cero en la escala B.

Posteriormente se ajusta el indentador hasta que ingrese muy superficialmente en la pieza, se encera y se aplica la carga, al retirar la misma se observa la medición.

Se realizaron tres huellas en la superficie de las piezas en distintas zonas tomando en consideración la separación mínima establecida por la norma ISO 6508/ASTM E18 (ZwickRoell, n.d.). para obtener un valor promedio representativo y comparativo a la dureza del material laminado 316L.

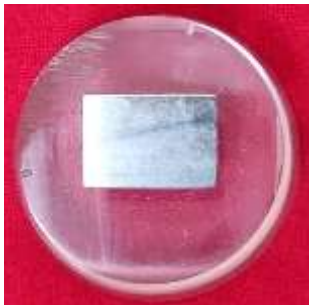
Para la observación de las huellas se utilizó los microscopios Meiji Techno IM7 200 y ZEISS Stemi 305.

Caracterización Microscópica

La fase de la caracterización microestructural se basó en el análisis de porciones de una pieza sinterizada para realizar un contraste con muestras del material base en presentación de plancha de acero inoxidable 316L de 3 mm de espesor y en fragmentos de varilla para soldadura ER316L de 3/32" (2,4 mm). El detalle se encuentra en la **Tabla 26**.

Tabla 26

Muestras analizadas microestructuralmente

Probetas	Imagen
Muestra de plancha de acero inoxidable 316L	

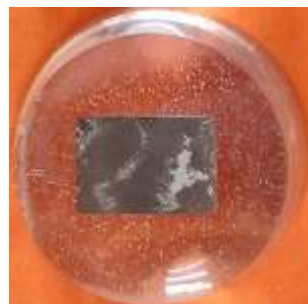
Varilla de soldadura ER316L



Muestra 3 de USFQ-1



Muestra 4 de USFQ-1



Previo a la observación de la estructura, se preparó previamente las piezas como establece en la norma ASTM E3. Se extrajo una pequeña muestra del material de estudio, para encapsularla en una mezcla de resina epóxica y someterla a un pulido progresivo con las lijas de carburo de silicio haciendo giros de 90° para pasar de una lija de menor grano a una de mayor y finalmente se pulió con un paño de pulido fino aplicando agua y alúmina para eliminar totalmente las líneas de lijado. El paso final para revelar la estructura microscópica fue un ataque químico con agua regia por aproximadamente cinco minutos por medio de la fricción isopo – pieza y se enjuagó con abundante agua. Es así que se analizará utilizando el microscopio Meiji Techno IM7 200 con los aumentos: 50x, 100x, 200x, 500x y 1000x.

Medición de porosidad

Adicionalmente se realizó el estudio de la porosidad de las probetas, para esto se utilizó aquellas que dieron un mejor resultado de sinterización debido a una excelente unión de capas, tomando muestras representativas de cada filamento, los cubos E4.4 y E5.5.

Para realizar un análisis interno se utilizó una porción media de cada una. Con el fin de obtener una buena calidad de imagen, estas fueron encapsuladas en una matriz de resina epóxica para realizar el desbaste con las lijas de carburo de silicio mencionadas en la sección de materiales y equipos y se las sometió a pulido con el paño de pulido.

Para el procesamiento de las pieza se siguió los lineamientos de la norma ASTM E1245-03 (ASTM International, 2016a), por lo que se obtuvo aproximadamente veinte (20) imágenes con un barrido en forma de líneas continuas mediante el microscopio Meiji Techno IM7 200, finalmente se realizará el procesamiento de las mismas utilizando el software ImageJ, que al calibrarlo arrojará el valor de porosidad volumétrica porcentual. De todos los valores obtenidos se calcula el promedio y ese será el porcentaje de porosidad en la pieza.

Caracterización Dimensional

Como se estableció previamente, la necesidad de estudiar la morfología de las piezas postprocesadas surge debido a estas son expuestas a gradientes térmicos extremos, provocando transformaciones físicas y volumétricas irreversibles. Por esto la evaluación se la hará de manera cualitativa por medio de la inspección visual y cuantitativa con la medición de las dimensiones más representativas.

En la inspección visual se analizó la curvatura, acabado superficial, formación de ampollas, visibilidad de líneas de impresión, color y forma tanto de probetas en verde como sinterizadas y ocasionalmente en marrón que han sido producidas mediante FDM.

A manera de garantizar la precisión de las dimensiones, cada cota fue medida tres veces con el uso del calibrador pie de rey para posteriormente determinar su promedio, en el caso de las medidas de las probetas en sinterizado y desagregado, no se realiza el promedio

debido a la diferencia de condiciones y ciclos. Estos parámetros tuvieron variaciones según la morfología de la pieza, en el caso de las probetas prismáticas se tomó el largo, ancho y profundidad; en los discos se evaluó el diámetro y espesor; y para las probetas destinadas al ensayo de tensión se tomó el ancho de la sección de agarre, la longitud, el ancho de la sección reducida y el espesor.

Para el cálculo del porcentaje de reducción, se utiliza los valores promedio de las piezas en verde, valores de medidas en desagregado y medidas en sinterizadas para observar un aumento o disminución dimensional de las piezas:

$$\%D = \frac{DV - DS}{DV} * 100\% \quad (1)$$

Donde:

%D = Porcentaje dimensional

DV = Dimensión en verde o de diseño

DS = Dimensión sinterizada

Los resultados obtenidos permitirán analizar brevemente el cambio dimensional tras el sinterizado mediante el signo que los acompañe, un signo negativo representa aumento dimensional que es el resultado de que la medida en verde o de diseño es menor a la sinterizada, o un signo positivo representa disminución dimensional que se explica porque la medida en verde o de diseño es mayor a la sinterizada.

Caracterización Corrosiva

Usando como guía la norma ASTM A262, se seleccionó el ensayo A: "Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels", debido a ser la vía más fácil y rápida para detectar la susceptibilidad intergranular tanto del material base como aquellas probetas producidas mediante FFF y expuestas a ciclos de temperatura. En esta norma se somete a los aceros inoxidable austeníticos a un medio corrosivo ácido utilizando electricidad para acelerar la corrosión frente al ácido oxálico, evaluando si ha sufrido sensibilización

La normativa ASTM 262 establece que la pinza de sujeción del ánodo no debe sumergirse en el ácido oxálico, por lo que se soldó las piezas sinterizada y las probetas del material base, a retazos de varilla de soldadura ER316L de 10 mm y 3/32" (2,4 mm) para poder sumergir totalmente las piezas y probetas y obtener un ataque completo. La soldadura fue realizada con cautín, estaño y cloruro de zinc (para la soldabilidad de aceros) ya que abordarlo por otro modo puede modificar la estructura de los metales su estudio al formar la zona afectada por el calor y podría afectar a la mayor parte de la pieza tomando en cuenta que es una porción pequeña, en este caso de aproximadamente 15 x 10 mm y 3 mm de espesor puesto a que varía en los fragmentos sinterizados (dos probetas) y en aquellos extraídos del material base (dos probetas) como se muestra en la **Figura 35**. Las probetas sinterizadas fueron: Las muestras 3 y 4 de probeta USFQ-1, las mismas utilizadas para la el análisis microestructural.

Figura 35

Probetas destinadas al ensayo de corrosión



Para establecer la magnitud de la corriente suministrada por las fuentes de alimentación GW Instek GPC-3030D al circuito esquematizado en la **Figura 36**, se cuantifica con anterioridad el área total de la pieza en cm^2 lo que permitirá resolver la fórmula:

$$C = \frac{1 A}{\text{cm}^2} \quad (2)$$

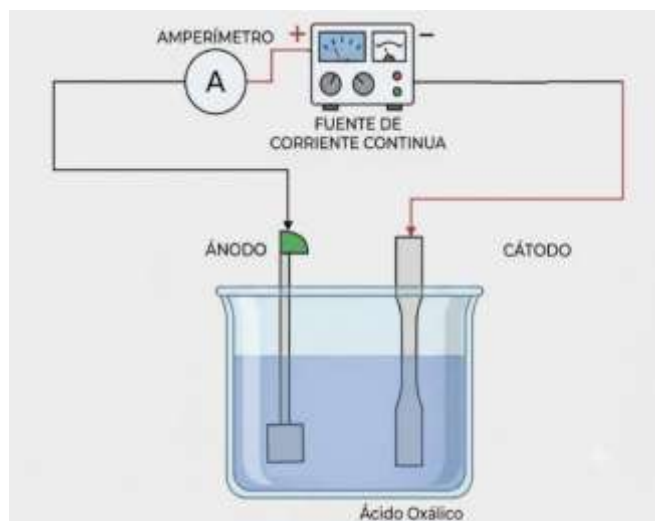
Donde:

C = Corriente

A = Amperios

Figura 36

Esquema del circuito basado en los lineamientos de la práctica A de la normativa ASTM A262



CAPÍTULO V

Resultados y Análisis.

Cambio dimensional de piezas y probetas impresas en 3D

A fin de establecer la variación dimensional de las diferentes probetas y piezas se usa el sistema referencial cartesiano integrado en la impresora donde el eje X se relaciona con el plano longitudinal, el eje Y con el plano transversal y el eje Z con el espesor conforme con la ilustración que sigue (**Figura 37**).

Figura 37

Orientación espacial y sistema de coordenadas de las probetas



Piezas impresas con el filamento Ultrafuse

Cambio dimensional de piezas en verde. En esta sección se determinó el cambio dimensional y la calidad superficial en verde de tres tipos de piezas y probetas: prismas rectangulares, discos y probetas de tensión, a fin de cubrir diversas formas y dimensiones. En las tablas que siguen, conjuntamente a los resultados dimensionales se muestra el modelo CAD, la impresión de piezas y probetas, además de un análisis cualitativo de la calidad de impresión.

Así para los prismas rectangulares volumétricos de 32 x 30 x 8 mm corresponde la **Figura 38**, **Tabla 27** y la **Figura 39**.

Figura 38

Esquema de medidas de prisma rectangular volumétrico de 32 x 30 x 8 mm (PRCU)

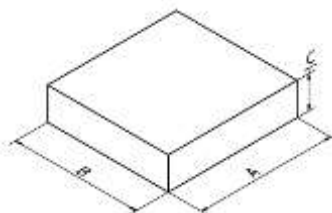


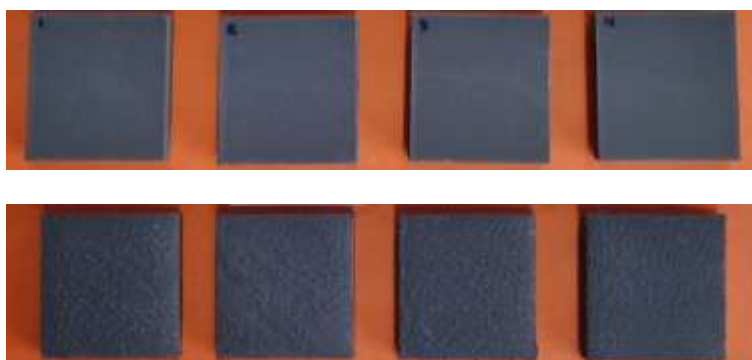
Tabla 27

Medidas de prismas cuadrangulares 32 x 30 x 8 mm en verde (PRCU)

Probetas	A [mm]	B [mm]	C [mm]
PRCU1	32,09	30,07	8,21
PRCU2	31,99	30,13	8,12
PRCU3	32,13	30,13	8,17
PRCU4	32,09	30,18	8,21
Promedio	32,08	30,13	8,18
Variación dimensional de verdes respecto al diseño [%]			
	-0,23	-0,42	-2,25

Figura 39

Fotografías de prismas cuadrangulares volumétricos 32 x 30 x 8 mm en verde (PRCU)





Nota. Caras superiores, caras inferiores y cara lateral, de arriba hacia abajo.

La comparación de las medidas arroja que las probetas experimentaron un aumento dimensional tras la impresión en bajos porcentajes, en el espesor (C) siendo el más afectado obteniendo los datos de aumento dimensional de 0,23% en eje X, 0,42% en eje Y y 2,25% en el eje Z. En cuando a la calidad ofrece un muy buen acabado superior, líneas de impresión unidas, sin presencia de agujeros o discontinuidades, buen acabado inferior, presenta ligera curvatura convexa y lateralmente está muy marcada la geometría de la balsa, geometría definida.

Para los discos de $\varnothing 25 \times 4$ mm corresponde la **Figura 40**, la **Tabla 28** y la **Figura 41**.

Figura 40

Esquema de medidas de discos $\varnothing 25 \times 4$ mm designados como “DU”

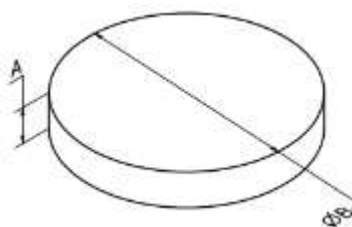


Tabla 28

Medidas de discos $\varnothing 25 \times 4$ mm en verde designados como “DU”

Probetas	A [mm]	B [mm]
DU1	4,21	25,27
DU2	4,23	25,39
DU3	4,21	25,32
DU4	4,17	25,15
Promedio	4,21	25,28
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]		

-5,17	-1,13
-------	-------

Figura 41

Fotografías de discos $\varnothing 25 \times 4$ mm en verde designados como “DU”



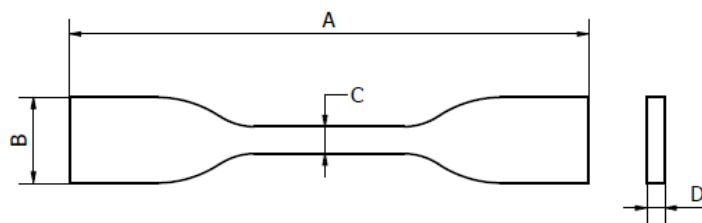
Anexo. Cara superior con balsa y cara inferior de discos $\varnothing 25 \times 4$ mm, de arriba hacia abajo.

En cuanto la variación dimensional presenta aumento en todos sus ejes de 5,17% en el eje X, 5,17% en el eje Y y 1,13% en el eje Z, en el diámetro se encontró un valor superior debido a la calidad de la impresión deficiente, lo que intervino en la toma de datos, pero el espesor arroja valores menores lo cual era lo ideal. Respecto a su acabado en verde se determinó un acabado regular de la cara superior debido a los bordes son irregulares y mal acabado de cara inferior por adherencia excesiva a la balsa, adicionalmente un mal acabado lateral porque no es posible definir las capas.

De acuerdo con las probetas designadas como “P1U”, que se muestra en, la **Tabla 29** y las figuras **Figura 42** y **Figura 43**.

Figura 42

Esquema de medidas de probetas para ensayo de tensión

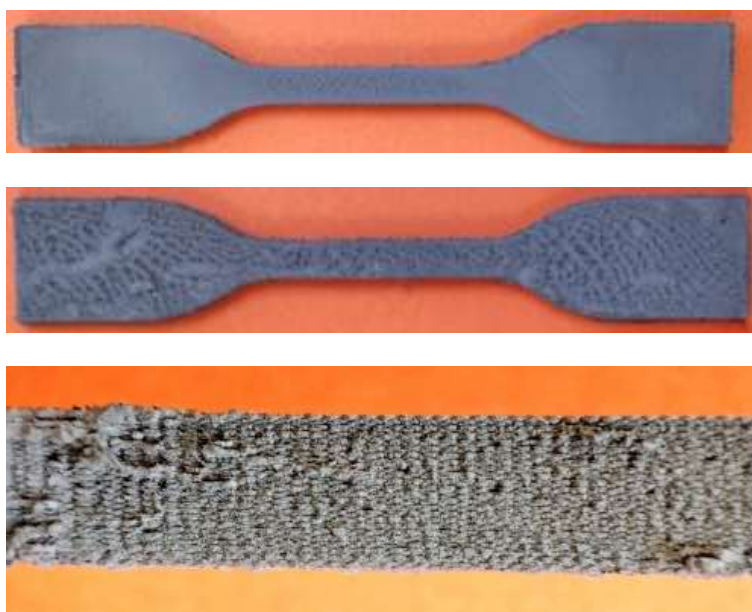
**Tabla 29**

Medidas de probetas en verde de tensión P1U

Probetas	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
P1U-1	139,02	23,50	7,51	4,88
P1U-2	138,73	23,72	7,34	3,72
P1U-3	138,23	23,19	7,39	4,86
P1U-4	137,78	23,25	7,35	4,14
Promedio	138,44	23,42	7,40	4,40
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]				
	-0,32	-2,70	-2,73	8,33

Figura 43

Fotografías de probetas en verde de tensión designadas como "P1U"





Se recopiló que la mayoría de las medidas tuvieron aumento dimensional de 0,32% en el eje X y 2,72% en el eje Y, en cuanto al espesor (D) se registra disminución, esto se debe a un despegue de la cama. Las probetas en general lograron un muy buen acabado superficial, no presentan mayores orificios entre líneas de impresión, se distinguen las capas de impresión con pocas interferencias entre estas.

Otras probetas de tensión designadas como “P3U” que se muestran en la **Tabla 30** y la **Figura 44**.

Tabla 30

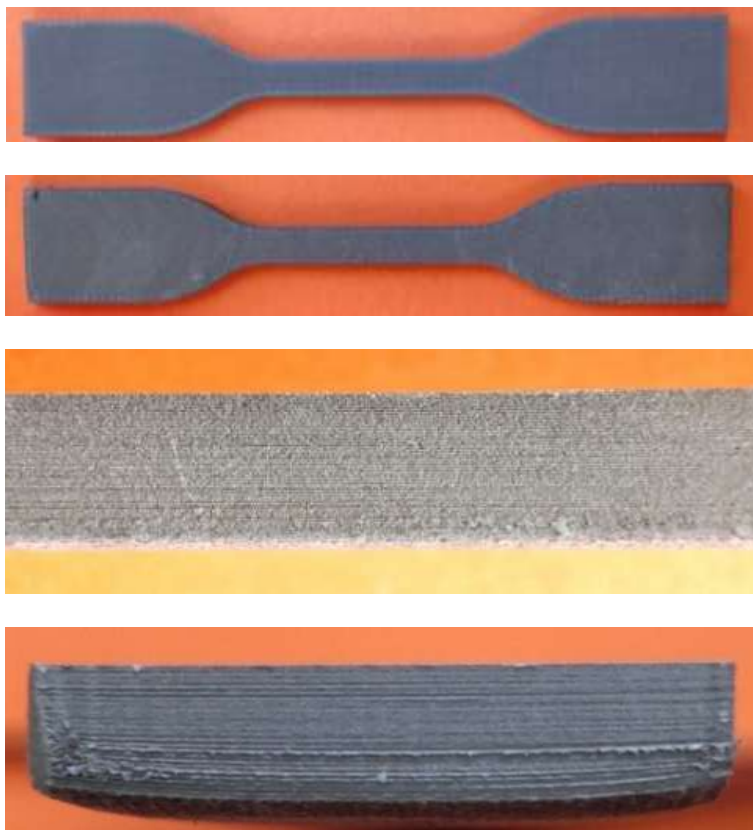
Medidas de probetas en verde de tensión P3U

Probetas	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
P3U-1	137,75	22,79	7,27	5,00
P3U-2	137,83	22,83	7,30	4,94
P3U-3	137,93	22,74	7,29	4,94
P3U-4	137,86	22,77	7,25	4,85
Promedio	137,84	22,78	7,28	4,93
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]				
	0,11	0,08	-1,04	-2,78

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 42**.

Figura 44

Fotografías de probetas en verde de tensión P3U



Unas medidas aumentaron como es el caso del espesor (D) y otras disminuyeron, ambas partes son muy cercanas precisas a la medida diseñada en CAD, posible razón es una contracción longitudinal por el cambio térmico ya que mientras el extrusor sigue depositando material, se eleva y la parte baja de la probeta que está pegada a la cama no posee la temperatura. De acuerdo con la calidad es buena y hay buena diferenciación entre capas pero se observa la separación entre ellas, el acabado inferior es regular por la notable geometría de la balsa y lateralmente las líneas no poseen mayores imperfecciones.

Cambio dimensional de piezas sinterizadas. Este apartado se analiza el cambio dimensional que ocurre desde la etapa en verde hasta el sinterizado de las piezas y probetas para estimar la contracción real que sufren, adicionalmente se analiza brevemente las

características superficiales de la piezas y probetas. Para el propósito se hace uso de tres tipos de piezas como cubos, prismas rectangulares y probetas de tensión.

La figura del cubo 10 x 10 x 10 mm utilizó los parámetros base para Virtual Foundry para realzar un contraste del acabado superficial, a esta le corresponden la **Figura 45**, la **Tabla 31** y la **Figura 46**.

Figura 45

Esquema de medidas de cubos 10 x 10 x 10 mm (E5)

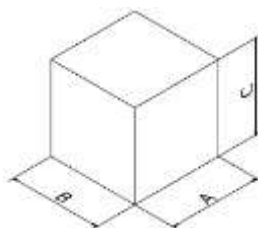


Tabla 31

Medidas de cubos 10 x 10 x 10 mm (E5)

Probeta	A [mm]	B [mm]	C [mm]
Verde			
E5.1	10,58	10,64	10,59
E5.2	10,27	10,27	10,24
E5.3	10,23	10,09	10,09
E5.4	10,29	10,17	10,05
E5.5	10,19	10,16	10,14
E5.6	10,22	10,03	10,13
Promedio	10,30	10,23	10,21
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]			
	-2,97	-2,27	-2,07
Sinterizadas			
E5.3	10,21	10,31	10,29
E5.4	10,89	10,27	10,65
E5.5	9,79	10,04	10,59
Variación dimensional de sinterizadas respecto a medidas en verde [%]			
E5.3	0,87	-0,78	-0,85
E5.4	-5,73	-0,46	-4,38
Variación dimensional de sinterizadas respecto al diseño [%]			

E5.3	-2,07	-3,07	-2,93
E5.4	-8,87	-2,73	-6,53

Figura 46

Fotografías de cubos 10 x 10 x 10 mm (E5)



Nota. Probeta referencial en verde cara superior y lateral, E5.3 cara superior, E5.4 cara lateral.

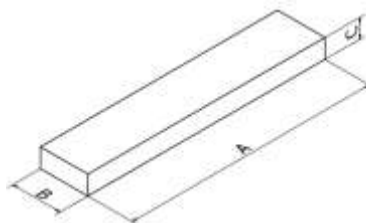
De acuerdo con la impresión tienen valores de aumento muy aproximados lo que está cercano a la isotropía, se determina que la dimensión con más afectaciones fue la longitud (A) pero en valores bajos de 2,97% en X. Posee capas bien definidas, pero no uniformes. Buen acabado superior pero mal acabado lateral.

Los resultados de la **Tabla 31** están totalmente en contradicción a lo que normalmente se produce que es una disminución de todas las dimensiones, justamente debido a las hinchazones. Más bien estos resultados servirían para medir el grado de hinchamiento de las probetas.

Para los prismas rectangulares alargados de 50 x 10 x 4 mm se estableció la **Figura 47**, la **Tabla 32** y la **Figura 48**.

Figura 47

Esquema de medidas de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm (PRU)

**Tabla 32**

Medidas de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm (PRU)

Probetas	A [mm]	B [mm]	C [mm]
Verde			
PRU1	50,33	10,05	4,13
PRU2	50,29	10,19	4,10
PRU3	50,70	10,28	4,04
PRU4	49,87	10,47	3,99
Promedio	50,30	10,25	4,07
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]			
	-0,59	-2,50	-1,69
Sinterizadas			
PRU1	49,42	9,91	4,38
PRU2	49,44	10,14	4,36
Variación dimensional sinterizadas respecto a medidas en verde[%]			
PRU1	-0,59	3,94	16,47
PRU2	-0,63	1,68	16,85
Variación dimensional sinterizadas respecto al diseño [%]			
PRU1	1,16	0,93	-9,50
PRU2	1,12	-1,40	-9,00

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 47**.

Figura 48

Fotografías de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm en verde y sinterizadas (PRU)



Nota. Probeta referencial en verde cara superior e inferior, probetas sinterizadas PRU1 cara superior y PRU2 cara superior.

Las probetas aumentan en su tamaño después de impresas en 0,59% en X, 2,50% en Y y 1,69 en Z, siendo el ancho (B) el que crece más. Posee regular acabado superficial, rastro de contacto con la boquilla muy marcado, laterales con numerosas discontinuidades, cara inferior con geometría marcada de la balsa.

Las dimensiones de las probetas sinterizadas aumentaron altamente el espesor (C) y ligeramente en el ancho (B), pero con la longitud (A) se obtuvo una reducción requerida, esto indica que las condiciones de desagregado no fueron las adecuadas pues hincharon, sin embargo hubo una reducción de 1,14% en eje X. De acuerdo con la inspección visual, las probetas no sinterizaron en su núcleo debido a que se oxidaron pero se logró en las capas más externas.

Para las probetas para ensayo de tensión sobredimensionadas al 20% corresponde la **Tabla 33** y la **Figura 49**.

