



**Caracterización de las fotoresinas que serán usadas como matrices de fabricación para
los intercambiadores de calor compactos**

Vallejo Bustamante María José

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniera en Mecatrónica

Ing. Lara Padilla Hernán Vinicio, PhD.

31 de agosto de 2022

COPYLEAKS

Trabajo escrito_Vallejo_Maria_Jose_20220818.pdf

Scanned on: 13:6 August 18, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	379
Words with Minor Changes	69
Paraphrased Words	45
Omitted Words	0



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Caracterización de las fotoresinas que serán usadas como matrices de fabricación para los intercambiadores de calor compactos”** fue realizado por la señorita **Vallejo Bustamante, María José**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 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, 31 de agosto de 2022

.....

Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio

C. C.: 0603247362



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Vallejo Bustamante, María José**, con cédula de ciudadanía n° 1718674003, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Caracterización de las fotoresinas que serán usadas como matrices de fabricación para los intercambiadores de calor compactos** 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, 31 de agosto de 2022

Vallejo Bustamante, María José

C.C.: 1718674003



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo, **Vallejo Bustamante, María José**, con cédula de ciudadanía n° 1718674003, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Caracterización de las fotoresinas que serán usadas como matrices de fabricación para los intercambiadores de calor compactos** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 31 de agosto de 2022

Vallejo Bustamante, María José

C.C.: 1718674003

Dedicatoria

A mis padres y hermanos.

Agradecimientos

Por ser mis guardianes y dárme todo, por sus incontables sacrificios, por impulsarme hasta el día de hoy y mucho más allá. Por cimentar este momento durante todos estos años. Por su amor infinito. Gracias a mis padres, Rebeca y Vinicio.

Por dejar sus huellas para saber por dónde trazar mi camino, por sus consejos y ayudas. Por germinar en mí este amor por la ciencia. Por su protección y ejemplo. Gracias a mis hermanos, Rebeca, Jorge y Miguel.

Por darle un verdadero significado a la palabra “compañero”, por ser tantas veces mi guía y ayudarme sin condición cada día todos estos años. Por creer en mis ideas y en mi capacidad. Por ser mi refugio cuando los días son negros. Por la lealtad y el amor sincero. Gracias, Iván.

Al Ingeniero Hernán Lara, por su tiempo, paciencia y ayuda siempre que lo he necesitado. Por su entrega y formidable profesionalismo. Por las oportunidades y herramientas que me ha brindado para construir mi vida profesional.

Al Ingeniero Esteban Flores, por su ayuda y acompañamiento en la elaboración de este trabajo siempre que lo requerí.

A mis amigos, quienes me han brindado momentos inolvidables y me han ayudado a convertirme en una mejor persona. Gracias por aligerar los duros momentos con su alegría y palabras de aliento.

Por cada intento, por cada éxito y por cada fallo. Por no amilanarte a pesar de los días enteros sin dormir. Por resistir y no hesitar para conseguir este objetivo. Por permitirte cambiar y aprender.

Índice de Contenidos

Portada.....	1
Dedicatoria	6
Agradecimientos	7
Índice de Contenidos	8
Índice de Tablas.....	13
Índice de Figuras	14
Resumen.....	17
Abstract.....	18
Capítulo I.....	19
Introducción.....	19
Antecedentes	19
Justificación e importancia	21
Alcance del proyecto.....	22
Objetivos.....	23
Objetivo General.....	23
Objetivos Específicos	23
Capítulo II.....	24
Revisión de Literatura.....	24
Manufactura Aditiva	24
Impresión 3D por Fotopolimerización	24
Estereolitografía	25
Limitaciones de la manufactura aditiva	27

Sistemas de coordenadas en la Manufactura Aditiva	27
Plataforma de fabricación.....	27
Superficie de fabricación	28
Frente de la máquina.....	28
Origen	28
Localización de la parte.....	28
Reorientación de la parte	28
Propiedades de productos fabricados por Manufactura Aditiva	30
Propiedades mecánicas y energéticas en partes impresas mediante SLA.....	30
Anisotropía.....	30
Propiedades energéticas.....	31
Caracterización de fotopolímeros impresos mediante estereolitografía.....	33
Importancia de la caracterización de polímeros en manufactura aditiva	33
Caracterización de un material	35
Caracterización mecánica	35
Ensayo de Microperforado	35
Ensayo a tracción	37
Capítulo III.....	38
Metodología	38
Metodología para la caracterización de fotoresinas.....	38
Propiedades críticas para la caracterización de las fotoresinas	38
Diseño experimental	39