Tabla 33

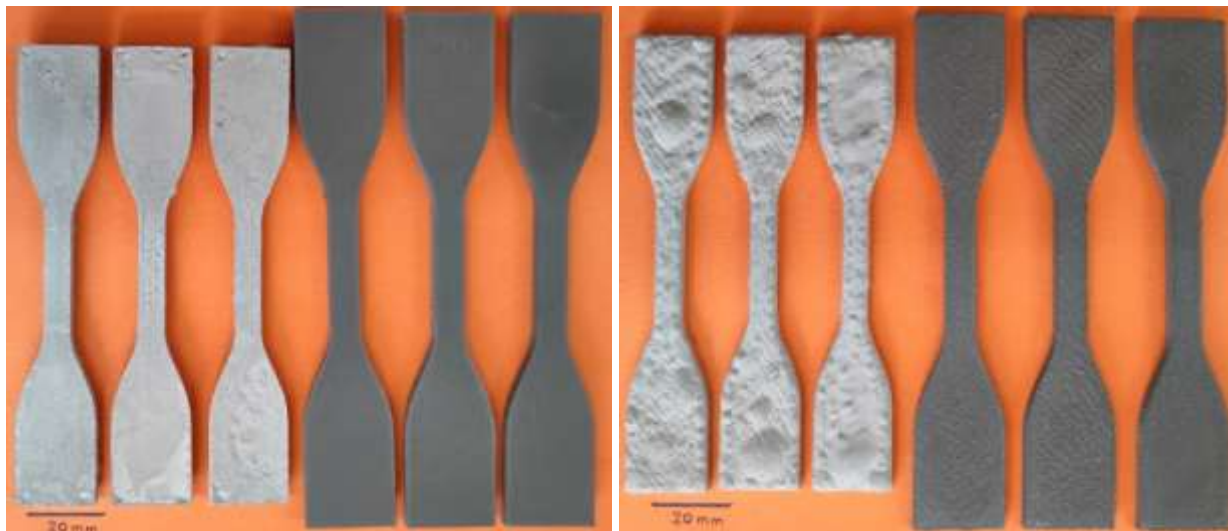
Medidas probetas para ensayo de tensión sobredimensionadas al 20% (USFQ)

Probetas	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
Verde				
USFQ-1	136,82	24,06	8,09	5,03
USFQ-2	136,82	24,07	8,05	5,05
USFQ-3	136,85	24,06	8,05	5,09
USFQ-4	136,96	24,10	7,99	5,01
USFQ-5	136,96	24,10	7,99	5,01
USFQ-6	136,91	24,09	8,04	5,01
Promedio	136,89	24,08	8,04	5,04
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]				
	0,20	-5,34	-5,45	-3,19
Sinterizadas				
USFQ-1	119,98	20,88	7,21	4,75
USFQ-3	120,07	20,61	7,14	4,51
USFQ-6	119,92	20,96	7,07	4,45
Variación dimensional de sinterizadas respecto a medidas en verde [%]				
USFQ-1	12,35	13,29	10,23	5,60
USFQ-3	12,29	14,42	11,14	10,37
USFQ-6	12,40	12,96	12,06	11,56
Variación dimensional de sinterizadas respecto al diseño [%]				
USFQ-1	12,53	8,66	5,34	2,60
USFQ-3	12,46	9,86	6,30	7,51
USFQ-6	12,57	8,31	7,26	8,74

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 42**.

Figura 49

Fotografías de probetas para ensayo de tensión sobredimensionadas al 20% verde y sinterizadas (USFQ)



Nota. Probetas sinterizadas USFQ1, USFQ3 y USFQ6, con probetas en verde. Cara superior (izquierda) y Cara inferior (derecha).

Referente al acabado en verde, en general lograron un muy buen acabado superficial, no presentan mayores orificios entre líneas de impresión, se distinguen las capas de impresión con pocas interferencias entre estas.

Estas probetas lograron un buen comportamiento post sinterizado debido a que todas resultaron con reducciones en las medidas similares resultando en aproximadamente 12,52% en eje X, 6,3% en eje Y, 6,28% en el eje Z. La constante aparición de ampollas en la cara superior y lateral de las probetas se explica por el efecto del desagregado que no permitió el escape controlado de gases de polímero.

Para las probetas para ensayo de tensión designadas como “P2U” se presentó la **Tabla 34** y la **Figura 50**.

Tabla 34

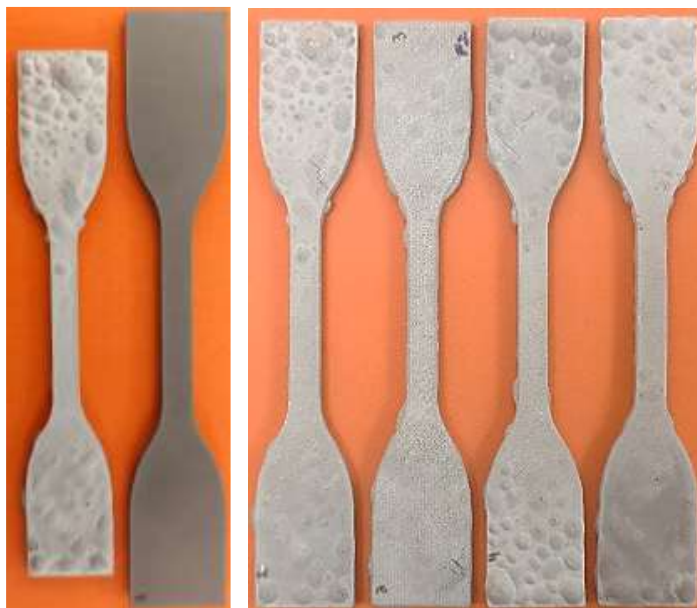
Medidas de probetas de tensión P2U

Probetas	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
Verde				
P2U-1	137,99	22,85	7,31	4,86
P2U-2	137,86	22,90	7,32	4,83
P2U-3	138,07	22,90	7,37	4,73
P2U-4	138,00	22,89	7,29	4,77
P2U-5	137,84	22,80	7,25	4,89
P2U-6	137,91	22,85	7,31	4,81
Promedio	137,94	22,86	7,31	4,81
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]				
	0,04	-0,28	-1,50	-0,30
Sinterizadas				
P2U-1	-	19,93	6,76	4,99
P2U-2	121,05	20,39	6,43	4,45
P2U-3	121,74	20,61	6,66	4,23
P2U-4	121,99	20,34	6,43	4,33
P2U-5	121,54	20,41	6,65	4,40
Variación dimensional de sinterizadas respecto a medidas en verde [%]				
P2U-1	-	5,02	-0,70	-15,23
P2U-2	0,55	2,83	4,27	-2,62
P2U-3	-0,02	1,81	0,79	2,46
P2U-4	-0,23	3,08	4,17	0,00
P2U-5	0,14	2,73	0,99	-1,54
Variación dimensional de sinterizadas respecto al diseño [%]				
P2U-1	-	12,57	6,11	-4,03
P2U-2	12,29	10,56	10,74	7,36
P2U-3	11,78	9,62	7,50	11,94
P2U-4	11,60	10,79	10,65	9,72
P2U-5	11,93	10,47	7,69	8,33

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 42**.

Figura 50

Fotografía de probetas de tensión designadas como P2U verde y sinterizadas



Nota. Probeta sinterizada P2U-2 con probetas en verde referencial, P2U-2, P2U-3, P2U-4 y P2U-5.

Lo respecto a las medidas en verde, son las que menos variación tuvieron dimensionalmente, las más cercanas al diseño en CAD, esto es un buen indicador de repetibilidad ya que la medida con mayor aumento es de 1,50% y sus dimensiones no varían considerablemente. Hubo buen acabado superior, regular acabad inferior y buen acabado lateral por no tener muchas imperfecciones.

Es así que todas las probetas sinterizadas experimentaron reducción dimensional respecto a las dimensiones en verde son 11,90% para el eje X, 8,54% para el eje Y y 9,34% para el eje Z demostrado. Hay formación de ampollas en la cara expuesta a la atmósfera de vacío, cara inferior con muy buen acabado superficial y cara frontal buen acabado con pocas ampollas.

Las probetas de tensión designadas como “P17U” obtuvieron los valores de la **Tabla 35** y la **Figura 51**.

Tabla 35

Medidas probetas de tensión P17U

Probetas	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
Verde				
P17U-1	138,17	23,01	7,28	4,59
P17U-2	138,09	23,09	7,30	4,64
P17U-3	138,25	23,07	7,31	4,76
P17U-4	138,10	23,05	7,27	4,82
P17U-5	138,32	23,18	7,21	4,63
Promedio	138,19	23,08	7,27	4,69
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]				
	-0,14	-1,22	-1,00	2,33
Sinterizadas				
P17U-3	121,87	20,32	6,29	5,45
P17U-4	122,50	20,39	6,31	5,41
P17U-5	121,89	19,70	5,96	4,93
Variación dimensional de sinterizadas respecto a medidas en verde [%]				
P17U-3	0,01	-3,67	-5,36	-17,10
P17U-4	-0,50	-4,01	-5,70	-16,39
P17U-5	0,00	-0,51	0,11	-6,07
Variación dimensional de sinterizadas respecto al diseño [%]				
P17U-3	11,69	10,88	12,69	-13,47
P17U-4	11,23	10,58	12,41	-12,78
P17U-5	11,67	13,60	17,22	-2,78

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 42**.

Figura 51

Fotografía probetas de tensión P17U en verde y sinterizadas



Nota. Probeta sinterizada P17U-4 con probetas en verde referencial. P17U-3, P17U-4, P17U-5.

Lo concerniente a lo dimensional, presentó ligeros aumentos en la mayoría de dimensiones, mientras que en el espesor (D) se redujo, esto puede deberse a que la probeta se despegó de la cama en sus extremos durante la impresión. Respecto al ancho (B), fue la medida que más aumentó. Posee buen acabado superior, mal acabado inferior por la adherencia de una parte de la probeta a la balsa adicional a mala unión entre las primeras capas.

Para las probetas sinterizadas se redujeron mayormente a excepción del espesor, eso se explica por la capa desprendida al retirar la balsa, sin embargo se puede obtener valores de reducción de 11,53% en X y 14,10 en Y. En acabado tuvo una cara superior con ampollas tendiendo a planas, cara inferior buen acabado pero con presencia de surcos y en la cara frontal se presencia una mala unión entre capas por lo que tiene numerosas aberturas.

Respecto a las probetas con los parámetros designados como “P18U”, se generó la **Tabla 36** y la **Figura 52**.

Tabla 36

Medidas probetas de tensión P18U

Probetas	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
Verde				
P18U-1	137,88	22,75	7,28	4,86
P18U-2	137,75	22,81	7,28	4,87
P18U-3	137,81	22,73	7,27	4,87
P18U-4	137,87	22,73	7,27	4,81
P18U-6	137,79	22,74	7,28	4,83
Promedio	137,82	22,75	7,27	4,85
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]				
	0,13	0,21	-1,04	-1,03
Sinterizadas				
P18U-2	133,33	20,41	6,51	4,55
P18U-6	122,39	20,65	6,71	4,63
Variación dimensional de sinterizadas respecto a medidas en verde [%]				
P18U-2	3,26	10,28	10,56	6,10
P18U-6	11,20	9,22	7,72	4,45
Variación dimensional de sinterizadas respecto al diseño [%]				
P18U-2	3,39	10,47	9,63	5,14
P18U-6	11,31	9,42	6,76	3,47

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 42**.

Figura 52

Fotografías probetas de tensión designadas como “P18U”



Nota. Probeta sinterizada P18U-6 con probeta en verde referencial. P18U-5, P18U-6, P18U-7 y P18U-8.

Para el apartado de la dimensión se observa que las probetas tienden a un aumento dimensional en verde, en la sección reducida y el espesor pero respecto a la longitud y ancho estas se reducen, esto puede deberse al fenómeno de contracción térmica debido al cambio brusco de temperatura ya que la cama no iguala a la temperatura de extrusión.

Una vez sinterizadas da como resultados que en efecto si se reducen pero con valores muy variados, la medida del ancho es la que más compartieron relación dando a entender que se redujo en 9,95% en el eje Y. Muy buen acabado superior, regular acabado inferior por desprendimiento de retazos de filamento y cara frontal indica una buena unión entre capas. En relación a los anteriores parámetros designados como “P18U”, estas probetas no poseen carcasa y se determinaron los valores de la **Tabla 37**.

Tabla 37

Medidas probetas de tensión P18U sin carcaza

Probetas	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
Verde				
P18U-5	137,91	22,81	7,18	4,82
P18U-7	137,71	22,68	7,15	4,90
P18U-8	137,85	22,71	7,13	4,81
P18U-9	137,77	22,67	7,17	4,79
Promedio	137,81	22,72	7,16	4,83
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]				
	0,14	0,36	0,60	-0,62
Sinterizadas				
P18U-5	122,95	20,43	6,24	5,04
P18U-7	122,44	20,26	6,26	4,47
P18U-8	122,26	20,33	6,26	4,71
Variación dimensional de sinterizadas respecto a medidas en verde [%]				
P18U-5	10,78	10,06	12,81	-4,35
P18U-7	11,15	10,82	12,53	7,38
P18U-8	11,28	10,53	12,53	2,55
Variación dimensional de sinterizadas respecto al diseño [%]				
P18U-5	10,90	10,38	13,33	-5,00
P18U-7	11,28	11,14	13,06	6,81
P18U-8	11,41	10,85	13,06	1,94

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 42**.

Estas tuvieron el mismo comportamiento durante y después de la impresión que aquellas con carcasa. Al realizar el estudio sobre la caracterización dimensional se analizó los datos y se contempla que ambos tipos de probetas tienen comportamientos similares, pero al no poseer carcasa, piden gran parte de sus demisiones por lo que resultan más pequeñas que los valores de diseño en CAD, la única dimensión que resultó tener un comportamiento esperado fue el espesor (D) que está ligeramente sobredimensionado.

Las probetas sinterizadas, lograron reducir sus dimensiones considerablemente, se observa un comportamiento casi isotrópico. Es de relevancia recalcar que el no poseer carcasa les da más espacio a los gases para escapar en el desagregado y por ende no se hincha y

posee pocas ampollas. Para este tipo de probetas se proyecta la reducción de aproximadamente el 11,20% en X, 13,15% en Y y 4% en Z.

Para los cubos 10 x 10 x 10 mm con la boquilla de 0,4 se ha examinado los valores de la **Tabla 38** y el material fotográfico de la **Figura 53**.

Tabla 38

Medidas de cubos 10 x 10 x 10 mm con boquilla 0,4 mm (E4)

Probeta	A [mm]	B [mm]	C [mm]
E5.7	10,73	10,69	10,53
E5.8	10,69	10,71	10,51
Promedio	10,71	10,70	10,52
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]			
	-0,71	-0,70	-0,52
Sinterizadas			
E5.7	9,79	10,04	10,59
E5.8	9,99	10,21	10,97
Variación dimensional de sinterizadas respecto a las verdes [%]			
E5.7	8,59	6,17	-0,70
E5.8	6,66	4,55	-4,25
Variación dimensional de sinterizadas respecto a las diseñadas [%]			
E5.7	2,13	-0,40	-5,93
E5.8	0,07	-2,13	-9,67

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 45**.

Figura 53

Fotografías de cubos 10 x 10 x 10 mm con boquilla 0,4 mm (E4)





Nota. Imagen referencial de cubo 10 x 10 x 10 mm en verde, caras superior, lateral e inferior (arriba). Cubo E5.7 sinterizado, cara lateral e inferior (abajo).

Ambos experimentan un aumento dimensional tras la impresión donde los más significativos son la longitud y el ancho en un valor muy reducido.

En cuando a su sinterización se logró reducir en su longitud, sin embargo se muestra una evidente hinchazón, añadiendo que ambas probetas están totalmente compuestas por metal.

Calidad superficial y facilidad de desprendimiento de balsa. Debido a que la calidad superficial de las piezas en verde y la facilidad de su desprendimiento de la balsa afectan el sinterizado posterior, se evaluaron estos dos atributos usando los prismas cuadrangulares 10 x 10 x 3 mm variando los parámetros de impresión en cuanto a la altura de capa y ancho de extrusión. Las diferentes combinaciones realizadas de altura de capa y ancho de extrusión se muestran en la **Tabla 39** donde se indica una calificación cualitativa de la calidad superficial (determinada visualmente) de las caras superior y lateral de los prismas impresos. La calidad total de las tabla corresponde a la suma de las dos calificaciones anteriores.

Tabla 39

Calificaciones de combinaciones de los prismas rectangulares 10 x 10 x 3 mm

Denominación	Altura de capa [mm]	Ancho de extrusión [mm]	Calificación cara superior	Calificación cara lateral	Calificación total
P1	0,1	0,2	7	7	14
P2	0,1	0,4	4	2	6
P3	0,1	0,6	5	1	6

P4	0,1	0,3	6	4	10
P5	0,3	0,3	1	5	6
P6	0,4	0,3	2	6	8
P7	0,2	0,3	3	3	6
P8	0,2	0,2	6	6	12
P9	0,2	0,4	2	2	4
P10	0,4	0,2	4	6	10
P11	0,4	0,4	3	3	6
P12	0,1	0,1	7	6	13
P13	0,4	0,1	6	6	12
P14	0,3	0,6	4	2	6
P15	0,4	0,6	4	2	6
P16	0,3	0,1	5	5	10

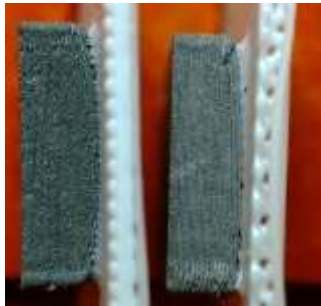
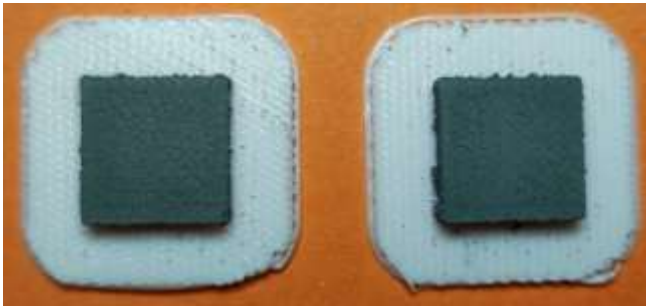
Nota. Calificación más baja, mejor acabado.

Según la tabla anterior las muestras de mejor acabado superficial fueron P2, P3, P5, P7, P9, P11, P14 y P15; destacando notablemente P9, es decir, altura de capa de 0,2 mm y ancho de extrusión de 0,4 mm. La apariencia superficial se las muestras de la **Tabla 39** se indican en las fotografías de la **Tabla 40**, donde también se incluye observaciones cualitativas.

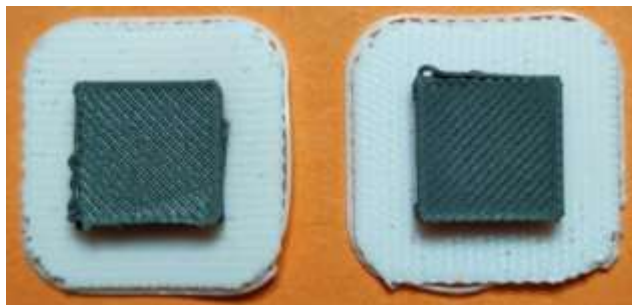
Tabla 40

Fotografías y observaciones de combinaciones de los prismas cuadrangulares 10 x 10 x 3 mm

Den.	Cara superior	Cara inferior
P1		
Obs.	Ancho de capa no definido (aparentemente es de 0,4mm), presenta muchos vacíos.	Altura no definida, restos de material, capas inclinadas

P2		
Obs.	Capas bien definidas, pero con espacios entre estas. Cumple con el ancho.	Relativa buena calidad. Cumple con el alto.
P3		
Obs.	Buena calidad, capas bien definidas, separación entre ancho de capa.	Calidad adecuada, cumple con el alto.
P4		
Obs.	En ciertas partes no se define bien el ancho de capa. Calidad regular.	Calidad regularmente adecuada. No es muy mala pero es de menor calidad que las anteriores.
P5		
Obs.	Calidad buena, no hay mucho espacio entre capas.	Bien definida pero hay espacio entre capas.

P6



Obs.

Calidad adecuada, no hay mucho espaciamento.

Capas bien definidas, pero presenta mucho espaciamento.

P7



Obs.

Buena definición con muy poco espaciamento.

Buena calidad, cumple con el alto de capa.

P8

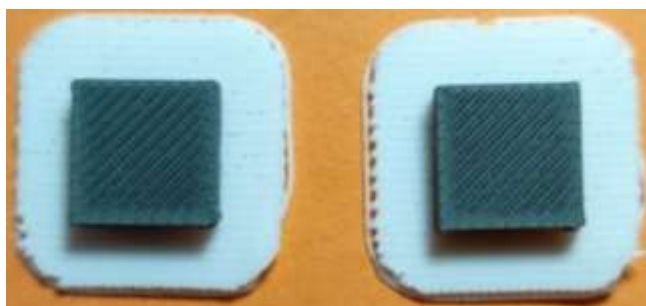


Obs.

No adecuada, ancho aparente de 0,4 mm.

Cumple con el número de capas.

P9

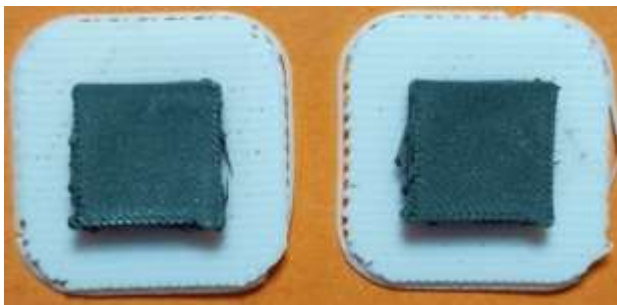


Obs.

Cumple con el ancho de capa. Buen acabado.

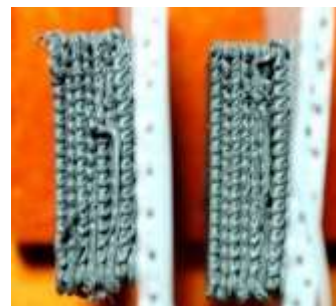
Cumple con las 15 capas. Buena definición

P10



Obs.

Cumple con el ancho de capas.



Cumple con el número de capas. Mal acabado.

P11



Obs.

Cumple con el ancho de capas.



Cumple con el número de capas.

P12



Obs.

No se puede comprobar el ancho de extrusión.



Aparentemente cumple con el número de capas.

P13

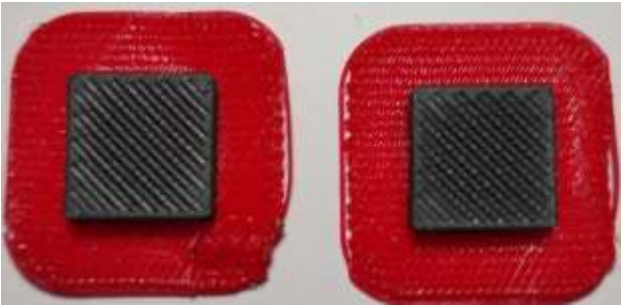
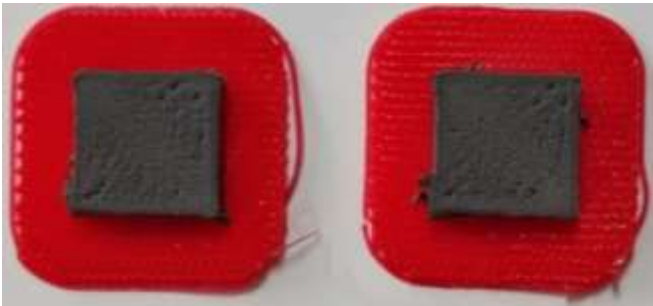


Obs.

Superficie irregular pero aparentemente quiere dar el ancho.



Altura de capa si corresponde.

P14		
Obs.	Ancho si corresponde. Acabado regular.	Sí corresponde al número de capas. Buen acabado,
P15		
Obs.	Cumple con el ancho de extrusión.	Cumple con el número de capas.
P16		
Obs.	Aparentemente 7 líneas, no 10 como debería.	Sí corresponde con el número de capas.

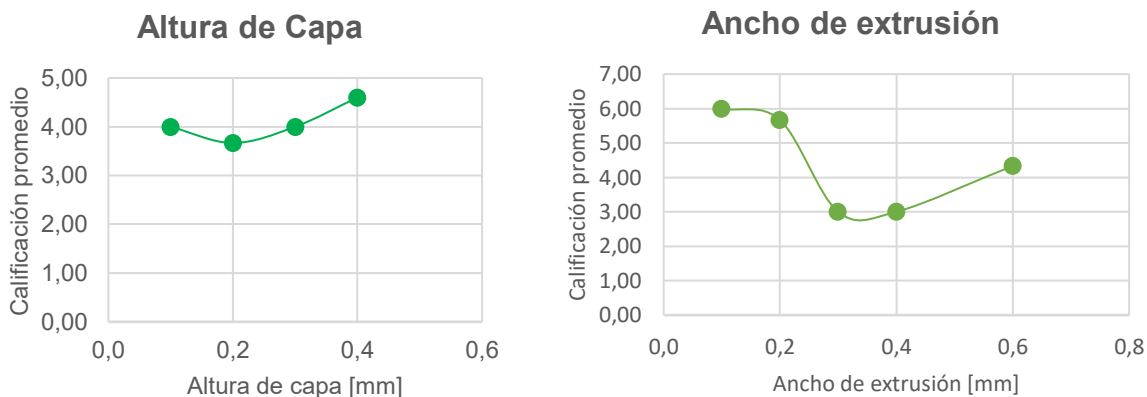
Nota. Den = Denominación, Obs = Observaciones

De esta forma se logró determinar mediante la **Figura 54** que, el ancho de extrusión fue el parámetro más influyente en la calidad del acabado superficial ya que para anchos pequeños, de 0,1 mm y 0,2 mm, dieron piezas con peor apariencia, vacíos notables y capas de difícil definición, mientras que a partir de 0,3 mm el resultado mejora de forma notoria, el mejor punto fue de 0,4 mm. Con un ancho superior de 0,6 mm ya no mejoró la calidad, por el

contrario generó más espacios entre las líneas de la cara superior, siendo así el límite para la boquilla de 0,4 mm.

Figura 54

Gráficas de calificación promedio vs altura de capa y ancho de extrusión



Respecto a la altura de capa, no se muestra un patrón ya que a alturas pequeñas como 0,1 mm hay mayor definición pero tardan más en la impresión sin que implique una mejor calidad, sin embargo se recomienda variar dentro de un rango de 0,1 mm y 0,3 mm.

En cuanto a la facilidad de desprendimiento de las muestras de la balsa, conforme las diferentes combinaciones de altura de capa y ancho de extrusión, esta característica se presenta en la **Figura 55**, donde se puede apreciar la cantidad de residuos de la pieza impresa que quedan después del desprendimiento de la muestra, este aspecto es una medida de la facilidad de desprendimiento.

Figura 55

Desprendimiento de la balsa para las diferentes combinaciones de los prismas cuadrangulares 10 x 10 x 3 mm



Nota. Se muestran las treinta y dos (32) figuras impresas, de izquierda a derecha se muestran en orden las pruebas, cada una tiene dos figuras. P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15 y P16.

Aquellas piezas que se desprendieron con la necesidad de aplicar mucha fuerza o cuyas primeras capas permanecieron adheridas a la balsa son las más complicadas de retirar, es decir para las probetas P1, P3, P4, P6, P8, P10, P11, P12, P13, P14, P15 y P16, esto se puede verificar con la observación de la figura. Por otro lado, las piezas con una mayor facilidad de desprendimiento de balsa fueron las probetas P2, P5, P7 y P9.

Piezas impresas con el filamento Virtual Foundry

Cambio dimensional de piezas en verde. En este segmento se hará uso de los discos de $\varnothing 25 \times 4$ mm para determinar los resultados dimensionales y de calidad de una pieza circular tras la etapa de impresión, para esto se presentaron los datos de la **Tabla 41**, junto con imágenes de la **Figura 56**.

Tabla 41

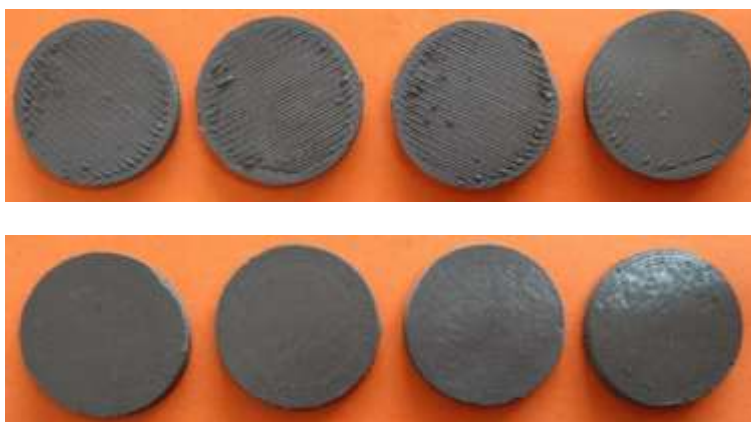
Medidas de discos $\varnothing 25 \times 4$ mm (DV)

Probetas	A [mm]	B [mm]
DV1	4,37	25,39
DV2	4,33	25,58
DV3	4,28	25,42
DV4	4,38	25,52
Promedio	4,34	25,48
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]		
	-8,50	-1,91

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 40**.

Figura 56

Fotografías de discos $\varnothing 25 \times 4$ mm (DV)



Estas presentaron un aumento respecto a las medidas de diseño, siendo la más afectada la medida del espesor (A) debido a la fricción entre la boquilla y la pieza provocando

acumulación de filamento en su superficie. Para este tipo de figuras se podría hacer un sobredimensionamiento de 8,5% en el eje Z, 1,91% tanto en el eje X como Y.

Para el estudio del cambio dimensional y análisis cualitativo en piezas y probetas sinterizadas, se presenta los datos recogidos tanto en verde como en sinterizado para realizar un contraste utilizando de las medidas y las fotografías de las piezas más representativas. Este estudio requirió el uso cuatro tipos de piezas como cubos, prismas rectangulares probetas de tensión y una figura ósea.

Para los cubos 10 x 10 x 10 mm se observa que han tenido un crecimiento post impresión en valores no muy alarmantes como se muestra en la **Tabla 42** y sus imágenes en la **Figura 57**.

Tabla 42

Medidas de cubos 10 x 10 x 10 mm (E4)

Probeta	A [mm]	B [mm]	C [mm]
E4.1	10,13	10,01	9,99
E4.2	10,05	10,11	10,01
E4.3	10,06	10,07	10,05
E4.4	10,03	10,09	10,01
E4.5	10,03	10,05	10,01
Promedio	10,06	10,06	10,02
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]			
	-0,61	-0,63	-0,16
Sinterizadas			
E4.3	7,90	8,01	8,36
E4.4	8,94	9,20	9,00
Variación dimensional de sinterizadas respecto a las verdes [%]			
E4.3	21,44	20,31	16,63
E4.4	11,09	8,51	10,25
Variación dimensional de sinterizadas respecto a las diseñadas [%]			
E4.3	21,00	19,87	16,40
E4.4	10,60	8,00	10,00

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 45**.

Figura 57

Fotografías de cubos 10 x 10 x 10 mm (E4)



Nota. Pieza referencial en verde para cubos 10 x 10 x 3 mm (arriba), cubos sinterizados E4.3 y E4.4 (abajo).

De acuerdo con estas figuras en verde, experimentaron un ligero aumento en todas sus dimensiones, siendo el ancho (B) el que destaca. Sus acabados superficiales fueron deficientes tanto en el lateral como en el superior, gran presencia de discontinuidades que deforman la pieza.

Respecto a la sinterización se logró que los cubos estén totalmente compuestos por metal y a su vez se han reducido sin embargo la pobreza E4.3 logró reducir más respecto a la otra, una razón puede ser la colocación dentro del crisol, sin embargo, la pieza E4.4 tuvo valores de reducción cercanos al propuesto por el fabricante (10%).

Los prismas rectangulares de 50 x 10 x 4 mm tienen sus resultados en la **Tabla 43** y las fotografías en la **Figura 58**.

Tabla 43

Medidas de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm (PRV)

Probetas	A [mm]	B [mm]	C [mm]
Verde			
PRV1	50,50	10,14	4,25
PRV2	50,57	10,47	4,17
PRV3	50,43	10,23	4,13
PRV4	50,79	10,19	4,09
PRV5	50,71	10,63	4,24
PRV6	50,40	10,35	4,11
PRV9	50,45	10,32	4,20
PRV11	50,61	10,65	4,30
PRV13	50,71	10,63	4,33
Promedio	50,55	10,33	4,17
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]			
	-1,10	-3,32	-4,29
Desagregadas			
PRV5	49,74	10,13	6,01
PRV6	48,21	9,89	5,27
PRV9	48,47	9,73	4,97
Variación dimensional de desagregadas respecto a medidas en verde [%]			
PRV5	1,55	2,45	-43,36
PRV6	4,59	4,76	-25,56
PRV9	4,06	6,31	-18,56
Sinterizadas			
PRV9	44,61	9,01	4,39
PRV11	45,19	9,28	4,57
PRV13	45,20	9,42	4,83
Variación dimensional de sinterizadas respecto a medidas en verde [%]			
PRV9	11,71	13,18	-4,74
PRV11	10,56	10,61	-9,03
PRV13	10,54	9,26	-15,23
Variación dimensional de sinterizadas respecto al diseño [%]			
PRV9	10,79	9,87	-9,83
PRV11	9,62	7,20	-14,33
PRV13	9,60	5,80	-20,83

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 47**.

Hay gran cantidad de probetas las cuales no poseen medidas, esto es debido a que se eligió no manipularlas posterior al desagregado por la naturaleza frágil de las piezas, además por esta razón es que muchas de las probetas resultaron defectuosas por el mismo procedimiento térmico, es así que solo un cierto grupo fue capaz de superar el sinterizado.

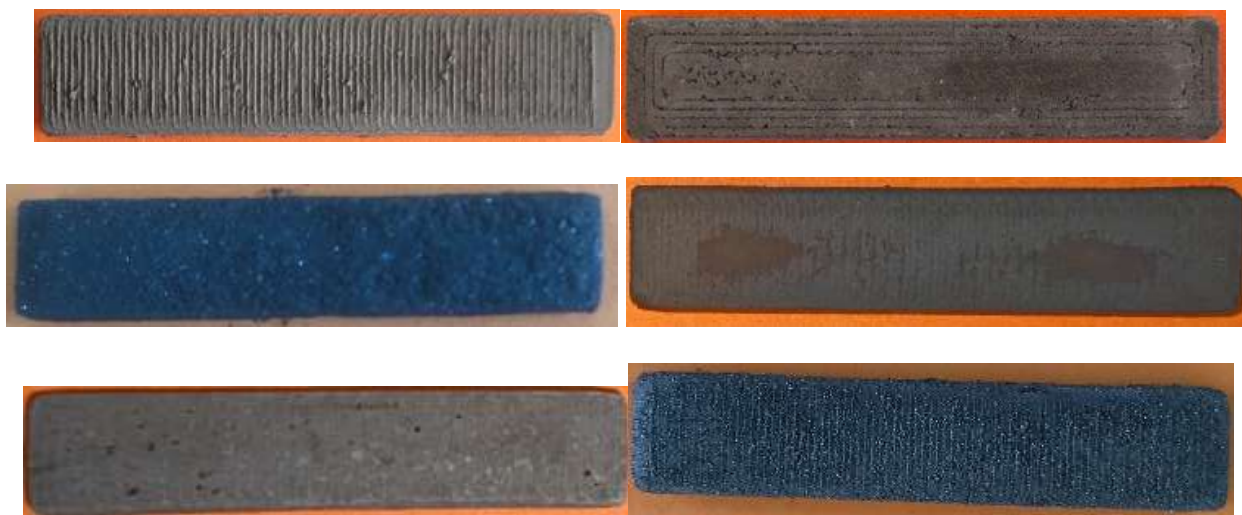
Se observa que en promedio en verde, las probetas resultan de mayor tamaño tras la impresión, siendo el espesor (C) el más afectado. La calidad es regular en la cara superior debido a que la impresión es muy notoria, cara inferior igualmente regular ya que a pesar de tener una textura lisa, presenta múltiples cavidades.

En cuanto al desagregado se observa una ligera reducción producto de la evaporación del polímero pero con el espesor se nota un aumento muy considerable, sin embargo, no es de importancia debido a que durante la toma de medidas se debía manejar con cuidado las piezas, por eso es que se debía evitar un contacto muy riesgoso y no era posible recoger datos de la forma pertinente. De esta forma se obtuvo una reducción de 3,4% en el eje X, 4,51 en Y y el espesor aumenta ya sea por hinchamiento o por los restos de polvos de desagregado. Aquí las piezas adquieren una textura acorde a los polvos, mientras estos estén más compactos la superficie será más rugosa, por supuesto que también del ciclo.

Observando los datos del sinterizado se puede estimar un porcentaje de encogimiento que sería de 10% en X y 7,62% en Y. En esta parte, la calidad superficial mejora respecto al desagregado, se ven más lisas pero conservan la forma de impresión. Son metálicas en sus capas exteriores pero en el núcleo se oxida.

Figura 58

Fotografías de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm (PRV)



Nota. Prismas rectangulares deferentes en verde, cara superior y cara inferior (arriba). Probetas desagregadas PRV5 y PRV9 cara superiores (medio). Probetas sinterizadas PRV9 y PRV13 caras superiores (abajo).

Las probetas de ensayo de tensión sobredimensionadas al 10% experimentan una serie de cambios en sus dimensiones como se especifica en la **Tabla 44**, junto con cambios físicos como se logra observar en la **Figura 59**.

Tabla 44

Medidas de probetas para ensayo de tracción sobredimensionadas al 10% (TV)

Probetas	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
Verde				
TV5	125,89	21,23	7,36	4,70
TV6	126,02	21,38	7,53	4,76
TV7	126,11	21,34	7,49	4,73
TV8	126,01	21,31	7,42	4,70
Promedio	126,01	21,32	7,45	4,72
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]				
TV5	0,39	-1,99	-12,88	-7,31
Sinterizadas				
TV5	111,80	18,27	6,18	4,51

Variación dimensional sinterizadas respecto a medidas verdes [%]				
TV5	11,19	13,94	16,03	4,11
Variación dimensional sinterizadas respecto al diseño [%]				
TV 5	0,48	-1,56	-11,52	-6,82

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 42**.

Figura 59

Fotografías de probeta para ensayo de tracción sobredimensionadas al 10% (TV)



Nota. Probeta representativa en verde cara superior y cara inferior, probeta TV-5 cara superior y cara inferior (de arriba hacia abajo).

Se experimentó un aumento en sus dimensiones tras su fabricación pero en bajos valores (la parte más esencial de la probeta experimenta un crecimiento muy sobresaliente, esto puede deberse a los defectos con los que sale una probeta generalmente del proceso FDM). Cara superior con muy buen acabado, cara inferior es lisa pero con múltiples porosidades, lateralmente las capas se logran divisar la impresión.

Para el sinterizado la probeta resultó rota durante el desagregado, con buen acabado superficial, las líneas de impresión se compactaron, no presenta porosidades. Composición metálica en las capas más externas, internamente oxidada. Al contrario de reducirse se

expandió, esto sucede por el tipo de geometría a medir, por lo que al estar en varias partes no da la misma medida que si estuviese entera.

A modo de experimentación se aumentó la temperatura del extrusor del filamento de alta carga metálica para las probetas TV7 y TV8, sin embargo, no se observó mayor cambio sustancial.

Para los prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm cuyo ángulo de relleno fue de 45° no se observa cambios sustanciales a diferencia de los prismas impresos con los parámetros base. Los valores de sus medidas se encuentran en la **Tabla 45** y las referencias visuales en la **Figura 60**.

Tabla 45

Medidas de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm a 45° (PRV)

Probetas	A [mm]	B [mm]	C [mm]
Verde			
PRV7	50,39	10,39	4,15
PRV8	50,37	10,35	4,12
PRV10	50,40	10,38	4,17
PRV12	50,59	10,47	4,19
Promedio	50,44	10,40	4,16
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]			
	-0,87	-3,97	-3,96
Desagregadas			
PRV7	-	-	-
PRV8	48,62	10,12	5,65
PRV10	48,65	9,93	4,96
Variación dimensional de desagregadas respecto a las verdes [%]			
PRV8	3,60	2,66	-35,95
PRV10	3,55	4,46	-19,28
Sinterizadas			
PRV10	45,46	9,32	4,33
PRV12	44,73	9,11	4,26
Variación dimensional de sinterizadas respecto a las verdes [%]			
PRV10	9,87	10,36	-4,21
PRV12	11,32	12,34	-2,44

Variación dimensional de sinterizadas respecto a las diseñadas [%]			
PRV10	9,08	6,80	-8,33
PRV12	10,55	8,87	-6,50

Nota. El esquema de medidas se encuentra en la **Figura 47**.

Figura 60

Fotografías de prismas rectangulares 50 x 10 x 4 mm a 45° (PRV)



Nota. Pieza en verde como referencia, cara superior e inferior (arriba), probeta PRV10 desagregada, cara superior e inferior (medio) y probeta PRV10 sinterizada, cara superior e inferior (abajo).

Para aquellas piezas que no poseen medidas en desagregado es por la delicadez de las piezas, por lo que se evita el contacto, así mismo hay probetas que han sufrido roturas por lo que no vale la pena su examinación posterior al sinterizado.

Se define que obtienen mayor medida respecto a su diseño, siendo las más afectadas el ancho (D) y espesor (C), esto se da debdo a que durante la impresión se adhirieron fragmentos del filamento, producto de la fricción con la boquilla.

El desagregado presentan una disminución pequeña y similar en la longitud y ancho. En el sinterizado se obtuvo valores de reducción de 9,82 en X y 6,65 en Y, en el espesor se registra hinchamiento, dichos valores se pueden tomar en cuenta para el sobredimensionamiento. Independientemente del patrón de relleno, las probetas adquieren la

geometría de su medio de desagregado debido a que su estructura es débil. Poseen coloración oscura en todas sus caras e hinchazón en su espesor y superficie rugosa.

Para aquellas probetas que presentan un guion es debido a que experimentó una rotura durante el ciclo de desagregado y para aquellas que tienen una medida de sinterizado y no de desagregado es porque se evitó manipular para no provocar alteraciones geométricas.

Para esta metodología se realizó las mediciones fundamentales como son longitud y ancho que se muestran en la **Figura 61**. El objetivo es la revisión del comportamiento de una pieza no uniforme como es un hueso húmero derecho, sus medidas están en la **Tabla 46** y las fotografías se encuentran en la **Figura 62**.

Figura 61

Esquema de medidas de hueso húmero derecho (HUV)

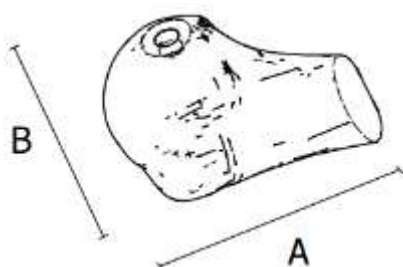


Tabla 46

Medidas para hueso húmero derecho (HUV)

Probetas	A [mm]	B [mm]
Verde		
HUV	21,30	15,00
Variación dimensional verdes respecto al diseño [%]		
HUV	-9,23	-7,14
Desagregadas		
HUV	20,60	14,70
Variación dimensional de a medidas en verde [%]		
HUV	3,29	2,00
Sinterizadas		
HUV	18,80	13,00
Variación dimensional de sinterizadas respecto a medidas en verde [%]		

HUV	11,74	13,33
Variación dimensional de sinterizadas respecto al diseño [%]		
HUV	3,59	7,14

Figura 62

Fotografías de hueso húmero derecho (HUV)



Nota. Comparación hueso en verde (izquierda) con HUV sinterizado (derecha).

Los datos arrojan que tiene un pequeño crecimiento tras la impresión, la calidad superficial es deficiente debido a la naturaleza del filamento cuyo manejo implica mucho cuidado.

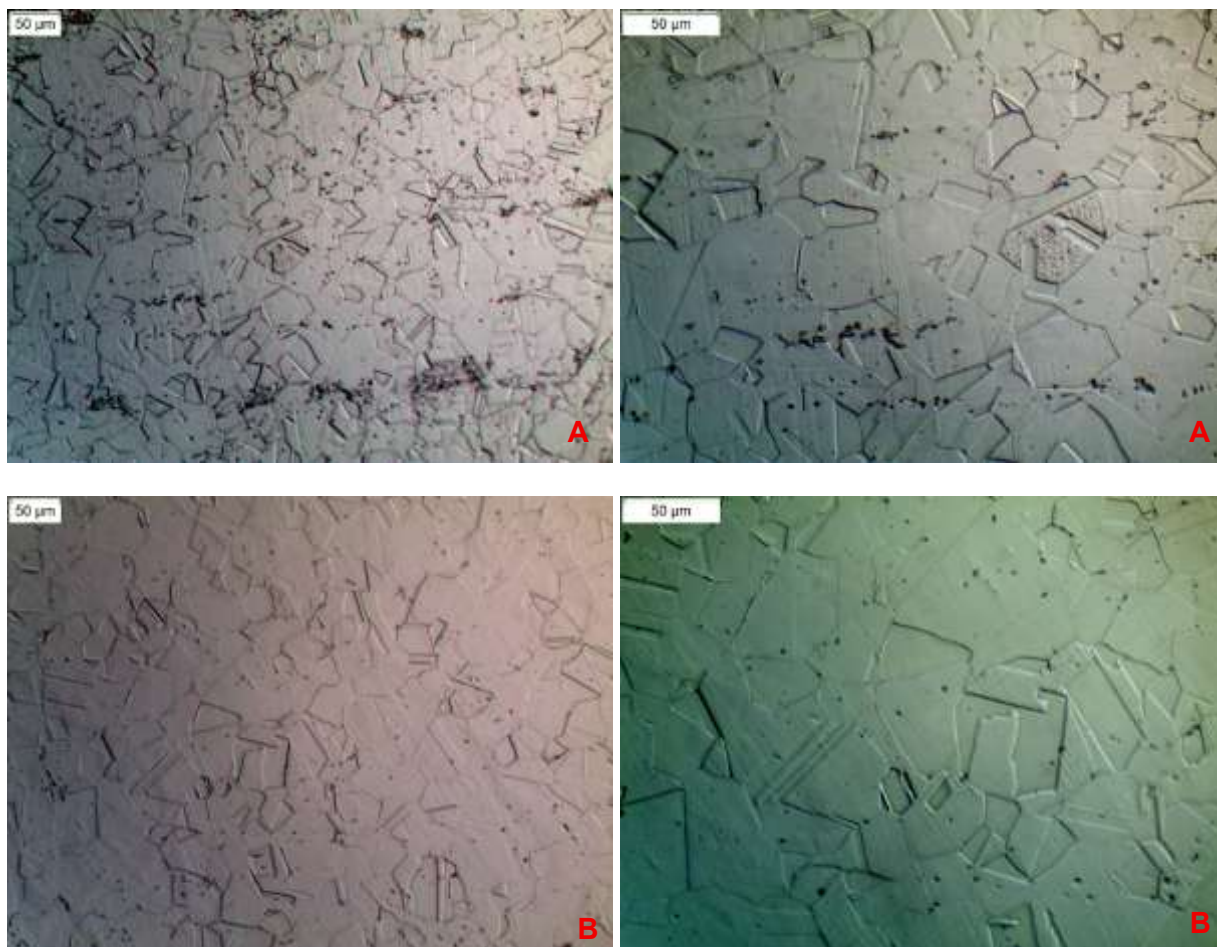
De acuerdo con el desagregado, se reduce una pequeña cantidad y para el sinterizado se muestra una notable diferencia con respecto al ancho, la razón de este fenómeno es que durante el desagregado la pieza queda inestable y al ser volumétrica el peso de las fibras superiores se deja vencer para asentarse en el crisol y finalmente tener un acabado plano en la cara inferior.

Microestructura de las piezas sinterizadas

En la **Figura 63**, la **Figura 64**, la **Figura 65** y la **Figura 66** se muestran las microestructuras obtenidas de lámina de acero inoxidable 316L con 3 mm de espesor, de varillas para soldadura ER316L de 3/32" (2,4 mm) y dos muestras de piezas sinterizadas.

Figura 63

Micrografía de plancha de acero inoxidable 316L

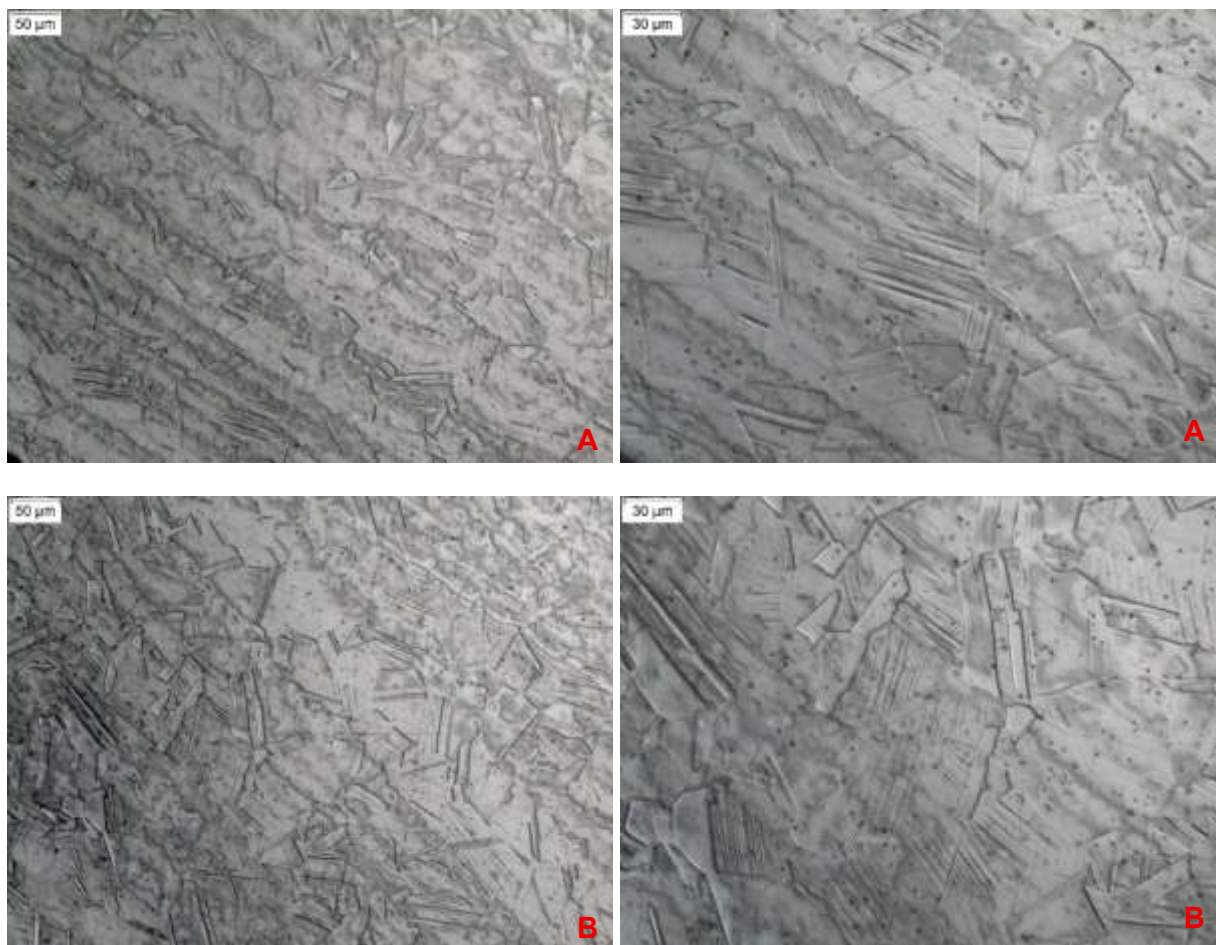


Nota. Micrografías con aumentos a 500x (izquierda) y 1000x (derecha).