	10
Definición de la meta.....	39
Factores y niveles.....	39
Método de diseño experimental	40
Diseño y fabricación de probetas para caracterización	42
Diseño CAD.....	43
Impresión de probetas mediante SLA.....	43
Materiales y equipos	43
Preprocesado.....	44
Impresión de probetas	45
Posprocesado	45
Fabricación del sistema de caracterización.....	47
Plataforma de microperforado.....	47
Medición de fuerza.....	48
Calibración del sensor de fuerza	49
Punzón para microperforado	49
Matrices de soporte para probetas.....	50
Microcontrolador	51
Medición de desplazamiento	51
Calibración del potenciómetro	54
Control del movimiento	56
Velocidad del motor	57

	11
Cálculo aproximado de la fuerza del sistema	59
Adquisición de datos.....	61
Interfaz de usuario	62
Protocolo experimental.....	65
Control dimensional de probetas impresas	65
Ensayo a tracción	70
Ensayo de microperforado.....	72
Capítulo IV	75
Análisis y discusión de resultados.....	75
Resultados del ensayo de tracción.....	75
Esfuerzo de tracción último	75
Porcentaje de elongación.....	82
Discusión	85
Fotoresina	85
Orientación.....	85
Tiempo de poscurado	86
Espesor de capa	86
Resultados del ensayo de microperforado	88
Correlación entre ensayo de tracción y microperforado.....	94
Validación del sistema de caracterización	95
Capítulo V	98
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro	98

Conclusiones.....	98
Recomendaciones	100
Trabajo futuro	101
Bibliografía	102

Índice de Tablas

Tabla 1 Tecnologías de impresión por fotopolimerización.	25
Tabla 2 Factores y niveles para el diseño experimental.	41
Tabla 3 Voltajes de referencia posibles para la programación de la PGA.....	53
Tabla 4 Configuración del driver TB6560.	57
Tabla 5 Análisis de Varianza para el espesor de probetas MT según los diferentes niveles de orientación.....	66
Tabla 6 Análisis de Varianza para el ancho de cuello de probetas MT según los diferentes niveles de orientación.	67
Tabla 7 Análisis de Varianza para el espesor de probetas MP según los diferentes niveles de orientación.....	69
Tabla 8 Análisis de Varianza para el diámetro de probetas MP según los diferentes niveles de orientación.....	70
Tabla 9 Análisis de Varianza para el Esfuerzo de tracción último según los diferentes tipos de fotoresinas.....	76
Tabla 10 Análisis de Varianza para el Esfuerzo de tracción último según los diferentes niveles de orientación.	77
Tabla 11 Análisis de Varianza para el Esfuerzo de tracción último según los diferentes tiempos de poscurado.	78
Tabla 12 Análisis de Varianza para el Esfuerzo de tracción último según los diferentes niveles de espesor de capa.	80
Tabla 13 Relaciones de Señal/Ruido para Esfuerzo de tracción último	81
Tabla 14 Relaciones de Señal/Ruido para porcentaje de elongación	82
Tabla 15 Configuración para obtener el mayor valor de esfuerzo a tracción último.	84
Tabla 16 Comparación de dispositivos empleados para ensayos de microperforado	95

Índice de Figuras

Figura 1 Intercambiador de calor compacto utilizando TPMS.	19
Figura 2 Diagrama del sistema propuesto.	22
Figura 3 Proceso de impresión 3D.	24
Figura 4 Esquema de impresora 3D de estereolitografía	26
Figura 5 Pieza impresa en 3D por estereolitografía.....	26
Figura 6 Máquina genérica de Manufactura aditiva	29
Figura 7 Regla de la mano derecha para rotaciones positivas con referencia al origen de volumen de fabricación.....	29
Figura 8 Posibles orientaciones de las partes sobre la plataforma de fabricación	29
Figura 9 Esquema del ensayo de microperforado.	36
Figura 10 Esquema del aparato de SPT.	37
Figura 11 Diagrama de flujo del proceso de caracterización de fotoreinas impresas por SLA.	38
Figura 12 Diagrama de Ishikawa para el proceso de caracterización de las fotoreinas.	40
Figura 13 Niveles de Orientación de impresión.	41
Figura 14 Diagrama de flujo del diseño y fabricación de probetas.....	42
Figura 15 Diseño de probetas para caracterización	43
Figura 16 Preprocesado	44
Figura 17 Probetas impresas.....	45
Figura 18 Lavado de probetas con alcohol isopropílico al 97%.	46
Figura 19 Probetas finales.....	46
Figura 20 Plataforma para ensayos de microperforado.....	47
Figura 21 Máquina para medición de fuerzas de separación en impresión por DLP..	48
Figura 22 Punzón para microperforado.....	49

Figura 23 Aparato de soporte para probetas MP.....	50
Figura 24 Matrices para soporte de probetas.	50
Figura 25 Potenciómetro lineal.....	52
Figura 26 Conversor analógico digital ADS 1115.	52
Figura 27 Curva de calibración para potenciómetro lineal.....	55
Figura 28 Diagrama de flujo para el control del sentido de giro del motor.	58
Figura 29 Diagrama de flujo para el control del movimiento del motor.	58
Figura 30 Curva característica para torque de motor NEMA 17.....	59
Figura 31 Esquema de adquisición de datos	61
Figura 32 Diagrama de flujo de Adquisición de datos programa en Python.	62
Figura 33 Pestaña de inicio de interfaz de usuario	63
Figura 34 Pestaña de control del ensayo en interfaz de usuario.....	64
Figura 35 Prueba de hipótesis para todos los análisis tipo ANOVA.....	65
Figura 36 Gráfica de intervalos para el espesor de probetas MT.....	66
Figura 37 Gráfica de intervalos para el ancho de cuello de probetas MT.....	67
Figura 38 Gráfica de intervalos para el espesor de probetas MP.	68
Figura 39 Gráfica de intervalos para el diámetro de probetas MP.	69
Figura 40 Ensayo a tracción de probetas MT..	71
Figura 41 Probetas ensayadas a tracción.....	71
Figura 42 Montaje de la probeta para el ensayo de microperforado.....	72
Figura 43 Ejecución del ensayo.....	73
Figura 44 Probeta después del ensayo.....	74
Figura 45 Probetas del ensayo microperforado.....	74
Figura 46 Gráfica de intervalos para Esfuerzo de tracción último según los diferentes tipos de fotoresinas.....	75

Figura 47 Gráfica de intervalos para Esfuerzo de tracción último según los diferentes niveles de orientación.	77
Figura 48 Gráfica de intervalos para Esfuerzo de tracción último para los diferentes tiempos de poscurado.	78
Figura 49 Gráfica de intervalos para Esfuerzo de tracción último para los diferentes niveles de espesor de capa.	79
Figura 50 Gráfica de efectos principales para Medias para esfuerzo de tracción último	82
Figura 51 Gráfica de efectos principales para Medias la fuerza de tracción última registrada	82
Figura 52 Gráfica de efectos principales para medias para la elongación.....	84
Figura 53 Relación entre la profundidad de curado y la potencia del láser	87
Figura 54 Curado adicional en capas anteriores por disminución del espesor de capa.....	87
Figura 55 Probetas MP resultantes del ensayo de microperforado.	89
Figura 56 Gráfica de intervalos de la fuerza máxima registrada	90
Figura 57 Gráfica de intervalos del desplazamiento máximo registrado.....	91
Figura 58 Gráfica de Fuerza vs. Desplazamiento para la orientación XY.....	93
Figura 59 Gráfica de Fuerza vs. Desplazamiento para la orientación 45BXY.	93
Figura 60 Gráfica de Fuerza vs. Desplazamiento para la orientación ZX.....	94

Resumen

La impresión 3D a través de la fotopolimerización ha tenido un gran desarrollo al facilitar el procesamiento de materiales con propiedades personalizadas y permitir la impresión de geometrías complejas. En este proceso un fotopolímero es almacenado en un tanque donde es curado con luz UV. Varios parámetros de impresión influyen en el comportamiento mecánico de las partes.

El presente trabajo desarrolla un sistema de caracterización para fotopolímeros impresos mediante estereolitografía con el fin de predecir las propiedades mecánicas de este material. El sistema permite la obtención de propiedades de resistencia mecánica evaluadas a través de ensayos de tracción siguiendo la norma ASTM D1708 y de microperforado siguiendo ASTM F2977, utilizando de microprobetas. Un diseño experimental utilizando el método de Taguchi es realizado considerando a diferentes parámetros de impresión como factores. Además, se fabrica una plataforma de caracterización que permite ejecutar el ensayo de microperforado.