En la **Figura 63** se puede observar una estructura puramente austenítica, los granos presentan un gran tamaño además de ser policristalinos con forma de polígonos irregulares lo cual reafirma que se trata de un material que atravesó el proceso de laminado. En las imágenes A y B a 100x se puede observar la líneas de maclas bien marcadas. Los límites de grano son claramente visibles y de color oscuro que significa una correcta preparación metalográfica y una buena respuesta al ataque químico. El material es altamente compacto y posee ciertos poros que pueden ser inclusiones de óxidos o sulfuros.

Figura 64

Micrografía de varilla de soldadura ER316L

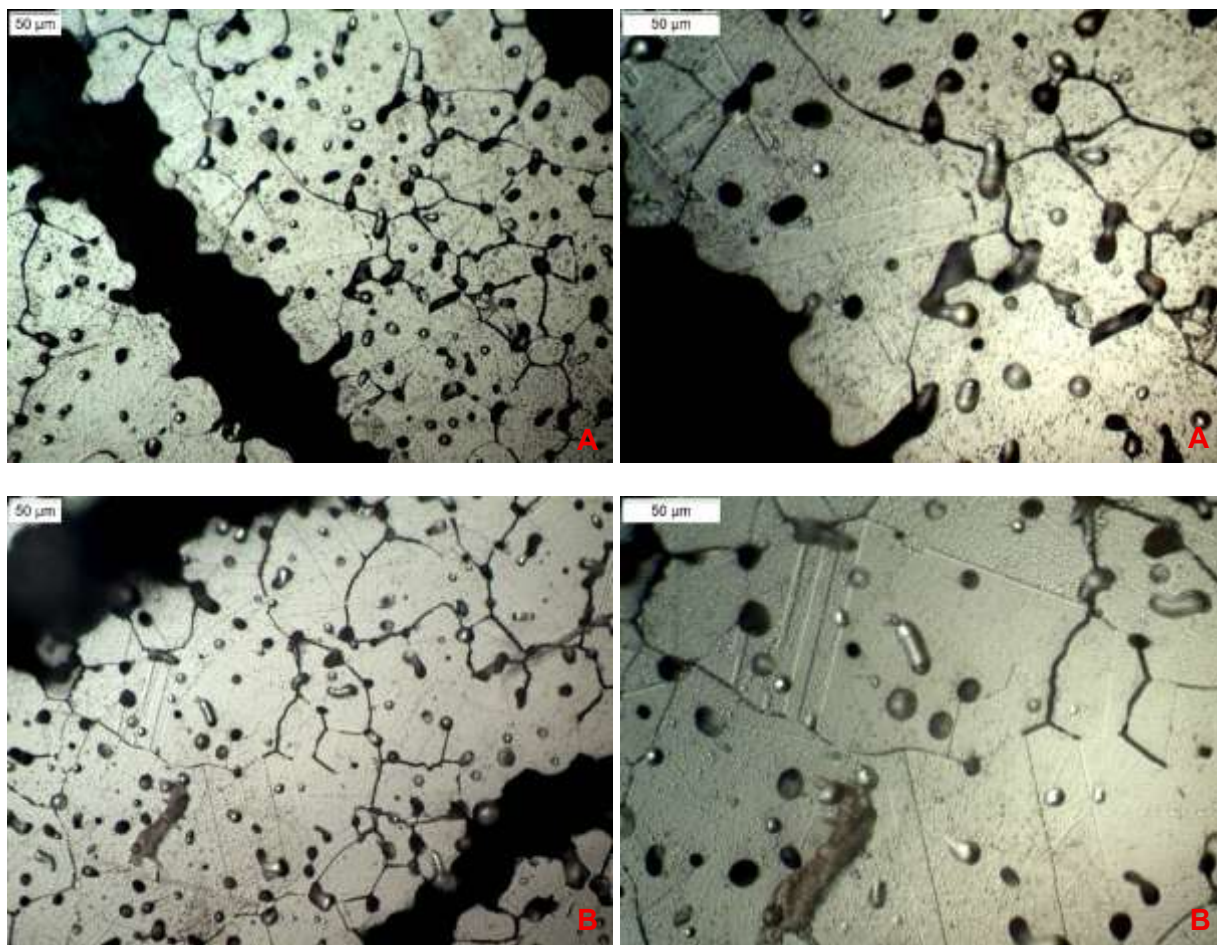


Nota. Micrografías con aumentos a 500x (izquierda) y 1000x (derecha).

En la **Figura 64**, imagen A se puede un fondo claro y continuo que indica una matriz austenítica en la cual contiene formas más alargadas de grano. En la imagen B a 100x hay una marcada formación de maclas de recocido. La forma más repetitiva de franjas alargadas indica algún proceso de estirado en la varilla.

Figura 65

Micrografía de Muestra 3 de probeta USFQ-1

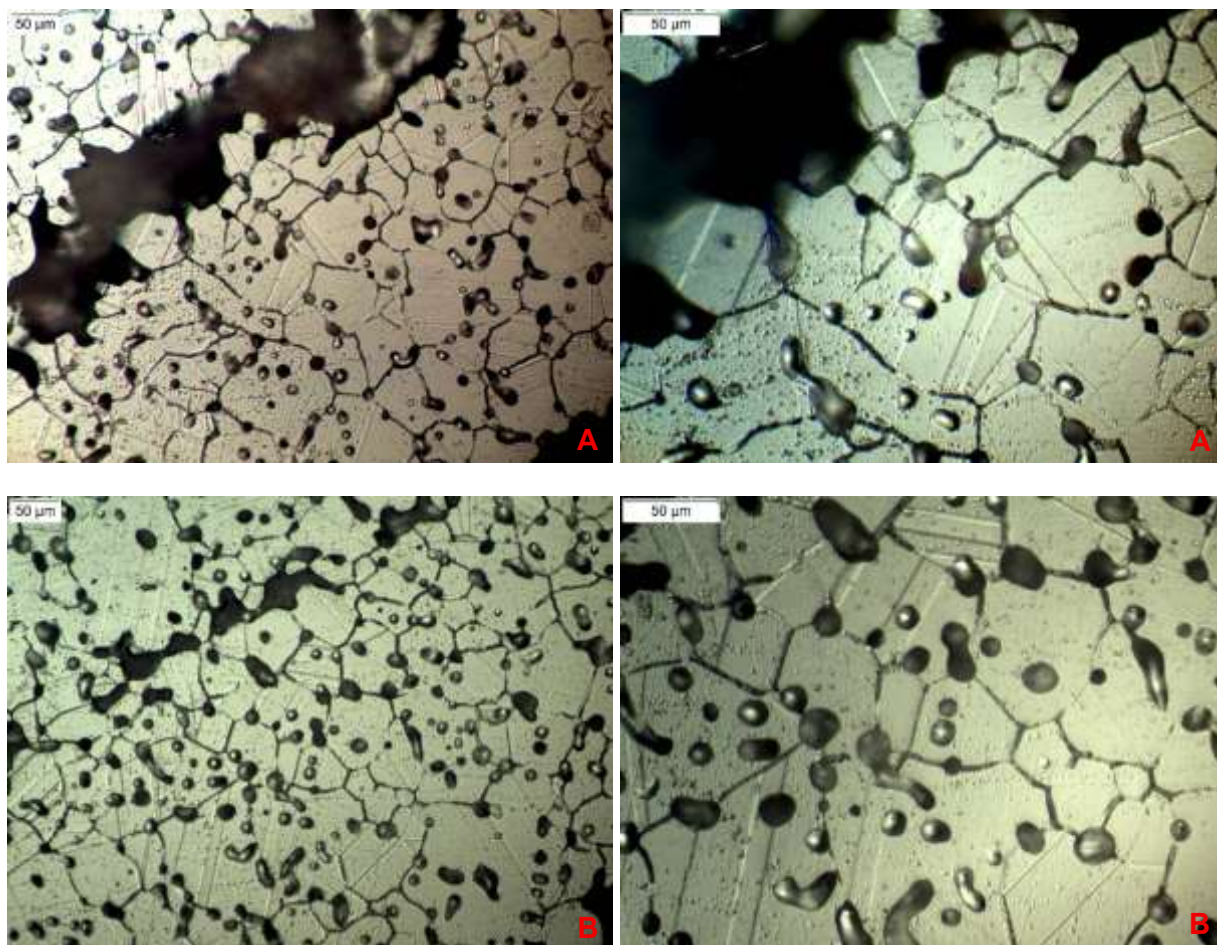


Nota. Micrografías con aumentos a 500x (izquierda) y 1000x (derecha).

En la **Figura 65** se observa la matriz de acero inoxidable 316L. la estructura austenítica es débil, los límites de grano son muy poco profundos, sin embargo presenta las líneas de maclas. Hay mucha presencia de orificios irregulares y redondos, esto puede ser resultado del gas atrapado durante el desagregado lo cual no permitió que haya una unión completa entre granos y por la misma razón, la estructura no es compacta. Hay grandes cavidades de color negro y muy irregulares.

Figura 66

Muestra 4 de probeta USFQ-1



Nota. Micrografías con aumentos a 500x (izquierda) y 1000x (derecha).

La estructura de la **Figura 66** se encuentra en una matriz austenítica sinterizada, presenta mucha porosidad con diversas zonas que muestran que las partículas no lograron unirse por completo en la sinterización formando grandes grietas. En las imágenes con aumento de 100x presentan maclas de recocido.

Tomando como punto de referencia la lámina de acero, posee estructuras compatibles con las piezas sinterizadas y las varillas como es la matriz austenítica y formaciones de maclas de recocido, sin embargo las piezas sinterizadas poseen muchas irregularidades en su granos

de gran tamaño además de las porosidades muy marcadas, la varilla de acero indica el haber sido expuesta a algún esfuerzo por sus estructuras alargadas.

Porosidad de las piezas sinterizadas.

La cuantificación de la porosidad volumétrica de las dos piezas se realizó mediante la toma y posterior procesamiento de veinte (20) micrografías utilizando el software ImageJ que dio como resultado de los valores correspondientes a la fracción de área.

De esta manera se calcula el promedio de las mismas dando así la porosidad volumétrica. Los resultados se justifican bajo el principio de Delesse que establece que la fracción de área vacía medida en una sección transversal plana es estadísticamente equivalente a la fracción de volumen vacío en el material tridimensional.

Para el caso del cubo E4.4 la resultante fue 9,44% procesando las micrografías, como ejemplo la **Figura 67**.

Figura 67

Micrografía procesada en ImageJ de E4.4



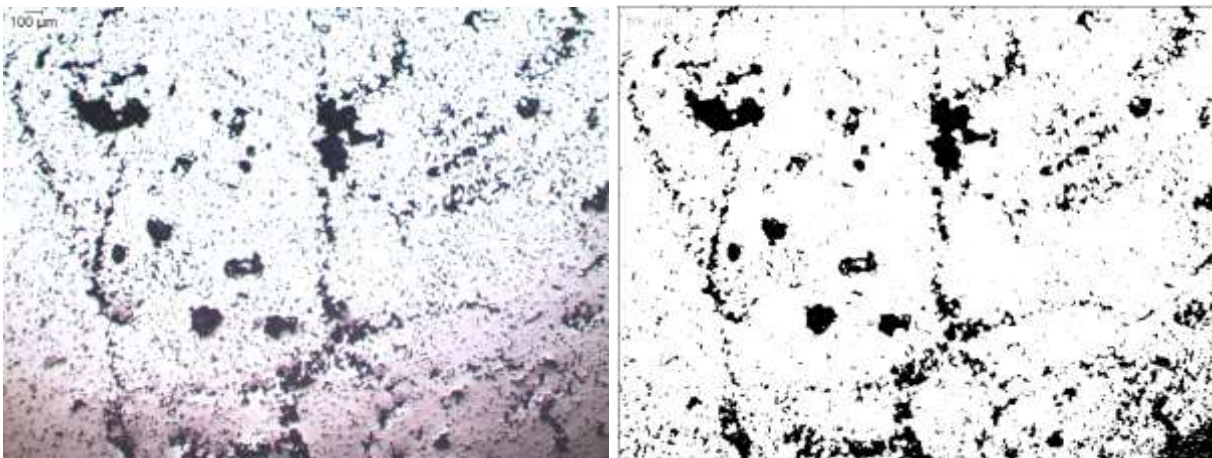
Nota. Micrografías con aumento de 100x y procesada por el software.

Dicho porcentaje indica que la pieza alcanzó una densidad del 90,56%, por ende el proceso de desagregado y sinterizado logró su objetivo que era eliminar el polímero para compactar el acero inoxidable hasta formar una pieza sólida con cierta cantidad de vacíos.

Para el cubo E5.5 el valor final fue de 24, 27% al analizar con el software las micrografía, como se muestra en la **Figura 68**.

Figura 68

Micrografía procesada en ImageJ de E5.5



Nota. Micrografías con aumento de 100x y procesada por el software.

El valor mencionado da como resultado un 75,73% de densidad en la pieza, esto quiere decir que se tiene una pieza sólida con alta cantidad de poros, es el resultado de falta de temperatura o tiempo dentro del horno ya que las partículas metálicas lograron unirse de manera superficial y no internamente como se deseaba.

Propiedades mecánicas del ensayo de tensión

Ultrafuse en verde

Para determinar el esfuerzo máximo capaz de lleva a una probeta en verde hecha de filamento Ultrafuse hasta su punto de ruptura plástica, se utilizó cinco probetas, cuyos resultados determinados en el ensayo se muestran en la **Tabla 47** y el gráfico correspondiente en la **Figura 69**.

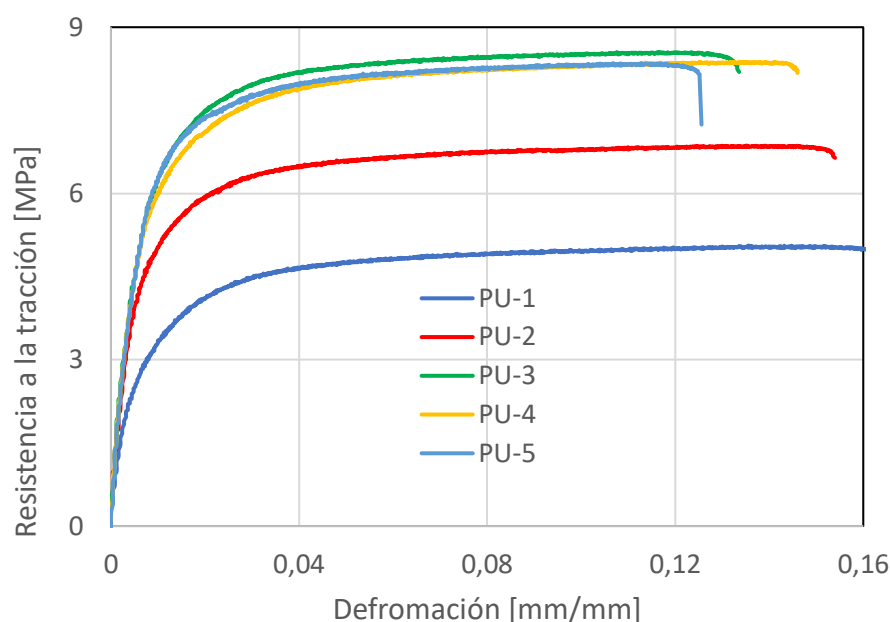
Tabla 47

Datos de ensayo a tensión de probetas PU (AC 0,2 AE 0,3)

	PU-1	PU-2	PU-3	PU-4	PU-5	Promedio
Resistencia a la tracción [MPa]	5,1	6,9	8,6	8,4	8,4	7,4
Deformación [mm/mm]	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1

Figura 69

Gráfico esfuerzo- deformación para las probetas de tensión PU (AC 0,2 ; AE 0,3)



El ensayo muestra una fractura abrupta debido a que las trayectorias de las curvas no muestran la zona de transición a la zona plástica por lo que se trata de un material frágil. Para la curva de PU-3 que es aquella que tuvo la mejor resistencia debido a que su esfuerzo máximo a la tracción es de 8, MPa. Su deformación última previo a la fractura es de aproximadamente 0,13 mm/mm.

En el caso de la curva de PU-1, es la que peor comportamiento mecánico tuvo hacia la resistencia, su esfuerzo máximo alcanzó aproximadamente los 5,1 MPa y 0,2 mm/mm de deformación.

Ultrafuse sinterizada

Uno de los resultados fundamentales se lo ensaya con probetas fabricadas con los parámetros base y sinterizadas que en este caso serán tres, es así que se obtuvo los valores de la **Tabla 48** junto con la gráfica de la **Figura 70**.

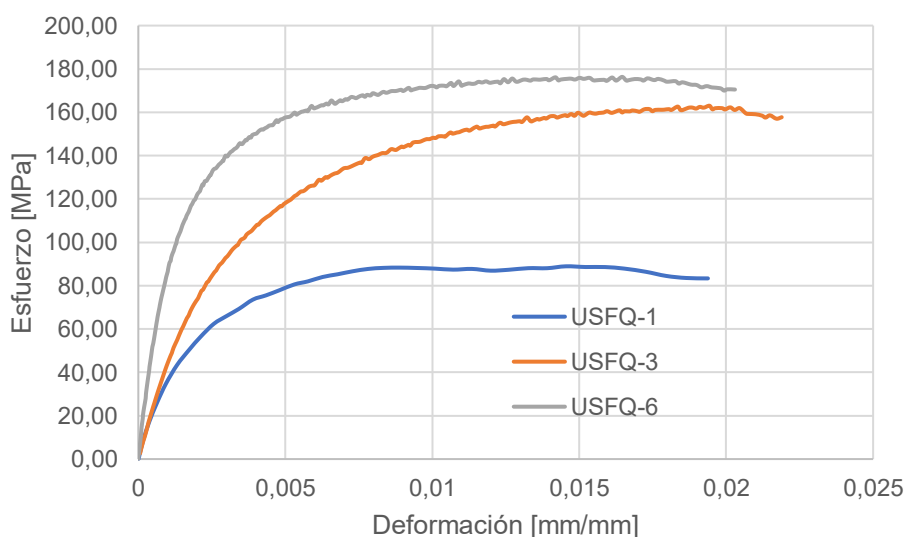
Tabla 48

Datos de ensayo a tensión de probetas USFQ (AC 0,2 AE 0,3)

	USFQ-1	USFQ-3	USFQ-6	Promedio
Resistencia a la tracción [MPa]	88,94	163,02	176,33	142,77
Deformación [mm/mm]	0,0611	0,0740	0,0615	0,0655

Figura 70

Gráfico esfuerzo - deformación para las probetas de tensión USFQ (AC 0,2 ; AE 0,3)



En relación con los parámetros base para el filamento Ultrafuse se obtuvo La probeta USFQ-6 cuya resistencia llegó hasta 176,33 MPa con una deformación de 0,06 mm/mm y por

el contrario la probeta USFQ-1 tuvo la menor resistencia de 88,94 MPa en conjunto con una formación de 0,06 mm/mm muy similar a la anterior. Este comportamiento se puede explicar ya que previo al ensayo se realizó un desbaste a la probeta USFQ-1 para eliminar desperfectos que puedan alterar el procedimiento, sin embargo fue el resultado de su baja resistencia.

Como próximo ensayo se probó cuatro probetas del grupo P2U cuyos valores resultantes se reflejan en la **Tabla 49** y la gráfica se encuentra en la **Figura 71**.

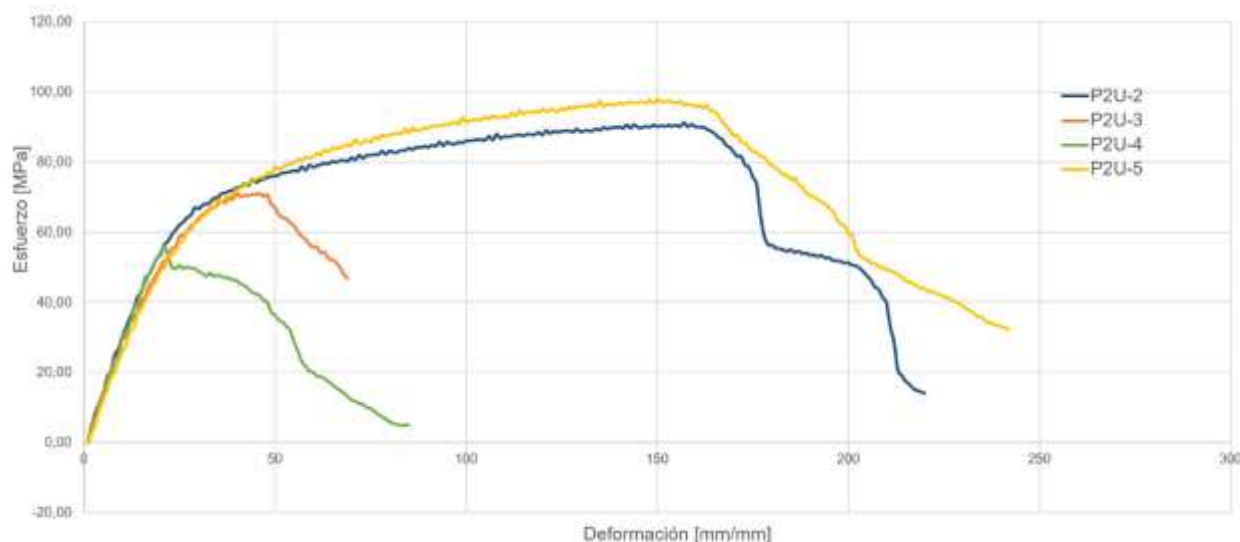
Tabla 49

Datos de ensayo a tensión de probetas P2U (AC 0,1 ; AE 0,4)

	P2U-2	P2U-3	P2U-4	P2U-5	Promedio
Resistencia a la tracción [MPa]	91,25	71,13	55,82	97,93	79,03
Deformación [mm/mm]	0,0242	0,0008	0,0007	0,0107	0,0091

Figura 71

Gráfico esfuerzo - deformación para las probetas con P2U (AC 0,1 ; AE 0,4)



Se muestra la conducta de la probeta P2U-5 que soportó 97,93 MPa y elongó su geometría hasta 0,01 mm/mm a diferencia de otras probetas de la misma serie como es el caso

de P2U-4 que soportó una carga mucho más baja de 55,82 MPa y una elongación casi imperceptible de 0,0007 mm/mm. No se le dio ningún tratamiento previo a ninguna pieza.

Como parte de analizar el comportamiento de más combinaciones de parámetros de impresión, se procedió a ensayar tres probetas del grupo P17U donde dio los valores de la **Tabla 50**, conjuntamente con la gráfica de la **Figura 72**.

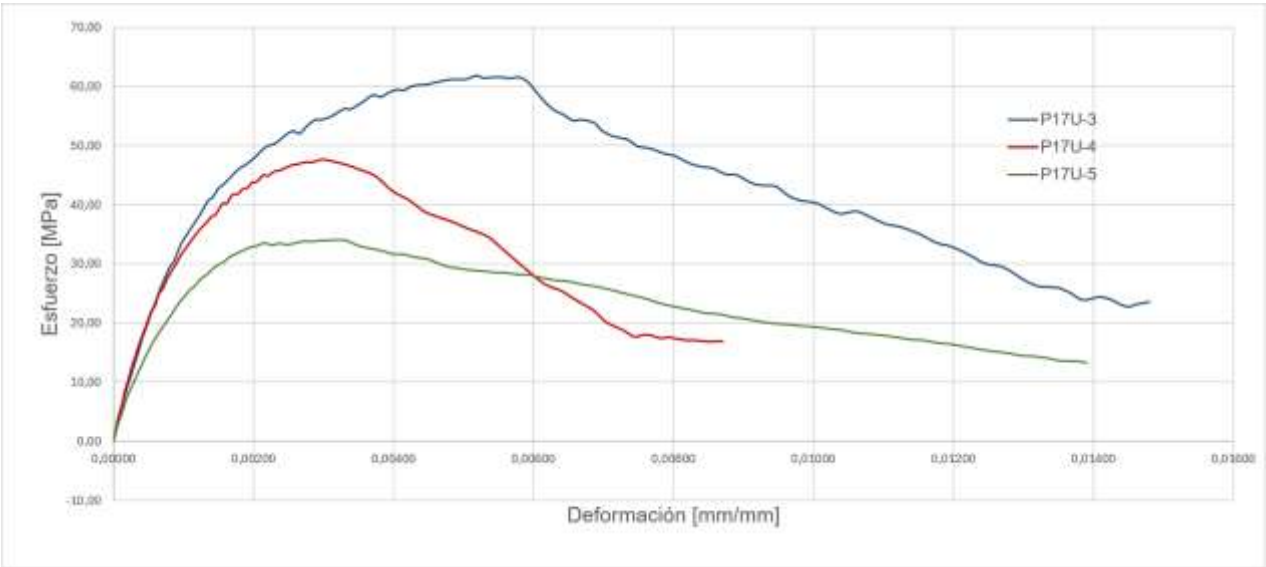
Tabla 50

Datos de ensayo a tensión de probetas P17U (AC 0,3 ; AE 0,2)

	P17U-3	P17U-4	P17U-5	Promedio
Resistencia a la tracción [MPa]	61,81	47,64	34,06	47,84
Deformación [mm/mm]	0,0148	0,0087	0,0139	0,0125

Figura 72

Gráfico esfuerzo- deformación para las probetas con P17U (AC 0,3 ; AE 0,2)



En este gráfico se encuentra la probeta P17U-3 que antes de su rotura soportó 61,81 MPa logrando aumentar su elongación hasta en 1,47%, la más destacable entre el

comportamiento del resto, pues en el caso de la probeta P17U-5 es capaz de elongar más su estructura a pesar de no soportar 34,06 MPa y con una elongación del 1,29%

Para finalizar con las combinaciones, se realizó pruebas en cuatro probetas del grupo P18U cuya información se encuentra en la **Figura 51** y la gráfica correspondiente en la **Figura 73**.

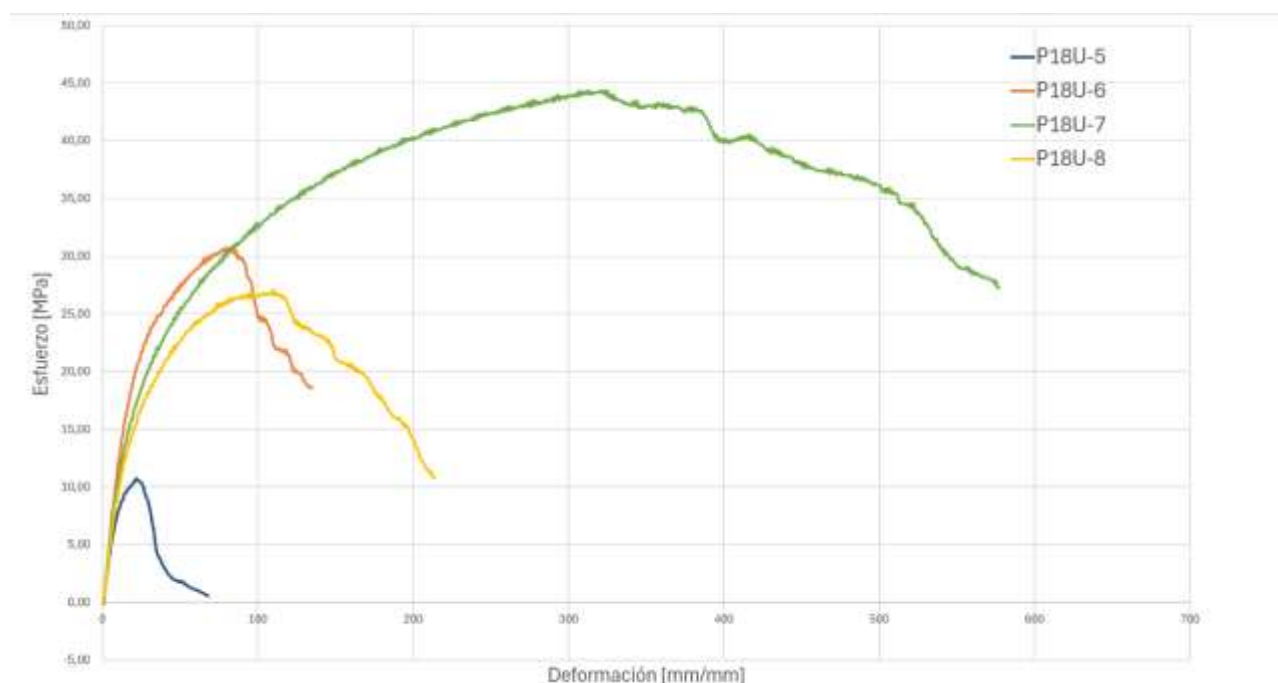
Tabla 51

Datos de ensayo a tensión de probetas P18U (AC 0,3 ; AE 0,4)

	P18U-5	P18U-6	P18U-7	P18U-8	Promedio
Resistencia a la tracción [MPa]	10,73	30,72	44,32	27,08	28,21
Deformación [mm/mm]	0,0007	0,0064	0,0669	0,0247	0,0247

Figura 73

Gráfico esfuerzo - deformación para las probetas con P18U (AC 0,3 ; AE 0,4)



La probeta P18U-7 es la más sobresaliente de la gráfica debido a su comportamiento en cuanto a la capacidad de aumentar su longitud en un 6,69% antes de la rotura para una carga de 44,32 MPa tomando en cuenta que las otras probetas tendían a un porcentaje menor como

el ejemplo de la probeta P18U-5 que solo pudo someterse a un esfuerzo de 10,73% antes de experimentar una rotura con una elongación breve.

En definitiva, las probetas producidas con los parámetros base para Ultrafuse del grupo USFQ tuvieron un mejor comportamiento mecánico, esto puede deberse a una correcta unión entre capas en el sinterizado.

Virtual Foundry en verde

Por otro lado se imprimió cuatro probetas con el filamento Virtual Foundry con los parámetros fundamentales y para posteriormente analizar su comportamiento. Así se resume los resultados en la **Tabla 52** y la gráfica resultante en la **Figura 74**.

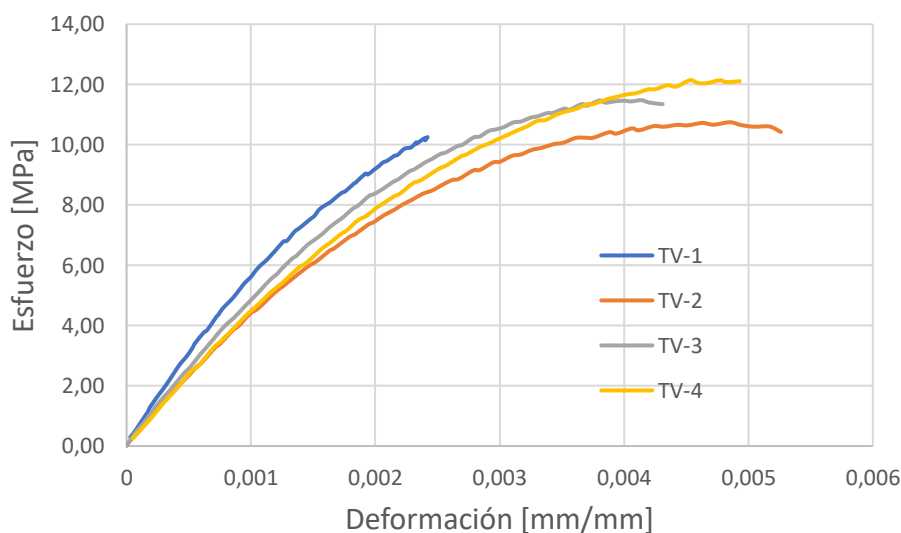
Tabla 52

Datos del ensayo de tensión para las probetas en verde de Virtual Foundry

	TV-1	TV-2	TV-3	TV-4	PROMEDIO
Resistencia a la tracción [MPa]	10,25	10,75	11,48	12,14	11,16
Deformación [mm/mm]	0,0024	0,0063	0,0045	0,0050	0,0045

Figura 74

Gráfico esfuerzo- deformación para las probetas en verde de Virtual Foundry



El ensayo requirió de cuatro probetas donde la TV-4 se destaca por su capacidad de resistir 12,14 MPa y estirar su geometría en un 0,5%. Por otro lado también se encuentra a la TV-1, cuya poca capacidad se refleja en los 10,25 MPa y en tener una elongación mínima de 0,0024 mm/mm.

Queda así determinado que la probeta con más capacidad de soportar una carga más alta en su estado en verde, es aquella fabricada con el filamento Virtual Foundry utilizando los parámetros fundamentales.

Material base acero inoxidable 136L

Con el propósito de comparar las piezas sinterizadas con las extraídas del material base, se realizó el ensayo de estas últimas con una cantidad de tres especímenes y así se obtuvo la

Tabla 53 y la **Figura 75**.

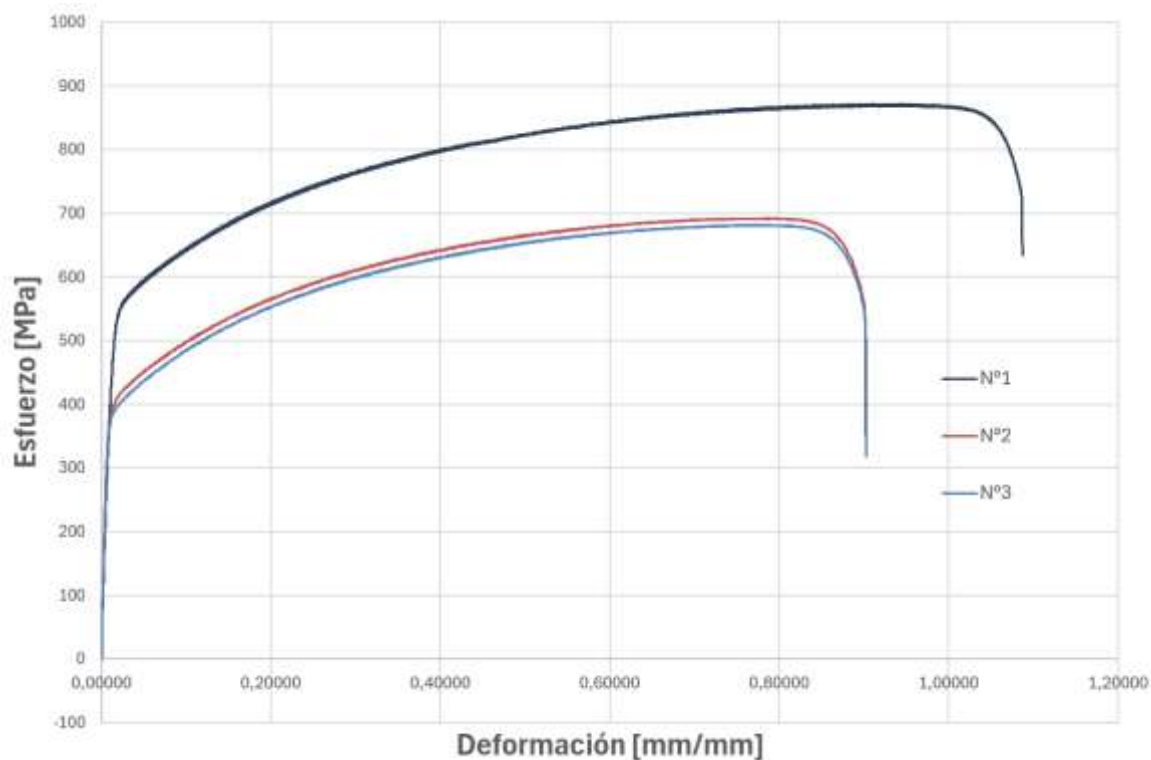
Tabla 53

Datos para las probetas de ensayo de tensión del material base 316L.

	N°1	N°2	N°3	Promedio	Desviación estándar
Resistencia a la tracción [MPa]	871,64	692,23	681,49	748,45	106,8206
Deformación [mm/mm]	1,0872	0,9020	0,9024	0,9639	0,1068

Figura 75

Gráfico esfuerzo- deformación para las probetas fabricadas con el material base 316L



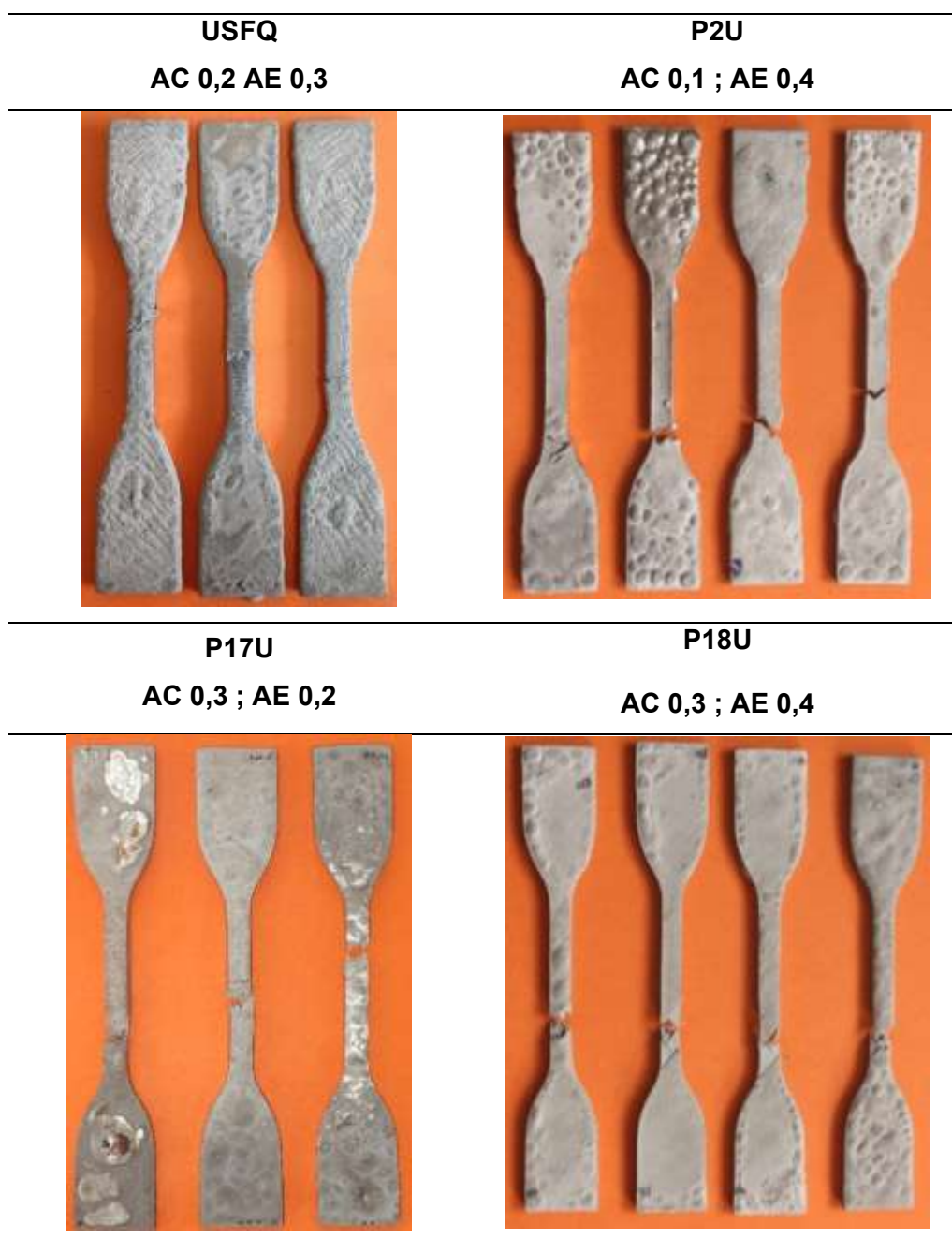
Es claro que al tratarse de un material compacto va a poseer mejores propiedades mecánicas como es este caso que representa gráficamente el comportamiento de este material. Sobresale la probeta N°1 cuya resistencia llega hasta los 871,64 MPa junto con una elongación del 108,72%, superando a los ensayos de las probetas sinterizadas.

Tipo de falla en el ensayo de tensión.

Una vez sometidas las probetas al ensayo de tensión, se observó el tipo de falla que se produjo en la sección reducida, se esta forma por medio de su geometría se validó la calidad de la pieza. En la **Tabla 54** se observan las probetas sinterizadas con su respectiva falla.

Tabla 54

Fallas en probetas sinterizadas



Según se puede divisar en la imágenes, todas las probetas experimentaron una falla de tipo frágil debido a que durante el ensayo la deformación plástica fue mínima, no se observó la estricción de la sección reducida de las probetas y por ende el alargamiento se considera mínimo, prácticamente conservando la geometría original de la pieza. Bajo la aplicación de la

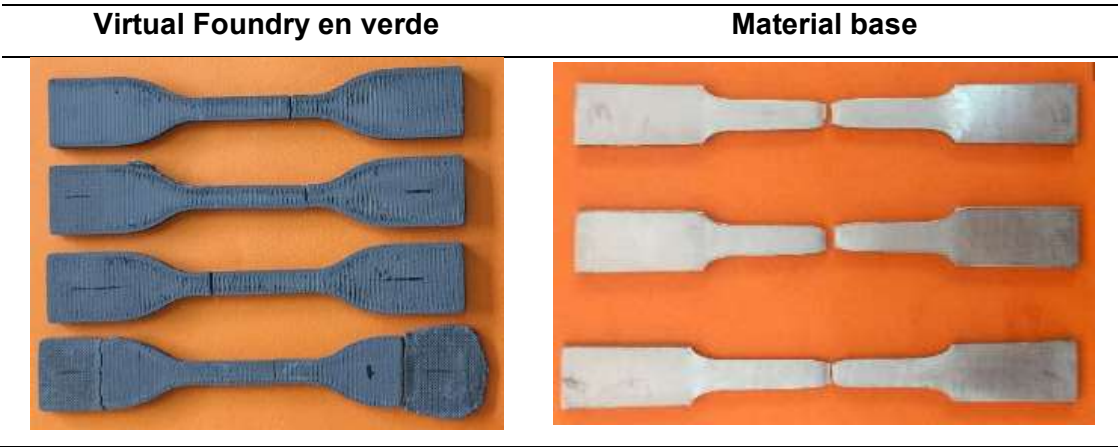
carga, la fractura tuvo una rápida propagación provocando que el esfuerzo máximo de tracción y el punto de fractura ocurran prácticamente al mismo tiempo y en el mismo lugar.

Generalmente la rotura ocurre dentro de la sección reducida, sin embargo, algunas probetas fallaron afuera de este límite, cerca de la zona en la que se coloca el extensómetro, la razón fue la formación de ampollas las cuales funcionaron como concentradores de esfuerzos.

Por otro lado se tiene a las probetas en verde y de material base en la **Tabla 55** que experimentaron tal falla dentro de la zona de deformación plástica.

Tabla 55

Fallas en probetas en verde y material base



Por las imágenes representadas se puede identificar que las probetas en verde sometidas al ensayo de tracción obtienen una falla frágil ya que su ruptura tiene una geometría lisa que ocurrió de manera repentina. Por la parte del material base tiene claramente una falla dúctil debido a la formación de “copa y cono”, además que durante el ensayo, estas piezas atravesaron una deformación plástica controlada hasta alcanzar el punto de la ruptura.

Resultados de los ensayos de dureza

Microdureza

En la **Tabla 56** se muestra los resultados arrojados por el software del ensayo de dureza Vickers (HV) que calculó de forma automática las conversiones a las escalas de dureza

Rockwell B (HRB) y Rockwell C (HRC). El uso de estas equivalencias se aplicó selectivamente dependiendo de si la densidad de la pieza admitía los límites operativos de cada escala.

Tabla 56

Datos de microdureza de las muestras

Probeta		HV	HR	Escala
1. Muestra 1	Fragmento probeta de tensión USFQ	139,0	75,7	B
2. Muestra 2	Fragmento probeta de tensión USFQ	135,9	73,6	B
3. P2U-1	Fragmento de probeta de tensión	90,4	50,6	B
4. P18U-2	Fragmento de probeta de tensión	201,9	92,3	B
5. Cubo E4.3	Fragmento de cubo	346,0	35,5	C
6. Cubo E4.4	Fragmento de cubo	417,2	42,7	C

De acuerdo con los datos de la **Tabla 56** se establece que las probetas 1 y 2 que son sinterizadas han tenido valores similares que indican que se trata de un material suave debido al tipo de escala utilizado, sin embargo al ser un valor relativamente alto indica que hubo un correcto procedimiento de sinterización y se ha logrado densificar el material de manera aceptable. Presenta buena ductilidad y baja resistencia a deformaciones superficiales.

La probeta 3 resultó con valores bajos que indica una pobre sinterización, posible presencia de porosidad entre capas, producto del escape de gases durante el desagregado. Presenta una baja densificación y por ende baja resistencia a la deformación.

De acuerdo con el análisis de la probeta cuatro posee un valor alto con respecto a las anteriores probetas del filamento Ultrafuse, indica una alta densificación, menor cantidad de espacios entre capas. Predice una buena resistencia al desgaste y a la deformación plástica.

Para las probetas 5 y 6 fabricadas con el filamento Virtual Foundry, la microestructura resulta endurecida, su densificación es muy buena y la poca presencia de porosidad indican un buen procedimiento de sinterizado. Pronostica una alta resistencia al desgaste y a las deformaciones plásticas.

Macro dureza

En la **Tabla 57** se muestra los resultados del ensayo de dureza Rockwell utilizando las escalas B (HRB) y Rockwell C (HRC). De igual manera, su uso dependió de la resistencia mecánica de cada pieza, por lo que cuando se obtenía un valor muy bajo en la escala B, se utilizó la escala C.

Tabla 57

Datos de macro dureza de las muestras

Probeta	HR	Escala
1. Muestra 1	67	B
2. Muestra 2	97	B
3. P2U-1	39	B
4. P18U-2	68	B
5. Cubo E4.3	13	C
6. Cubo E4.4	33	C

La probeta 1 presenta una dureza media que de acuerdo con los datos de la microdureza, es casi uniforme a lo largo de la pieza, posee una buena resistencia para soportar cargas moderadas y es relativamente dúctil.

La probeta 2 indicó un valor superior a su ensayo en escala micro, lo que certifica una buena densificación producto del sinterizado, reflejando una buena resistencia global.

En el caso de la probeta 3 certifica que es una pieza blanda por la baja dureza superficial y global, tiene una baja consolidación de capas con alta capacidad de deformación.

La macrodureza de la probeta 4 está en un nivel medio, lo que indica un endurecimiento más marcado globalmente mientras que a escala micro señala presencia de porosidad.

Para la probeta 5 se ratifica la alta consolidación de esta pieza alta en dureza, se evidencia la presencia de una alta densidad y resistencia. La probeta 6 que posee las características similares, posee una buena correlación entre sus escala estudiadas, su microestructura es homogénea, densidad elevada y alta resistencia a las deformaciones.

Resultado de las pruebas de corrosión

Las cuatro probetas utilizadas para las pruebas de corrosión tuvieron dimensiones similares por tanto la corriente aplicada a cada una en el ensayo de corrosión fue parecida como se muestra en la **Tabla 58**.

Tabla 58

Medidas de probetas para ensayo de corrosión

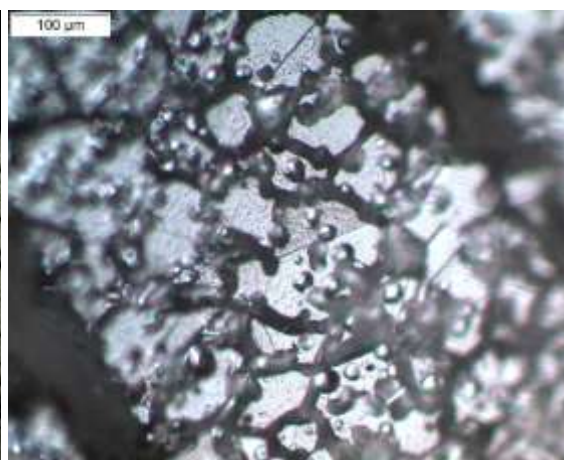
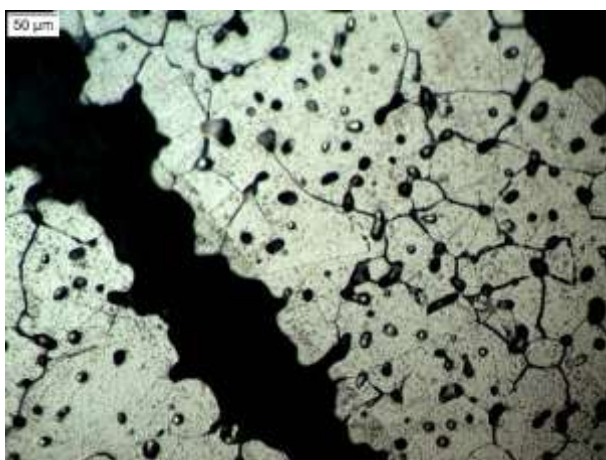
Probeta	Longitud [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Corriente [A]
1. Muestra 3 de USFQ-1	16	11	3,30	5,31
2. Muestra 4 de USFQ-1	16,80	11,64	3,34	5,82
3. Probeta 1 – 316L	15,90	10,88	2,80	4,96
4. Probeta 2 – 316L	15,86	10,86	2,76	4,91

Posterior al ensayo se analiza los mismos sitios donde se realizó la macrografía y se obtuvo la relación de las figuras a continuación. Estas se van a contrastar con las imágenes proporcionadas en la norma ASTM A262.

Para examinar las probetas sinterizadas se observa la **Figura 76** y la **Figura 77**.

Figura 76

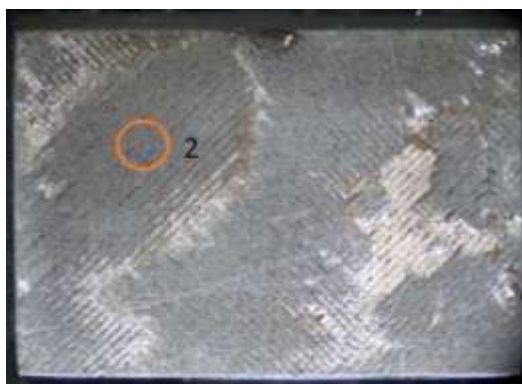
Microestructura de la Muestra 3

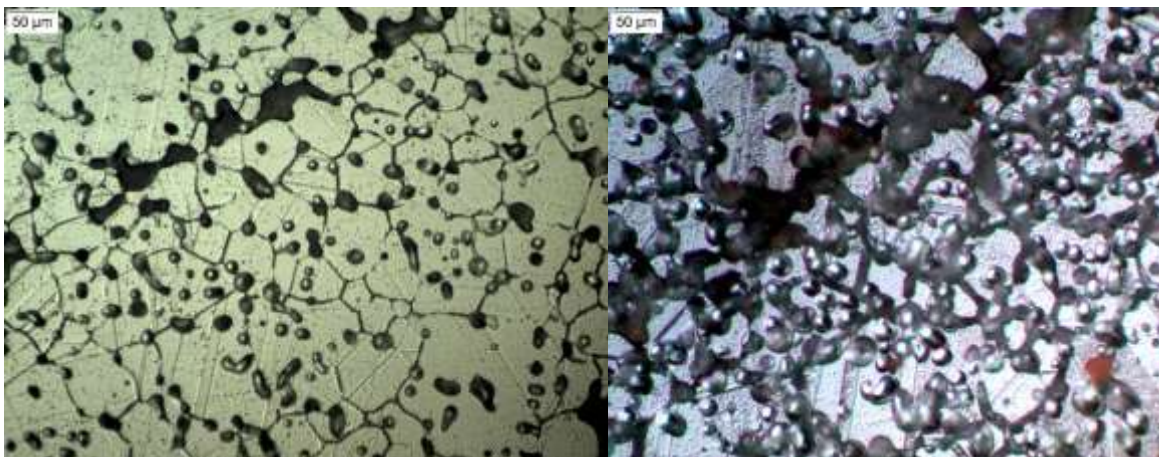


Nota. Imágenes tomadas con aumentos 500x.

Figura 77

Microestructura de la Muestra 4





Nota. Imágenes tomadas con aumentos 500x.

Tanto la Muestra 3 como la Muestra 4 muestran estructuras en zanjas que se catalogan como sospechosas debido a tener sus granos completamente rodeados de zanjas profundas y oscuras, varios granos carecen totalmente de conexión entre otros dando una apariencia de desprendimiento de la matriz. El cromo presente en los granos ha sido extraído hacia los límites de grano, lo que generó precipitación de carburos de cromo y empobreció a las zonas adyacentes a los bordes.

En cuando al material base se tomaron las micrografías de la **Figura 78** y la **Figura 79**.

Figura 78

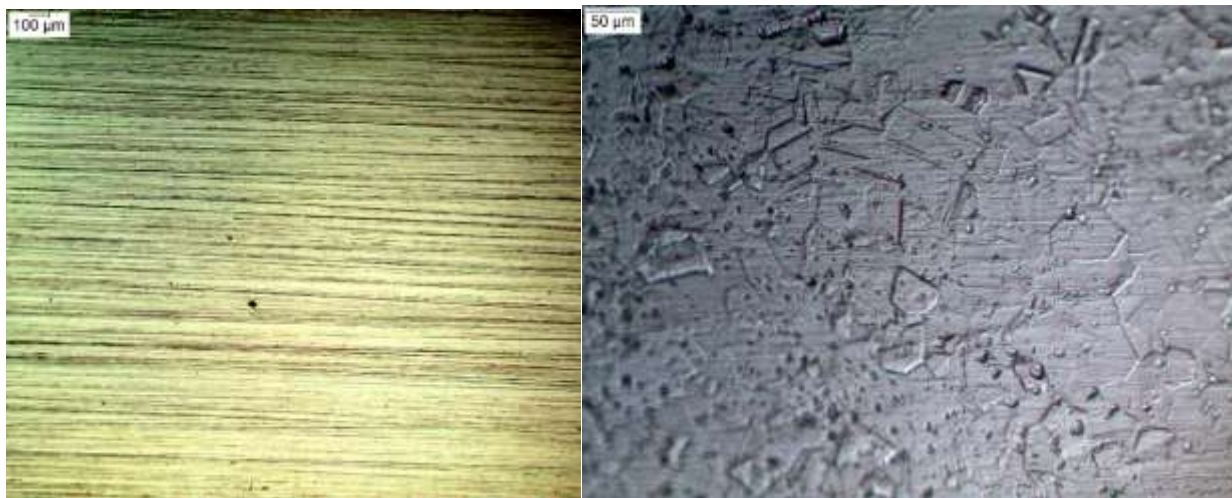
Microestructura de la Probeta 1 – 316L



Nota. Imágenes tomadas con aumentos 100x y 500x.

Figura 79

Microestructura de la Probeta 2 – 316L



Nota. Imágenes tomadas con aumentos 100x y 500x.

Las imágenes de las probetas 1 y 2 del material acero inoxidable 316L revelan una estructura de ataque clasificada como escalonada y determinada como aceptada por la normativa. El ataque no generó excavaciones a lo largo de los límites de grano, por lo que el ácido estuvo limitado a disolver el material de acuerdo con la orientación de cada cristal, por lo que genera una estructura tridimensional en forma de escalones. Adicionalmente hay presencia de una precipitación transgranular de las partículas contenidas en los granos, sin embargo, sus fronteras permanecen intactas.

CAPÍTULO VI

Conclusiones y Recomendaciones

El presente trabajo de integración curricular cumplió con la caracterización dimensional, mecánica, microestructural y corrosiva de piezas y probetas desagregadas y sinterizada a base de filamentos poliméricos de alta carga metálica de acero inoxidable 316L. Los principales hallazgos específicos son:

Caracterización Mecánica

Tensión

Las probetas en verde, del filamento Ultrafuse presentaron una resistencia desde 5,1 MPa hasta 8,6 MPa con una deformación desde 0,1 mm/mm hasta 0,2 mm/mm, mientras que del Virtual Foundry alcanzaron una resistencia desde 10,25 MPa hasta 12,14 MPa con una deformación desde 0,0024 mm/mm hasta 0,0063 mm/mm.

En cuanto a las probetas sinterizadas, las del filamento Ultrafuse alcanzaron una resistencia en el rango de 28,21 MPa a 142,77 MPa junto con una deformación de 0,0247 mm/mm a 0,066 mm/mm. Esto demuestra, por una parte que la combinación de parámetros puede influir en sus propiedades mecánicas y ,por otra parte, debido a que el metal sinterizado 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. Tanto las probetas en verde como sinterizadas tuvieron un comportamiento frágil.

Dureza

Las probetas de Virtual Foundry obtuvieron los valores más altos en microdureza de 42,7 HRC y en macrodureza de 33 HRC, que a comparación del material base, posee una durezas similares, lo que indica buena densificación durante la etapa del sinterizado, superando a las probetas fabricadas con Ultrafuse que presentaron una dureza entre 50,6 y 92,3 en escala HRB.

Microestructura

El material base de acero 316L en placa obtuvo granos policristalinos de gran tamaño y con formas poligonales irregulares con marcadas maclas y poca cantidad de poros. La microestructura de las probetas de varillas de soldadura ER316L, muestran el efecto de su procesamiento mecánico con granos orientados y alargados que en comparación con las probetas sinterizadas, cuya estructura es similar al metal base de la placa con excepción de la gran cantidad de poros que presenta. Esto puede deberse al efecto de los ciclos térmicos que no lograron una consolidación óptima y principalmente el desagregado tuvo gran influencia en la formación de porosidades por el escape de gases del polímero y aglutinantes.

Porosidad

La cuantificación de la porosidad reveló que la pieza de Virtual Foundry presentó la cantidad más baja con un 9,44% ya que equivale a un 90,56% de densidad, mientras que el sinterizado del Ultrafuse mostró una porosidad de 24, 27%. Esto indica que los ciclos térmicos aplicados al filamento Virtual Foundry fueron los más efectivos para eliminar la matriz polimérica y consolidar la pieza de acero inoxidable. Este resultado está en concordancia pues esta pieza obtuvo mayores valores de dureza, por lo que se puede establecer que la densidad es un indicador de calidad relevante y pudiendo influir en el comportamiento mecánico de las piezas.

Caracterización Dimensional y de calidad

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 de altura de capa y ancho de extrusión se determinó que la mejor fue altura de capa 0,2 mm y ancho de extrusión 0,4 mm.

En cuanto al cambio dimensional, las piezas sinterizadas con el filamento de Ultrafuse, experimentaron reducciones casi uniformes para cada eje, del 13% en X y Z, y un 12% en Y,

obteniendo un promedio global del 13%. Este resultado considerablemente menor al recomendado por el fabricante de 20%. Mientras tanto la piezas sinterizadas con el filamento Virtual Foundry evidenciaron reducciones próximas al 10% en todos sus ejes, por esto se puede concluir que el porcentaje establecido por el fabricante es correcto.

Caracterización Corrosiva

Las probetas sinterizadas mostraron alrededor de los bordes de grano zangas negras y profundas lo que difiere de los bordes de grano del metal laminado de referencia de acero inoxidable 316L, que también se sometió a la prueba corrosiva. Esto mostraría una mayor susceptibilidad de las piezas sinterizadas al ataque corrosivo. Posiblemente debido al enfriamiento lento de los ciclos térmicos aplicados.

Conclusiones generales

El modelado por deposición fundida (FDM) con el uso de filamentos de alta carga metálica, desagregado y sinterizado, es un método viable para la fabricación de piezas metálicas, siempre que exista una correcta sincronía entre los parámetros de impresión y los de procesos de postprocesado. La correcta ejecución de cada una de estas etapas garantiza alta densidad en el material y un buen desempeño corrosivo y mecánico. No obstante, este último supone una limitante para esta tecnología porque aún representa un porcentaje bajo de la capacidad real del material base, haciendo evidente la necesidad de seguir optimizando los parámetros de impresión.

A pesar de que el filamento Virtual Foundry logró buenas características en determinadas de dureza y compactación, sin embargo, resulta un filamento 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

Una vía para un mejor acabado post sinterizado es la optimización del desagregado para tener un escape del gases más controlado y un sinterizado más prolongado que permitirá la difusión atómica en mayor medida.

Adoptar la combinación denominada P9 que resultó con la mejor calificación y uno de los despegues más fáciles de la cama, aplicar el aumento dimensional de 13% global y proceder con las pruebas de desagregado y sinterizado al vacío.

En ocasiones se apreció una curvatura en la cara inferior de las probetas en verde que puede verse generada por los pequeños espacios que hay en la balsa ya que no permiten un pegado completo del filamento, a su vez el filamento es propenso a la contracción térmica durante su enfriamiento ya que sale de cierta temperatura del extrusor y se encuentra con una temperatura de la cama inferior. Para contrarrestarlo se podría subir la temperatura de cama o reducir los espacios en la balsa.

Referencias

- Álvaro, Ó., & Ferrero, C. (2013). *DISEÑO Y PUESTA A PUNTO DE UN SISTEMA DE VACÍO PARA SINTERIZACIÓN DE PROBETAS PULVIMETALÚRGICAS DE ACERO INOXIDABLE*. Universidad de Valladolid.
- AMETEK. (n.d.). *Surgical Implant 316L • UNS S31673 • WNR 1.4441*. Retrieved June 27, 2026, from <https://www.finetubes.co.uk/products/materials/stainless-steel-tubes/surgical-implant-316l-uns-s31673-wnr-14441>
- An, A. Q., Kai, D. Q., Lee, P., & O'Neill, G. K. (2021). Point-of-Care 3D Printing: A Feasibility Study of Using 3D Printing for Orthopaedic Trauma. *Injury*, 52(11), 3286–3292. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2021.02.041>
- ASTM International. (2013). *ASTM E8/E8M - Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-13A
- ASTM International. (2015). *A262 – 15 - Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/A0262-15>
- ASTM International. (2016). *ASTM E1245-03 - Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1245-03R16>
- ASTM International. (2017a). *ASTM B962-17 - Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes Principle*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/B0962-17>
- ASTM International. (2017b). *ASTM E3 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0003-11R17>
- ASTM International. (2017c). *ASTM G171-03 - Test - Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/G0171-03R17>
- ASTM International. (2018). *ISO 6507: 1 - Metallic materials — Vickers hardness test*.

- ASTM International. (2021). *ASTM G31-21 - Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/G0031-21>
- ASTM International. (2022). *ASTM B923-22 - Test Method for Metal Powder Skeletal Density by Helium or Nitrogen Pycnometry*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/B0923-22>
- BASF. (n.d.). *Ultrafuse - Metal Filaments - User Guidelines for 3D Printing Metal Parts*. Retrieved www.forward-am.com
- BASF. (2019). *Safety data sheet-Ultrafuse 316L*.
- Cárdenas, F. (2025). *Determinar el comportamiento viscoelástico de polímeros con alta carga metálica de acero inoxidable 316L impresos por 3D-FDM*. Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE."
- Carminati, M., Quarto, M., D'urso, G., Giardini, C., & Borriello, C. (2022). A Comprehensive Analysis of AISI 316L Samples Printed via FDM: Structural and Mechanical Characterization. *Key Engineering Materials*, 926 KEM, 46–55. <https://doi.org/10.4028/p-szzd04>
- CEFAM. (n.d.). *Historia de la Fabricación Aditiva*. Retrieved June 20, 2026, from <https://www.aidimme.es/plataforma/cefamweb/historia.asp>
- Cisneros Loja, F. J., Velasco Paredes, L. J., García Cabezas, E. F., & Moyano Alulema, J. C. (2025). Modelado del proceso de producción para prótesis de extremidades superiores aplicando sistemas de manufactura flexible. *Ingenium et Potentia. Revista Electrónica Multidisciplinaria de Ciencias Básicas, Ingeniería y Arquitectura*, 7(13), 60–80. <https://doi.org/10.35381/I.P.V7I13.4766>
- CSAL. (2024). *Product description and user manual*.
- Forward AM. (n.d.). *Ultrafuse 316L 3D Printer Metal Filament*. Retrieved June 20, 2026, from <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/metal-filaments/ultrafuse-316l/>

- Gonzalez-Gutierrez, J., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C., Sapkota, J., & Holzer, C. (2018, May 18). Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives. *Materials*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/ma11050840>
- GW INSTEK. (n.d.). *GPC-3030D GW INSTEK*. Retrieved July 13, 2026, from <https://mexico.newark.com/gw-instek/gpc-3030d/power-supply-bench-adj-3o-p-30v/dp/86K0359>
- Hassan, W., Farid, M. A., Tosi, A., Rane, K., & Strano, M. (2021). The effect of printing parameters on sintered properties of extrusion-based additively manufactured stainless steel 316L parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(9–10), 3057–3067. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07047-w>
- INSTRON. (2024a). *2620-600 Series Dynamic Strain Gauge Extensometers*.
- INSTRON. (2024b). *8801 SERVOHYDRAULIC FATIGUE TESTING SYSTEM*.
- International Organization for Standardization. (2013). *Specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/F0138-13A>
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 16859-1:2015 - Metallic materials — Leeb hardness test — Part 1: Test method*. <https://www.iso.org/standard/57828.html>
- International Organization for Standardization. (2019). *Additive manufacturing-Test artifacts-Geometric capability assessment of additive manufacturing systems Fabrication additive-Pièces types d'essai-Évaluation de la capacité géométrique des systèmes de fabrication additive*.
- International Organization for Standardization (ISO), & ASTM International. (2021). *Additive manufacturing-General principles-Fundamentals and vocabulary (ISO/ASTM 52900:2021)*. <https://www.iso.org/standard/74514.html>

- Kluczyński, J., Jasik, K., Łuszczek, J., Sarzyński, B., Grzelak, K., Dražan, T., Joska, Z., Szachogłuchowicz, I., Płatek, P., & Małek, M. (2023). A Comparative Investigation of Properties of Metallic Parts Additively Manufactured through MEX and PBF-LB/M Technologies. *Materials* 2023, Vol. 16, Page 5200, 16(14), 5200.
<https://doi.org/10.3390/MA16145200>
- Kurose, T., Abe, Y., Santos, M. V. A., Kanaya, Y., Ishigami, A., Tanaka, S., & Ito, H. (2020). Influence of the layer directions on the properties of 316L stainless steel parts fabricated through fused deposition of metals. *Materials*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/ma13112493>
- Lokesha, K. (2019). *Metal Filament 3D Printing of SS316L-Focusing on the printing process*. KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- Lotfizarei, Z., Mostafapour, A., Barari, A., & Jalili, A. (2024a). Analysis of Metal Fused Filament Fabrication process chain for 316L stainless steel. *Manufacturing Letters*, 41, 1022–1033.
<https://doi.org/10.1016/J.MFGLET.2024.09.127>
- Lotfizarei, Z., Mostafapour, A., Barari, A., & Jalili, A. (2024b). Manufacturing Letters Analysis of Metal Fused Filament Fabrication Process Chain for 316L Stainless Steel. *Manufacturing Letters*, 41, 1022–1033. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.127>
- Madejski, P., & Muna, I. I. (2026). Application of micro-CT for characterization and analysis of 3D-printed samples produced using the FDM additive manufacturing method. *Procedia Structural Integrity*, 77, 357–364. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2026.01.046>
- Mazeeva, A., Masaylo, D., Konov, G., & Popovich, A. (2024a). Multi-Metal Additive Manufacturing by Extrusion-Based 3D Printing for Structural Applications: A Review. *Metals* 2024, Vol. 14, Page 1296, 14(11), 1296. <https://doi.org/10.3390/MET14111296>
- Mazeeva, A., Masaylo, D., Konov, G., & Popovich, A. (2024b). Multi-Metal Additive Manufacturing by Extrusion-Based 3D Printing for Structural Applications: A Review. *Metals*, 14(11), 1296. <https://doi.org/10.3390/MET14111296>
- Metkon. (n.d.). *HARDNESS TESTING - DUROLINE - M/LV/V*.

- Musa, N., Mazlan, N., Yusuf, S., Nordin, N., Mazlan, S., & Gao, N. (2024). High densification 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.
- Naranjo, J. (2022). *AVANCES EN LA FABRICACIÓN POR FILAMENTO FUNDIDO DE COMPONENTES METÁLICOS MEDIANTE NUEVOS SISTEMAS LIGANTES, ANÁLISIS REOLÓGICO Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA*. UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA.
- Pantoja, O. F., Rodriguez, J. L., Terrones, E. A., & Ventura, R. W. (2025). Aplicaciones de la fabricación aditiva en el campo de la medicina (2010 -2025). *Gestión de Operaciones Industriales*, 4(1), 34–47. <https://doi.org/10.17268/goi4.0.2025.04>
- Raise3D. (2024). *Raise3D E2 3D Printer*. <https://shop.raise3d.com/products/raise3d-e2-3d-printer>
- Randall, G. (2005). *Powder metallurgy and particulate materials processing : the processes, materials, products, properties and applications* . Metal Powder Industries Federation.
- Rane, K., & Strano, M. (2019). A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts. *Advances in Manufacturing* 2019 7:2, 7(2), 155–173. <https://doi.org/10.1007/S40436-019-00253-6>
- Ratner, B. D., Hoffman, A. S., Schoen, F. J., & Lemons, J. E. (2013). Biomaterials Science An Introduction to Materials in Medicine. In *Biomaterials Science* (3rd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-02433-7>
- Raza, A., Altaf, K., Ahmad, F., Hussain, G., Alkahtani, M., & Hongyu wei. (2024). Experimental study and characterisation of 316L stainless steel parts fabricated with metal fused filament fabrication. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 6686–6698. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.034>

- Raza, A., Altaf, K., Ahmad, F., Shahed, C. A., & Ahmed, S. W. (2023). STUDY AND ANALYSIS OF METAL PARTS FABRICATED THROUGH FUSED DEPOSITION MODELLING, DE-BINDING AND SINTERING PROCESSES. In *Journal of Engineering Science and Technology* (Vol. 18, Number 2).
- Sargent Jr, J. F., & Schwartz, R. (2019). *3D Printing: Overview, Impacts, and the Federal Role*. <https://crsreports.congress.gov>
- Service Physical Testers. (1980). *OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL - MACHINE FOR ROCKWELL HARDNESS TESTING*.
- Sher, D. (n.d.). *Carl Robert Deckard, inventor of SLS, dies at 58*. Retrieved June 20, 2026, from <https://www.voxelmatters.com/carl-robert-deckard-inventor-of-sls-dies-at-58/>
- 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>
- Spierings, A. B., Schneider, M., & Eggenberger, R. (2011). Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 17(5), 380–386. <https://doi.org/10.1108/13552541111156504>
- Spina, R., & Morfini, L. (2024). Material Extrusion Additive Manufacturing of Ceramics: A Review on Filament-Based Process. *Materials* 2024, Vol. 17, Page 2779, 17(11), 2779. <https://doi.org/10.3390/MA17112779>
- Suárez Ramírez, J. S. (2025). *Implementación de un sistema de impresión 3D de metales por extrusión de filamento para uso académico*. Universidad de los Andes. <https://hdl.handle.net/1992/77871>
- Tadi, S. P., & Mamilla, R. S. (2026). Integrated powder–binder architecture and debinding kinetics for the features fabricated by SS 316L fused-filaments towards indirect metal additive manufacturing. *Powder Technology*, 477, 122444. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2026.122444>

- Talha, M., Behera, C. K., & Sinha, O. P. (2013). A review on nickel-free nitrogen containing austenitic stainless steels for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 33(7), 3563–3575. <https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2013.06.002>
- Tang, J., Sang, Z., Zhang, X., Song, C., Tang, W., Luo, X., & Yan, M. (2023). Impacts of residual 3D printing metal powders on immunological response and bone regeneration: an in vivo study. *Journal of Materials Science. Materials in Medicine*, 34(6), 29. <https://doi.org/10.1007/S10856-023-06727-1>
- The Virtual Foundry. (n.d.). *BASF-Ultraduse The Virtual Foundry-Filamet™ 3D Printer*. Retrieved June 27, 2026, from www.thevirtualfoundry.com
- The Virtual Foundry. (2024). *The-Virtual-Foundry-TDS-Stainless-Steel-316L-24-04*.
- The Virtual Foundry. (2026a). *Debinding and Sintering Pure Metal with Filamet*. <https://thevirtualfoundry.com/debind-sinter/>
- The Virtual Foundry. (2026b). *Safety Data Sheet of Stainless Steel 316L Filamet™*. <https://thevirtualfoundry.com/wp-content/uploads/2026/02/26-01-stainless-steel-316l-sds-the-virtual-foundry.pdf>
- ZEISS. (2022). *Stereo microscope Stemi 305 Instruction manual*.
- Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D., & Bernat, J. (2024). Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors*, 24(9), 2668. <https://doi.org/10.3390/s24092668>
- Zwick Roell. (n.d.). *ISO 6507/ASTM E384 - Ensayo de dureza Vickers*. Retrieved July 17, 2026, from <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-dureza-vickers-iso-6507/>
- ZwickRoell. (n.d.). *ISO 6508/ASTM E18 - Ensayo de dureza Rockwell*. Retrieved July 17, 2026, from <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-dureza-rockwell-iso-6508/>

Anexos

Anexo 1: Insumos para el encapsulado de muestras



Anexo 2: Aparato e insumos para soldadura de muestras de acero inoxidable 316L.



Anexo 3: Parámetros de impresión para filamento Ultrafuse

Plantilla: Ultrafuse 0.2 y 0.3 copli

Calidad Capa Extrusor Refieno Refieno Sólido Soportes Plataforma Entrenamiento Temperatura Velocidad Avanzado Retrasado Otros Especial

Altura de capa	0.2000 mm	Caudal	
Altura Primera Capa	0.2000 mm	Caudal de la primera capa	100.0 %
Porcentaje de ancho de extrusión de la primera capa	100 %	☑ Caudal de relleno sólido de la primera capa	100 %
☑ Porcentaje ancho extrusión sólido en primera capa	100 %	Tasa de flujo del Shell exterior	100.0 %
Outer Shell Extrusion Width Percentage	100 %	Tasa de flujo del Shell interno	100.0 %
Inner Shell Extrusion Width Percentage	100 %	Flujo de relleno	100.0 %
Porcentaje de ancho de extrusión de relleno	100 %	Caudal de relleno sólido de la base	100.0 %
Porcentaje de ancho de extrusión de relleno sólido de la base	100 %	Caudal de relleno sólido	100.0 %
Porcentaje de ancho de extrusión de relleno sólido	100 %	Narrow Solid Fill Flowrate	100.0 %
Porcentaje ancho extrusión ref. sólido en superficie superior	100 %	Caudal de relleno sólido de la superficie superior	97.0 %
Porcentaje ancho extrusión ref. sólido en superficie inferior	100 %	Narrow Top Surface Solid Fill Flowrate	97.0 %
Support Extrusion Width Percentage	100 %	Caudal de relleno sólido de la superficie inferior	100.0 %
Compensación dimensional		Compensación de la contracción del material	
Compensación de medidas XY para Contornos	0.00 mm	Factor de escala X	100.00 %
Compensación de medidas XY para Agujeros	0.00 mm	Factor de escala Y	100.00 %
☐ Compensación Pata de Elefante		Factor de escala Z	100.00 %
Compensación del tamaño 0.1mm capa para contornos	0.00 mm	☐ Altura Z precisa	
Compensación del tamaño 0.1mm capa para agujeros	0.00 mm	Altura Z precisa Capa	1

Nota. Altura de capa y Altura Primera Capa van con el mismo número.

Calidad Capa Extrusor Refieno Refieno Sólido Soportes Plataforma Entrenamiento Temperatura Velocidad Avanzado Retrasado Otros Especial

Carcasas	1.0	☐ Modo jarro en espiral	
Porcentaje máximo de superposición de paredes	15 %	☑ Imprimir ruta en Modo jarro en Espiral	
☑ Imprimir carcassas en el orden óptimo		☐ Modo de carcasa única	
Tipo de patrón de relleno sólido de primera capa	Lineas	Orden de relleno y perímetros	Perímetro interno - Perímetro externo
☑ Carcassas de las primeras capas	4.5	☐ Imprimir Partes en el Mismo Orden para Cada Capa	
Lista Dirección Shell		Longitud mínima del segmento	0.012 mm
Orientación	CCW	Fusionar líneas cercanas	0.000 mm
Añadir		Tamaño mínimo de la pieza	100 %
Eliminar		☐ Solo una carcasa en las superficies superiores	
Ensamble en diagonal		Superficie superior sólido... la carcasa (anchura mínima)	0.00 mm
Tipo de ensamble en diagonal	Ninguno	Superficie superior... la carcasa (anchura mínima)	0.00 mm
☑ Ensamble en diagonal condicional		Punto de inicio de capa	
Orden de ángulo de ensamble en diagonal	155 deg	Tipo de punto de inicio de capa	Fixed
Ensamblaje en diagonal alrededor de toda la carcasa		Punto de inicio de capa fijo XY	0.00 mm 0.00 mm
Longitud de ensamble en diagonal	20.0 mm	☑ Seam Relative Positions	
Paso de ensamble en diagonal	10	Colocar la unión en	Reflex o Espina conveja
Repetición de altura de inicio de ensamble en diagonal	0 %	☐ Allow Placing Seams on Non-Polygon Vertices	
☑ Ensamble en diagonal para carcassas interiores		☑ Evitar roturar costuras en voladitos	
Multiplicador de velocidad de ensamble en diagonal	100 %	☑ Añadir movimiento hacia el interior en el extremo de la carcasa exterior	

Calidad	Capa	Extrusor	Rebbero	Rebbero Sólido	Soportes	Plataforma	Enfriamiento	Temperatura	Velocidad	Avanzado	Rebbero	Otros
Extrusor izquierdo Extrusor derecho												
General Ancho de extrusión 0.30 mm ☒ Retracción Velocidad de retracción 40.0 mm/s Cantidad de material de retracción 0.50 mm Recomido mínimo de retracción 0.60 mm Cantidad mínima de retracción 0.02 mm Cantidad de reinicio adicional 0.00 mm Velocidad de reinicio 25.0 mm/s ☐ Evitar la retracción innecesaria en el soporte Salto-Z en la retracción 0.000 mm Salto-Z realizado Todo Inercia Distancia de Inercia 0.00 mm ☒ Aplicar Inercia en el Infil tipo cu... y en las Líneas de Rebbero Sólido Limpiar Distancia de limpieza de la carcasa exterior 0.20 mm Velocidad de limpieza de la carcasa exterior 60.0 mm/s Limpiar boquilla para soporte 0.00 mm Limpiar boquilla para rebbero 0.00 mm Limpiar boquilla para rebbero sólido 0.00 mm Limpiar boquilla para pared delgada 0.00 mm ☐ Retraction during Wipe Controlar Exudación al cambiar Extrusor Velocidad retracción al cambiar extrusor 20.0 mm/s Cantidad retracción al cambiar extrusor 10.00 mm Reiniciar la velocidad del interruptor del extrusor 20.0 mm/s Cantidad reinicio adicional al cambio extrusor 0.00 mm												

Calidad	Capa	Extrusor	Rebbero	Rebbero Sólido	Soportes	Plataforma	Enfriamiento	Temperatura	Velocidad	Avanzado	Rebbero	Otros
Extrusor izquierdo Extrusor derecho												
☒ Habilitar la configuración del extrusor derecho General Ancho de extrusión 0.30 mm ☒ Retracción Velocidad de retracción 40.0 mm/s Cantidad de material de retracción 0.50 mm Recomido mínimo de retracción 0.60 mm Cantidad mínima de retracción 0.02 mm Cantidad de reinicio adicional 0.00 mm Velocidad de reinicio 25.0 mm/s ☐ Evitar la retracción innecesaria en el soporte Salto-Z en la retracción 0.000 mm Salto-Z realizado Todo Inercia Distancia de Inercia 0.00 mm ☒ Aplicar Inercia en el Infil tipo cu... y en las Líneas de Rebbero Sólido Limpiar Distancia de limpieza de la carcasa exterior 0.20 mm Velocidad de limpieza de la carcasa exterior 60.0 mm/s Limpiar boquilla para soporte 0.00 mm Limpiar boquilla para rebbero 0.00 mm Limpiar boquilla para rebbero sólido 0.00 mm Limpiar boquilla para pared delgada 0.00 mm ☐ Retraction during Wipe Controlar Exudación al cambiar Extrusor Velocidad retracción al cambiar extrusor 20.0 mm/s Cantidad retracción al cambiar extrusor 10.00 mm Reiniciar la velocidad del interruptor del extrusor 20.0 mm/s Cantidad reinicio adicional al cambio extrusor 0.00 mm												

Calidad	Capa	Extrusor	Releno	Releno Sólido	Soportes	Plataforma	Enfriamiento	Temperatura	Velocidad	Avanzado	Rebosado	Otros
Releno												
Extrusor de relleno:		Extrusor izquierdo										
Densidad de relleno:		100 %										
Superposición de relleno:		30 %										
Tipo de patrón de relleno:		Lineas										
☐ Rellenar huecos en relleno 100% concéntrico.												
☐ Conectar puntos finales de líneas de relleno												
☒ Patrón líneas en patrón relleno parte de rejilla de alta densidad												
Releno Offset X:		0.00 mm										
Releno Offset Y:		0.00 mm										
Combinar capas de relleno:		1										
Cartasas contornos de relleno:		0										
☒ Rellenar huecos en el contorno de las paredes de relleno												
☒ Imprimir relleno sólido al 100%												
Releno												
Ancho mínimo para relleno:		0.00 mm										
Área mínima de relleno:		0.00 mm ²										
☐ Releno adaptable												
Recuento de reducción de relleno adaptable:		2										
Rango de ratio de relleno:		5 - 30 %										
Capas de relleno adaptables:		5										
Expansión horizontal interior de relleno adaptable:		0.50 mm										
Ancho mínimo de relleno adaptable:		1.00 mm										
Ángulo de relleno												
Ángulo:		0 Deg										
		45 135										
		Agregar a... de relleno										
		Eliminar a... de relleno										

Calidad	Capa	Extrusor	Releno	Releno Sólido	Soportes	Plataforma	Enfriamiento	Temperatura	Velocidad	Avanzado	Rebosado	Otros	Especial
Parte sólida superior e inferior													
Capas de relleno sólido de la base:		4											
Capas de relleno sólido:		6											
Tipo de patrón de relleno sólido de la base:		Recilíneo											
Tipo de patrón de relleno sólido:		Recilíneo											
Paredes externas de relleno sólido:		0											
Ancho mínimo de relleno sólido:		0.00 mm											
Expansión de relleno sólido:		0.00 mm											
Expandir de relleno sólido un agujero pequeño:		0.00 mm											
☐ Utilice relleno concéntrico para piezas estrechas de relleno sólido													
Releno sólido monotónico													
☐ Releno sólido monotónico de la base													
☐ Releno sólido monotónico													
☐ Releno sólido monotónico de superficie superior													
Ángulo de relleno sólido superior e inferior:		0 Deg											
		45 135											
		Añadir											
		Eliminar											
Capas de relleno sólido en superficie superior													
Capas de relleno sólido en superficie superior:		1											
Tipo de patrón de relleno sólido en superficie superior:		Lineas											
Expansión del relleno sólido de la superficie superior:		0.00 mm											
Tipo de patrón de superficie superior condicional (anchura mínima):		0.00 mm											
Tipo de patrón de superficie superior condicional (área mínima):		0.00 mm ²											
Capas de relleno sólido de la superficie inferior													
Capas de relleno sólido de la superficie inferior:		1											
Tipo de patrón de relleno sólido de superficie inferior:		Lineas											
Expansión del relleno sólido de la superficie inferior:		0.00 mm											
Planchado													
Caudal de planchado:		1.0 %											
Velocidad de planchado:		10.0 mm/s											
☐ Planchado Monotónico													
Ángulo de planchado:		30 Deg											
Distancia de la línea de planchado:		0.00 mm											
Rounding Inset:		0.20 mm											
Patrón de planchado:		Recilíneo											
Small Area Solid Fill Row Compensation													
Small Area Solid Fill Row Compensation Model:		Enter											

Calidad Capa Extrusor Relleno Relleno Sólido Soportes Plataforma Enfriamiento Temperatura Velocidad Avanzado Rebosado Otros Especial

Generar soporte Ninguno

Soportes Soporte denso Soporte adaptable

Soportes

Extrusor soporte: Extrusor izquierdo

Tipo de soporte: Normal

Generate Support Interface Only

Tipo relleno del soporte: Rectilíneo

Consumo de relleno de soporte: 0

Soporte Extrusor al...ancho de relleno: Todo el extrusor

Razo relleno: 30 %

Ángulo máximo de relleno: 45 Deg

Offset horizontal: 0.75 mm

Capas de despliegue...nal hacia arriba: 1

Capas de despliegue...nal hacia abajo: 1

Tasa de flujo de soporte: 1000 %

Expansión horizontal: 0.20 mm

Capas base sólidas: 1

Ángulo de relleno de soporte enlazado: 45 Deg

Otras

Tamaño del pilar: 4.00 mm

Añade conexión dispersa:

✓ Generar soporte bajo Pequeñas Características finantes

Soporte de expansión bajo pequeñas características finantes: 1.00 mm

Recrear soporte después de la operación booleana del modificador:

✓ Usar patrón de líneas en patrón de...za de cuadrícula de alta densidad

Tree Support

Tree Support Branch Diameter: 2.00 mm

Tree Support Branch Angle: 45 Deg

Tree Support Branch Density: 30 %

Branch Diameter Double Outline: 3.00 mm

Calidad Capa Extrusor Relleno Relleno Sólido Soportes Plataforma Enfriamiento Temperatura Velocidad Avanzado Rebosado Otros Especial

Plataforma Sólo Balsa

Balsa

Extrusor Balsa: Extrusor derecho

Desplazamiento del Balsa: 5.00 mm

Huero Balsa del modelo: 0.20 mm

Elevación-X en segunda capa: 0.00 mm

Tipo Líneas Balsa: Líneas

Mantener Huecos en la estructura Balsa

Capa Primeras Capa intermedia Superficie de capa

Capas primeras: 1

Velocidad Primera Capa: 10.0 mm/s

Porcentaje de ancho de extrusión: 100 %

Altura de capa: 0.3000 mm

Ratio relleno primera capa: 30 %

Ángulo de relleno de la primera capa: 0 Deg

Skirt y Brim

Extrusor Falda/Ale: Extrusor izquierdo

Velocidad Falda/Ale: 15.0 mm/s

Falda / Ale Longitud mínima: 0.00 mm

Bordes línea Falda: 3

Distancia de compensación de la Falda: 1.00 mm

Capas Falda: 1

Falda - En la primera capa imprime la carcasa exterior antes que la interior

Líneas de borde de Falda: 5

Distancia de compensación de la Ale: 0.00 mm

Ale - En la primera capa imprime la carcasa exterior antes que la interior

Añadir Ale en Región Interna:

✓ Invalidar Balsa

Anulación de Raft

Porcentaje ancho extrusión relleno sólido en primera capa: 100 %

Habilitar el porcentaje ancho extrusión relleno sólido en primera capa: ☒ Inhab

Porcentaje máximo de superposición de paredes: 50 %

Capa Primeras	Capa intermedia	Superficie de capa
Capas medias	2	
Velocidad de capa media	30.0 mm/s	
Porcentaje de ancho de extrusión	100 %	
Altura de capa	0.3000 mm	
Ratio de relleno de capa media	40 %	
Ángulo de relleno de la capa media	90 Deg	

Capa Primeras	Capa intermedia	Superficie de capa
Capas de superficie	1	
Velocidad	40.0 mm/s	
Porcentaje de ancho de extrusión	50 %	
Altura de capa	0.2000 mm	
Velocidad de la capa superficial	50 %	
Ángulo de relleno ...a capa superficial	30 Deg	
Flujo de la capa superficial	180.0 %	
☒ Superficie de la balsa Orden monotónico		

Calidad
Capa
Extrusor
Reflejo
Reflejo Sólido
Soportes
Plataforma
Enfriamiento
Temperatura
Velocidad
Avanzado
Rebusado
Otros
Es

☒ Habilitar Ventiladores de Enfriamiento

Enfriamiento

Tiempo mínimo de impresión de capa

10.0

sec

☒ Reducir la velocidad de impresión

Velocidad mínima de impresión

10.0

mm/s

☐ Evitar reducir la velocidad de la cubierta exterior

☒ Aumentar velocidad del ventilador

Velocidad máxima Ventilador

100

%

Control ventilador

Enfriamiento externo

Capa

1

Velocidad Ventilador

0

%

Agregar entrada

Eliminar entrada

Capa	Velocidad Ventilador
1	0
2	0
3	0

☐ Cebado velocidad del ventilador al 100 al arrancar desde velocidad baja

Velocidad de Ventilador Baja del Ventilador

30

%

Duración cebado velocidad del ventilador

500

ms

Otros

☐ Esperar a que termine el movimiento antes de cambiar la velocidad del w

Control ventilador Enfriamiento externo

Capa

1

OK

Cancelar

Capa

Estado

☐ Activar refrigeración externa

Agregar entrada

Eliminar entrada

Calidad
Capa
Extrusor
Bakera
Releno Sólido
Soportes
Plataforma
Entiamento
Temperatura
Velocidad
Avanzado
Rebolsado
Otros
Especi

Temperatura

Temperatura cama caliente
80 °C

Extrusor izquierdo
240 °C

Extrusor derecho
205 °C

Usar lista de control de temperatura

Cama
Extrusor izquierdo
Extrusor derecho

Capa
Temperatura

1	55
5	45

Capa
1

Temperatura
40 °C

Añadir Temperatura

Eliminar Temperatura

☒ Enfriar extrusor inactivo

Mover a la posición de estacionamiento

Posición de estacionamiento X
37.00 mm

Posición de estacionamiento Y
238.00 mm

Temperatura de enfriamiento inactiva (izquierda)
180 °C

Temperatura de enfriamiento inactiva (derecha)
180 °C

☒ Calentar el extrusor inactivo por adelantado

Calentar antes de tiempo
40.0 sec

Temperatura de calentamiento inactiva (izquierda)
200 °C

Temperatura de calentamiento inactiva (derecha)
200 °C

☒ Enfriar antes interruptor extrusor

Disminuir Superficie Balsa y Modelo Primera Capa Temp.
0 °C

☒ Temperatura superficie inferior

Temperatura superficie inferior
155 °C

Temperatura de la superficie inferior Umbral de alarma
100.0 mm2

Cama

Extrusor izquierdo

Extrusor derecho

Capa

1

Temperatura

205

°C

Añadir Temperatura

Eliminar Temperatura

Capa

Temperatura

Cama

Extrusor izquierdo

Extrusor derecho

Capa

1

Temperatura

205

°C

Añadir Temperatura

Eliminar Temperatura

Capa

Temperatura

Calidad

Capa

Extrusor

Reheno

Reheno Sólido

Soportes

Plataforma

Enfriamiento

Temperatura

Velocidad

Avanzado

Reposado

Otros

Especial

Velocidad

Velocidad de impresión predeterminada

30.0

mm/s

Velocidad de la carcasa interior

30.0

mm/s

Velocidad de la carcasa exterior

30.0

mm/s

Velocidad de reheno

30.0

mm/s

Velocidad de reheno sólido de la base

30.0

mm/s

Velocidad de reheno sólido

30.0

mm/s

Velocidad de reheno en superficie superior

35.0

mm/s

Velocidad de reheno en superficie inferior

35.0

mm/s

Velocidad de pared delgada

30.0

mm/s

Velocidad de reheno en huecos

30.0

mm/s

Velocidad de construcción

30.0

mm/s

Velocidad Carcasa de Puentes

30.0

mm/s

Soportes

Velocidad de soportes

45.0

mm/s

Velocidad de las Capas de Base Sólidas

40.0

mm/s

Velocidad del Soporte Densos

40.0

mm/s

Velocidad carcassas voladizo

35.0

mm/s

Lista de velocidad del voladizo de carcassas

Angulo

30

Deg

Velocidad

30.0

mm/s

Añadir

Eliminar

Velocidad Primera Capa

10.0

mm/s

Velocidad de reheno de la primera capa

15

mm/s

Reducir velocidad en las primeras capas

3

mm/s

Velocidad de movimiento del eje X / Y

150.0

mm/s

Velocidad de movimiento del eje Z

15.0

mm/s

Velocidad de Movimiento del Eje X/Y del Raft

150.0

mm/s

Velocidad Volumétrica Máxima Extrusor Izquierdo

0.00

mm³/s

Velocidad Volumétrica Máxima Extrusor Derecho

0.00

mm³/s

Velocidad volumétrica de suavizado

Velocidad de velocidad volumétrica de suavizado

1.00

mm³/s

Longitud del segmento de suad volumétrica de suavizado

1.00

mm

Velocidad de longitud de suavizado volumétrica de suavizado

1.00

mm

De la pestaña “Avanzado” en adelante no se realiza ningún cambio.

Anexo 4: Parámetros de impresión para filamento Virtual Foundry

Plantilla: VF AC 0.1 AE 0.6 recomienda ✎ Escriba aquí para buscar (Ctrl + F)

Calidad **Capa** **Extrusor** **Releño** **Releño Sólido** **Soportes** **Plataforma** **Enfriamiento** **Temperatura** **Velocidad** **Avanzado** **Rebocada** **Otros** **Especial**

Altura de capa	0.1000	mm
Altura Primera Capa	0.2000	mm
Porcentaje de ancho de extrusión de la primera capa	100	%
☐ Porcentaje ancho extrusión sólido en primera capa	100	%
Outer Shell Extrusion Width Percentage	125	%
Inner Shell Extrusion Width Percentage	125	%
Porcentaje de ancho de extrusión de releño	100	%
Porcentaje de ancho de extrusión de releño sólido de la base	100	%
Porcentaje de ancho de extrusión de releño sólido	100	%
Porcentaje ancho extrusión rel., sólido en superficie superior	100	%
Porcentaje ancho extrusión rel., sólido en superficie inferior	100	%
Support Extrusion Width Percentage	100	%
Compensación dimensional		
Compensación de medidas XY para Contornos	0.00	mm
Compensación de medidas XY para Agujeros	0.00	mm
☐ Compensación Para de Elongos		
Compensación del tamaño X, primera capa para contornos	0.00	mm
Compensación del tamaño X, primera capa para agujeros	0.00	mm

Caudal		
Caudal de la primera capa	100.0	%
☐ Caudal de releño sólido de la primera capa	120	%
Tasa de flujo del Shell exterior	135.0	%
Tasa de flujo del Shell interno	135.0	%
Rujo de releño	135.0	%
Caudal de releño sólido de la base	135.0	%
Caudal de releño sólido	135.0	%
Narrow Solid Fil Flowrate	135.0	%
Caudal de releño sólido de la superficie superior	135.0	%
Narrow Top Surface Solid Fil Flowrate	135.0	%
Caudal de releño sólido de la superficie inferior	135.0	%
Compensación de la contracción del material		
Factor de escala X	100.00	%
Factor de escala Y	100.00	%
Factor de escala Z	100.00	%
☐ Altura Z precisa		
Altura Z precisa Capas	1	

Calidad **Capa** **Extrusor** **Releño** **Releño Sólido** **Soportes** **Plataforma** **Enfriamiento** **Temperatura** **Velocidad** **Avanzado** **Rebocada** **Otros** **Especial**

Carcasas	1.0	
Porcentaje máximo de superposición de paredes	25	%
☒ Imprimir carcasas en el orden óptimo		
Tipo de patrón de releño sólido de primera capa	Líneas	
☒ Carcasas de las primeras capas	5.0	
Lista Dirección Shell		
Orientación	CCW	
Añadir Eliminar		
Ensamble en diagonal		
Tipo de ensamble en diagonal	Ninguno	
☒ Ensamble en diagonal condicional		
Órbita de ángulo de ensamble en diagonal	155	Deg
Ensamble en diagonal alrededor de toda la carcasa		
Longitud de ensamble en diagonal	25.0	mm
Peso de ensamble en diagonal	10	
Relación de altura de líneas de ensamble en diagonal	0	%
☒ Ensamble en diagonal para carcasas interiores		
Multiplicador de velocidad de ensamble en diagonal	100	%

☐ Modo jarrón en espiral		
☒ Interpolación ruta en Modo jarrón Espiral		
☐ Modo de carcasa única		
Orden de releño y perímetros	Perímetro interno->Perímetro externo	
☐ Imprimir Partes en el Mismo Orden para Cada Capa		
Longitud mínima del segmento	0.012	mm
Fusionar líneas cercanas	0.000	mm
Tamaño mínimo de la pieza	100	%
☐ Solo una carcasa en las superficies superiores		
Superficie superior (total), no carcasa (anchura mínima)	0.00	mm
Superficie superior de una carcasa condicional (línea mínima)	0.00	mm2
Punto de inicio de capa		
Tipo de punto de inicio de capa	Aleatorio	
Punto de inicio de capa tipo XY	0.00	mm
	0.00	mm
☒ Seam Relative Positions		
Colocar la unión en	Reflex o Esquina cóncava	
☐ Allow Placing Seams on Non-Polygon Vertex		
☒ Evitar colocar costuras en voladros		
☐ Añadir movimiento hacia el interior en el extremo de la carcasa exterior		

Calidad	Capa	Extrusor	Repleno	Repleno Sólido	Soportes	Plataforma	Enfriamiento	Temperatura	Velocidad	Avanzado	Rebobado	Otros
Extrusor izquierdo Extrusor derecho												
General Ancho de extrusión 0.60 mm ☒ Retracción Velocidad de retracción 20.0 mm/s Cantidad de material de retracción 1.00 mm Re corrido mínimo de retracción 0.60 mm Cantidad mínima de retracción 0.02 mm Cantidad de reinicio adicional 0.00 mm Velocidad de reinicio 15.0 mm/s ☐ Evitar la retracción innecesaria en el soporte Salto-Z en la retracción 0.000 mm Salto-Z realizado Todos Inercia Distancia de Inercia 0.00 mm ☒ Aplicar Inercia en el Infil tipo ca... y en las Líneas de Relleno Sólido Limpiar Distancia de limpieza de la carcasa exterior 0.50 mm Velocidad de limpieza de la carcasa exterior 60.0 mm/s Limpiar boquilla para soporte 0.00 mm Limpiar boquilla para relleno 0.00 mm Limpiar boquilla para relleno sólido 0.00 mm Limpiar boquilla para pared delgada 0.00 mm ☐ Retraction during Wipe Controlar Exudación al cambiar Extrusor Velocidad retracción al cambiar extrusor 20.0 mm/s Cantidad retracción al cambiar extrusor 10.00 mm Reiniciar la velocidad del interruptor del extrusor 20.0 mm/s Cantidad reinicio adicional al cambio extrusor 0.00 mm												

Calidad	Capa	Extrusor	Repleno	Repleno Sólido	Soportes	Plataforma	Enfriamiento	Temperatura	Velocidad	Avanzado	Rebobado	Otros
Extrusor izquierdo Extrusor derecho												
☒ Habilitar la configuración del extrusor derecho General Ancho de extrusión 0.30 mm ☒ Retracción Velocidad de retracción 40.0 mm/s Cantidad de material de retracción 0.50 mm Re corrido mínimo de retracción 0.60 mm Cantidad mínima de retracción 0.02 mm Cantidad de reinicio adicional 0.00 mm Velocidad de reinicio 25.0 mm/s ☐ Evitar la retracción innecesaria en el soporte Salto-Z en la retracción 0.000 mm Salto-Z realizado Todos Inercia Distancia de Inercia 0.00 mm ☐ Aplicar Inercia en el Infil tipo ca... y en las Líneas de Relleno Sólido Limpiar Distancia de limpieza de la carcasa exterior 0.20 mm Velocidad de limpieza de la carcasa exterior 60.0 mm/s Limpiar boquilla para soporte 0.00 mm Limpiar boquilla para relleno 0.00 mm Limpiar boquilla para relleno sólido 0.00 mm Limpiar boquilla para pared delgada 0.00 mm ☐ Retraction during Wipe Controlar Exudación al cambiar Extrusor Velocidad retracción al cambiar extrusor 20.0 mm/s Cantidad retracción al cambiar extrusor 10.00 mm Reiniciar la velocidad del interruptor del extrusor 20.0 mm/s Cantidad reinicio adicional al cambio extrusor 0.00 mm												

Calidad	Capa	Extrusor	Releno	Releno Sólido	Soportes	Plataforma	Enfriamiento	Temperatura	Velocidad	Avanzado	Rebosado	Otros
Releno Extrusor de releno: Extrusor izquierdo Densidad de releno: 100 % Superposición de releno: 30 % Tipo de patrón de releno: Rectilíneo ☐ Rellenar huecos en releno 100% concéntrico ☐ Conectar puntos finales de líneas de releno ☒ Patrón líneas en patrón releno ...arte de rejilla de alta densidad Releno Offset X: 0.00 mm Releno Offset Y: 0.00 mm Combinar capas de releno: 1 Carcasas contornos de releno: 0 ☒ Rellenar huecos en el contorno de las paredes de releno ☒ Imprimir releno sólido al 100%												
Releno Ancho mínimo para releno: 0.00 mm Área mínima de releno: 0.00 mm ² ☒ Releno adaptable Retorno de reducción de releno adaptable: 3 Rango de tasa de releno: 5 - 30 % Capas de releno adaptables: 5 Expansión horizontal interior de releno adaptable: 0.00 mm Ancho relieve de releno adaptable: 3.00 mm Ángulo de releno Ángulo: 0 Deg 0 90 Agregar a...de releno Eliminar a...de releno												

Calidad	Capa	Extrusor	Releno	Releno Sólido	Soportes	Plataforma	Enfriamiento	Temperatura	Velocidad	Avanzado	Rebosado	Otros	Espec
Parte sólida superior e inferior Capas de releno sólido de la base: 6 Capas de releno sólido: 6 Tipo de patrón de releno sólido de la base: Rectilíneo Tipo de patrón de releno sólido: Rectilíneo Paredes externas de releno sólido: 0 Ancho mínimo de releno sólido: 0.00 mm Expansión de releno sólido: 0.00 mm Expandir de releno sólido a un agujero pequeño: 0.00 mm ☐ Utilice releno concéntrico para piezas estrechas de releno sólido													
Releno sólido monotónico ☐ Releno sólido monotónico de la base ☐ Releno sólido monotónico ☐ Releno sólido monotónico de superficie superior Ángulo de releno sólido superior e inferior Ángulo: 0 Deg 0 90 Añadir Eliminar													
Capas de releno sólido en superficie superior Tipo de patrón de releno sólido en superficie superior: Líneas Expansión del releno sólido de la superficie superior: 0.00 mm Tipo de patrón de superficie superior condicional (anchura mínima): 0.00 mm Tipo de patrón de superficie superior condicional (área mínima): 0.00 mm ² Capas de releno sólido de la superficie inferior Tipo de patrón de releno sólido de superficie inferior: Líneas Expansión del releno sólido de la superficie inferior: 0.00 mm													
Planchado Caudal de planchado: 5.0 % Velocidad de planchado: 10.0 mm/s ☐ Planchado Monotónico Ángulo de planchado: 90 Deg Distancia de la línea de planchado: 0.00 mm Ironing lines: 0.20 mm Patrón de planchado: Rectilíneo													
☒ Small Area Solid Fill Flow Compensation Small Area Solid Fill Flow Compensation Model: Editar													

Calidad Capa Extrusor Relleno Relleno Sólido Soportes Plataforma Enfriamiento Temperatura Velocidad Avanzado Rebosado Otros Espec

Generar soporte Ninguno

Soportes Soporte fijo Soporte adaptable

Soportes

Extrusor soporte: Extrusor izquierdo

Tipo de soporte: Normal

☐ Generate Support Enforcer Only

Tipo relleno del soporte: Líneas

Compensación de relleno de soporte: 0

Soporte Extrusor y antena de relleno: Todo el extrusor

Razon relleno: 50 %

Ángulo máximo de velador: 45 Deg

Offset horizontal: 0.70 mm

Capas de deslucamiento hacia arriba: 1

Capas de deslucamiento hacia abajo: 1

Tasa de flujo de soporte: 100.0 %

Expansión horizontal: 0.00 mm

Capas base sólidas: 2

Ángulo de relleno de soporte embalsado

Ángulo: 0 Deg

Añadir Eliminar

Otros

Tamaño del pilar: 4.00 mm

☐ Añadir conexión dispersa

☐ Generar soporte bajo Pequeñas Características Rotantes

Soporte de expansión bajo pequeñas características rotantes: 1.00 mm

☐ Recrear soporte después de la operación booleana del modificador

☒ Usar patrón de líneas en patrón de rejilla de cuadrícula de alta densidad

Tree Support

Tree Support Branch Diameter: 2.00 - 15.00 mm

Tree Support Branch Angle: 45 Deg

Tree Support Branch Density: 30 %

Branch Diameter Double Outlines: 1.00 mm

Calidad Capa Extrusor Relleno Relleno Sólido Soportes Plataforma Enfriamiento Temperatura Velocidad Avanzado Rebosado Otros Es

Plataforma Ninguno

Balsa

Extrusor Balsa: Extrusor derecho

Desplazamiento del Balsa: 5.00 mm

Huella Balsa del modelo: 0.20 mm

Desplazamiento en segunda capa: 0.00 mm

Tipo Líneas Balsa: Líneas

☐ Mantener huecos en la estructura Balsa

Capa Primera Capa Intermedia Superficie de capa

Capas primeras: 1

Velocidad Primera Capa: 10.0 mm/s

Porcentaje de ancho de extrusión: 100 %

Altura de capa: 0.3000 mm

Balsa relleno primera capa: 30 %

Ángulo de relleno de la primera capa: 0 Deg

Skirt y Brim

Extrusor Falda/Ala: Extrusor izquierdo

Velocidad Falda/Ala: 15.0 mm/s

Falda / Ala Longitud mínima: 0.00 mm

Bucles líneas Falda: 2

Distancia de compensación de la Falda: 3.00 mm

Capas Falda: 1

☐ Falda - En la primera capa imprimir la carcasa exterior antes que la interior

Líneas de borde de Falda: 5

Distancia de compensación de la Ala: 0.00 mm

☐ Ala - En la primera capa imprimir la carcasa exterior antes que la interior

☐ Añadir Ala en Región Interna

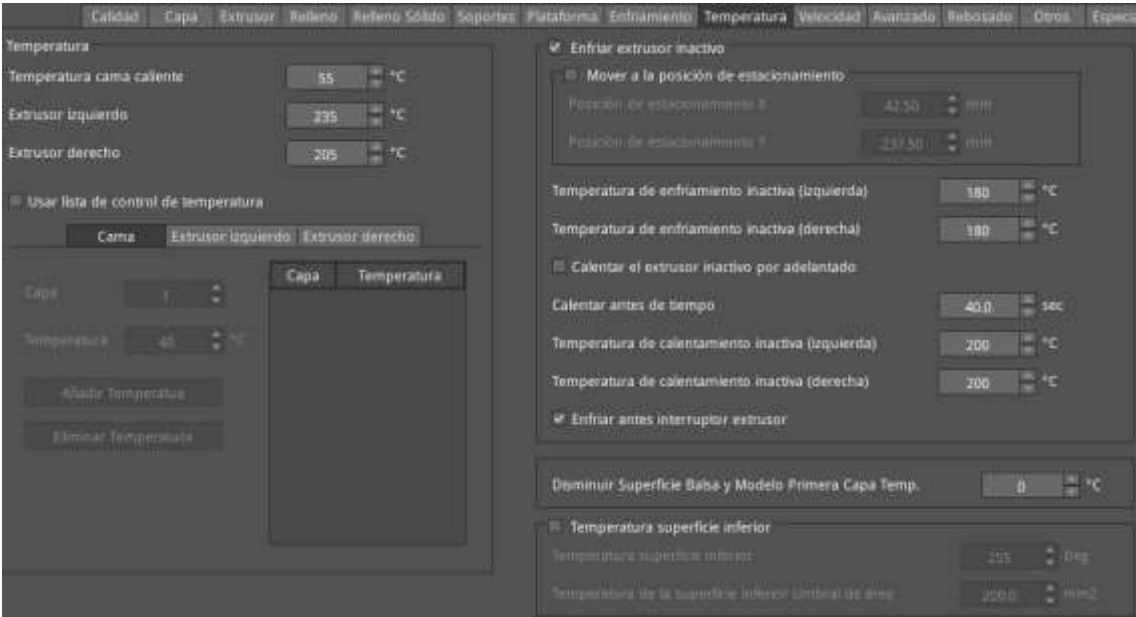
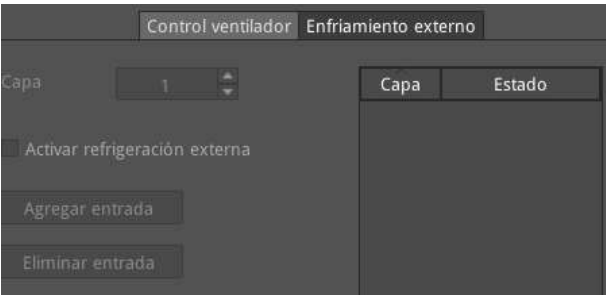
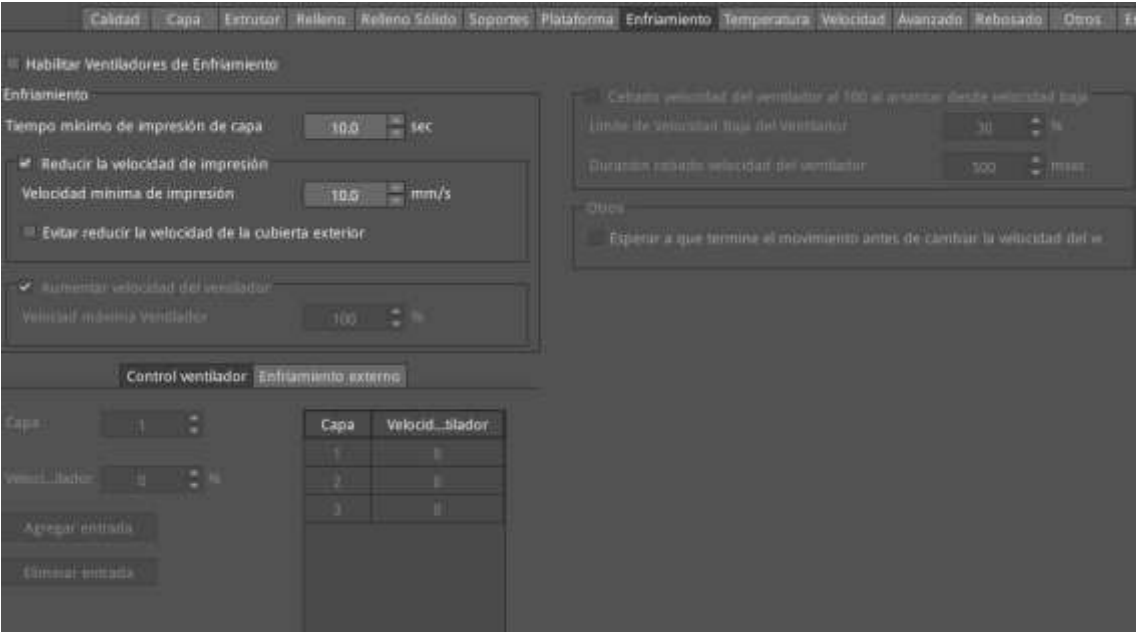
☒ Inicializar Balsa

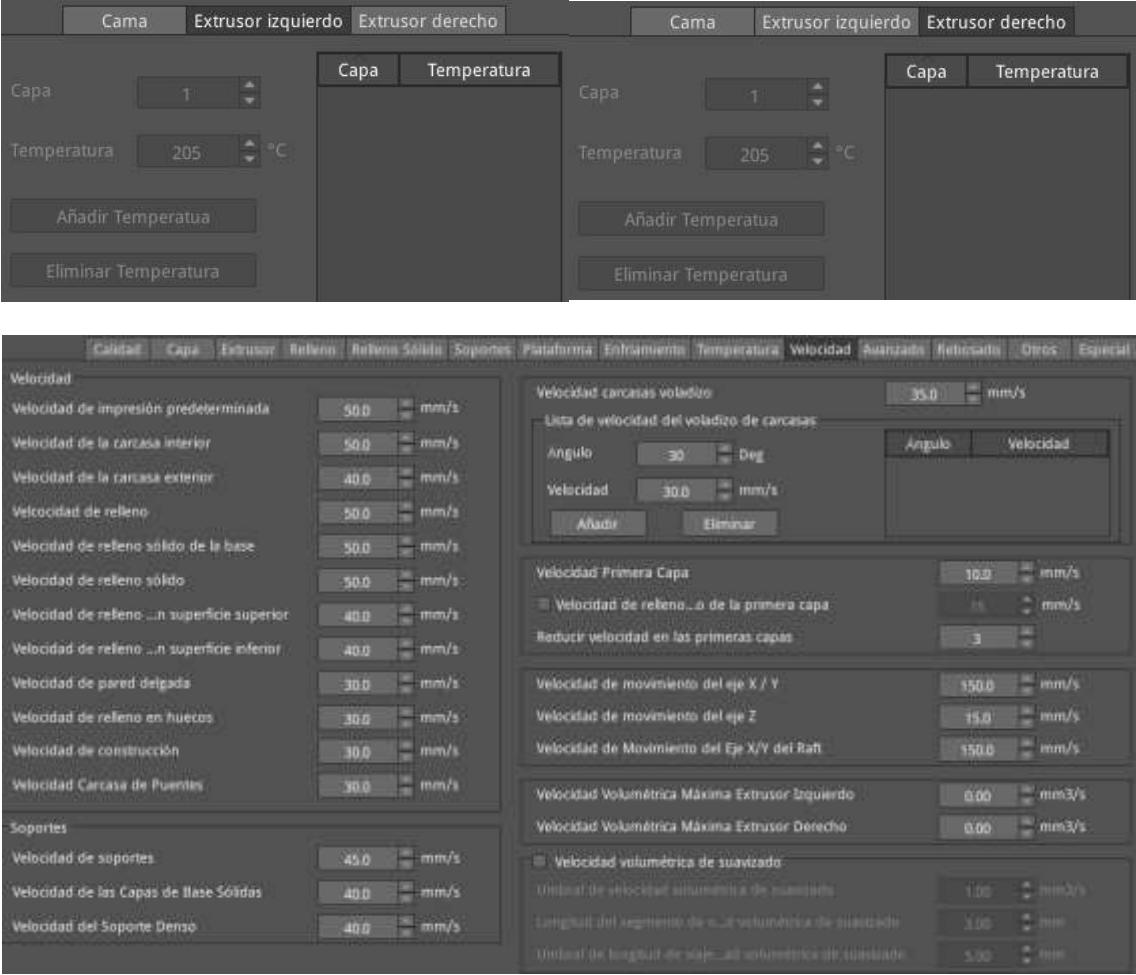
☒ Anulación de Raft

Altura Primera Capa: 0.3000 mm

Porcentaje ancho extrusión relleno sólido en primera capa: 100 %

Offset Global Z: 0.10 mm





De la pestaña “Avanzado” en adelante no se realiza ningún cambio

Anexo 5: Parámetros de corte láser

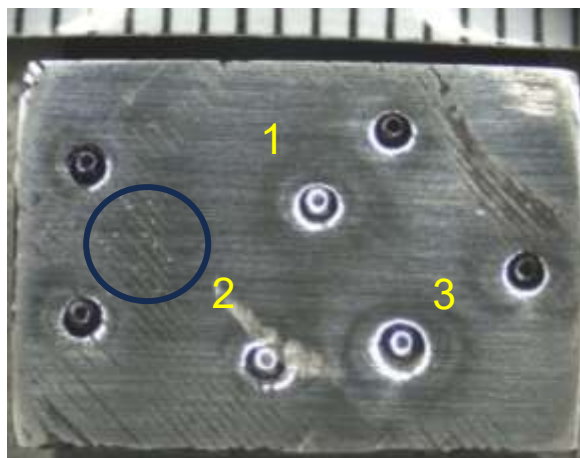
Espesor (mm)	Velocidad (m/min)	Enfoque (focus)	Altura de corte (mm)	Gas	Tipo de boquilla	Presión de gar (bar)	Potencia (W)
4	5	-1,5	0,5	oxígeno	Single:3,0	14	3000

Anexo 6: Piezas y probetas utilizadas para el ensayo de dureza

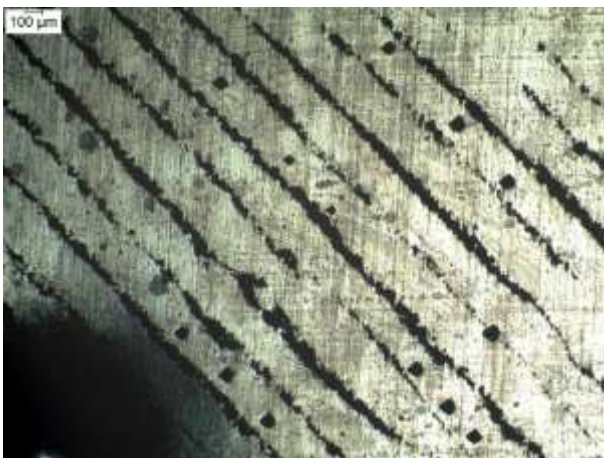
La zona de realización de microdureza se muestra en un círculo.

Muestra 1 de USFQ1

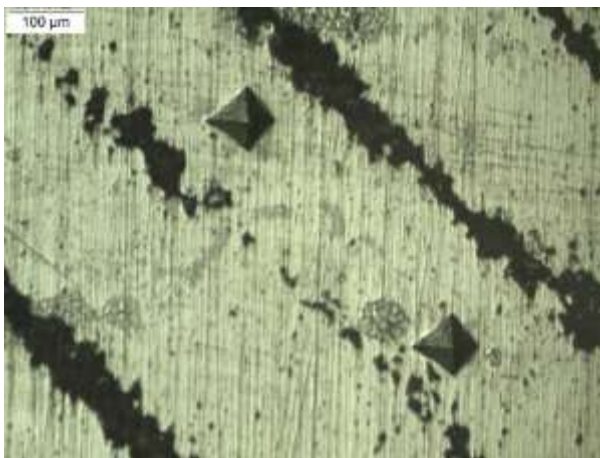
Macro dureza



Microdureza



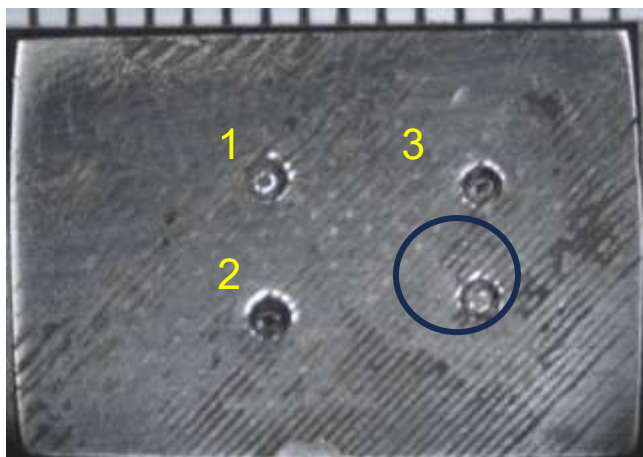
50 x



200x

Muestra 2 USFQ1

Macro dureza



Micro dureza



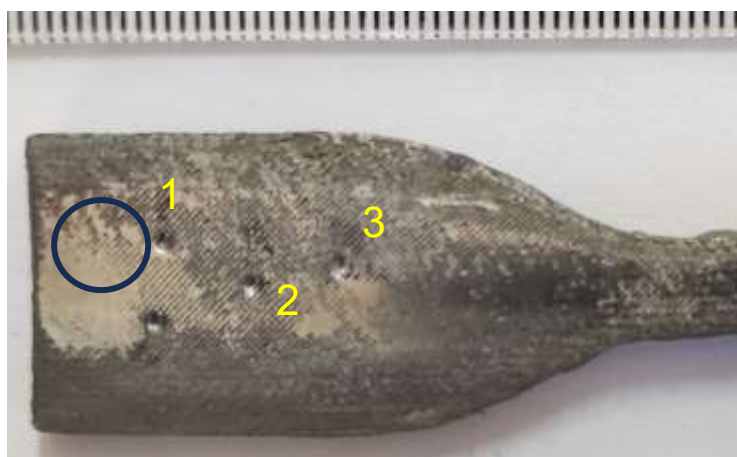
50 x



200x

P2U-1

Macro dureza



Micro dureza



50 x



200x

P18U-2

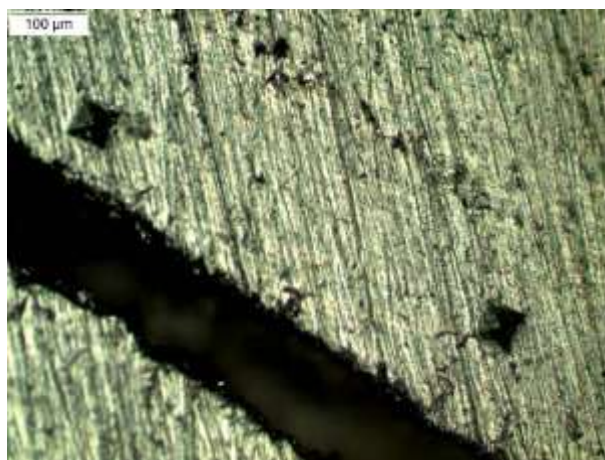
Macro dureza



Micro dureza



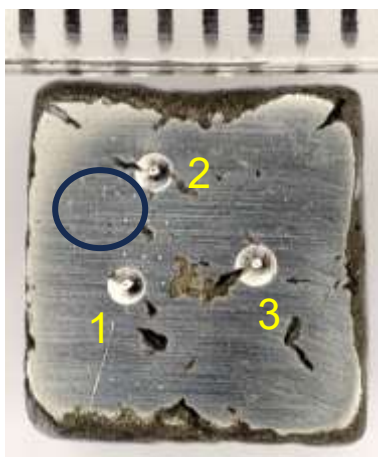
50 x



200x

Sección de E4.3

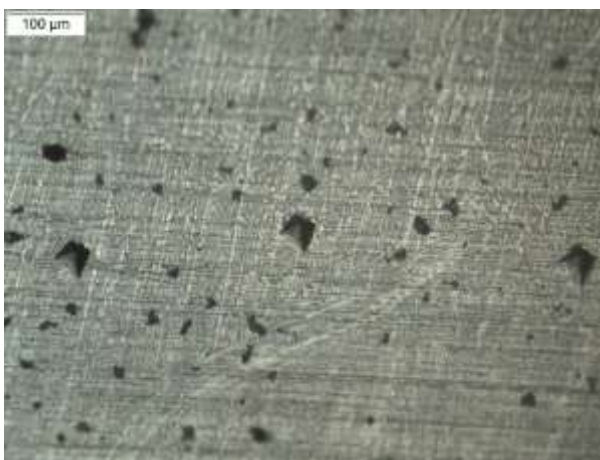
Macro dureza



Micro dureza



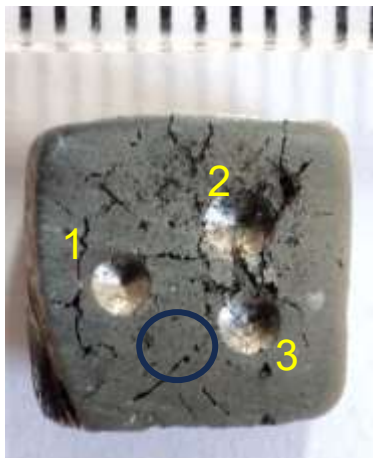
100 x



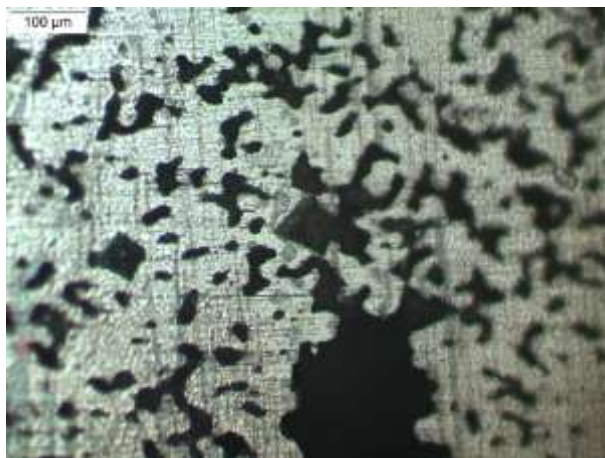
200x

Sección de E4.4

Macro dureza



Micro dureza



200x