El estudio comprueba que las partes impresas por SLA presentan anisotropía y que a menor espesor de capa es mejor su respuesta mecánica, relacionando este parámetro de impresión con las propiedades energéticas de la fotoresina. Para las probetas de microtensión el máximo esfuerzo de tracción último obtenido fue de 100,9 [MPa] con una elongación del 12,46 [%]. Para las probetas de microperforado, una fuerza mínima de 61,27 [N] se requirió para perforar las probetas y un desplazamiento mínimo de 1,96 [mm]. La mayoría de las probetas destinadas para el ensayo de microperforado resistieron una fuerza de punzonado superior a 100 [N].

Palabras clave: Estereolitografía, caracterización, propiedades mecánicas, microprobetas, microperforado.

Abstract

3D printing using photopolymerization has had a great development by facilitating the processing of materials with personalized properties and allowing the printing of complex geometries. In this process a photopolymer is stored in a tank where it is cured with UV light. Various printing parameters influence the mechanical behavior of parts.

The present work develops a characterization system for photopolymers printed by stereolithography to predict the mechanical properties of this material. The system allows obtaining mechanical resistance properties evaluated through tensile tests following the ASTM D1708 standard and micropunch test following ASTM F2977, using micro-probes. A DoE using the Taguchi method is performed considering different printing parameters as factors. In addition, a characterization platform is manufactured which allows the micropunch test to be carried out.

The study confirms that the parts printed by SLA present anisotropy and that the lower the layer thickness, the better their mechanical response, relating this printing parameter to the energetic properties of the photoresin. For the microtensile specimens, the maximum ultimate tensile stress obtained was 100,9 [MPa] with an elongation of 12,46 [%]. For the micropunch specimens, a minimum force of 61,27 [N] was required to punch the specimens with a minimum displacement of 1,96 [mm]. Most of the specimens for the micropunch test resisted a punching force greater than 100 [N].

Keywords: Stereolithography, characterization, mechanical properties, microprobes, micropunch.

Capítulo I

Introducción

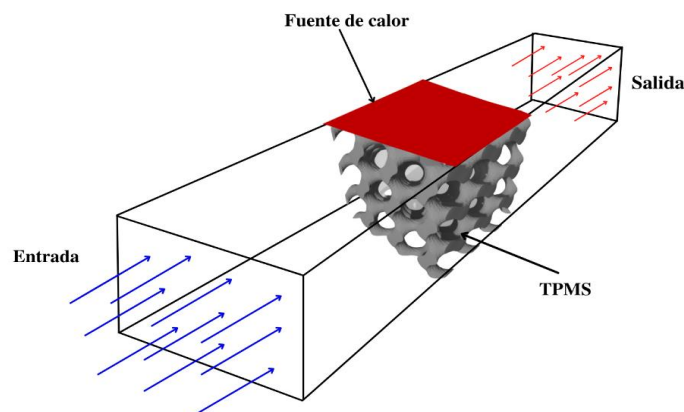
Antecedentes

Debido a que los intercambiadores de calor son un elemento clave en diversas aplicaciones industriales como aeroespacial, automotriz, manufacturera, química, alimentaria, por citar algunas, la demanda por incrementar su eficiencia térmica y con ello su rendimiento es cada vez mayor. Una de las estrategias investigadas en los últimos años para el mejoramiento térmico es el uso de medios porosos, los cuales incrementan la relación superficie-volumen, contribuyendo al aumento de la superficie de intercambio de calor (Gonçalves Pereira Passos, 2019)

Entre estos materiales porosos, las denominadas superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS) han captado la atención de varios estudios debido a sus propiedades térmicas (Attarzadeh et al., 2021) Las TPMS son superficies continuas con una topología específica que es formulada matemáticamente por factores geométricos, tienen baja densidad, además que muestran ventajas en su comportamiento estructural y mecánico en comparación con las estructuras de masa sólida convencionales (Gawronska & Dyja, 2021).

Figura 1

Intercambiador de calor compacto utilizando TPMS.



Gracias a que hoy en día la manufactura aditiva ha permitido la fabricación de TPMS, se genera un nuevo desafío para diseñar estas estructuras que es el de escoger adecuadamente la forma y dimensión del poro, entre otras características geométricas específicas para la aplicación en intercambiadores de calor. Las propiedades de estas estructuras deben ser estudiadas mediante técnicas sistematizadas para facilitar la predicción de su comportamiento antes de la producción de los intercambiadores.

Varios estudios se han realizado para caracterizar estructuras porosas impresas en 3D como el Diseño y caracterización mecánica de andamios sólidos y altamente porosos de fumarato de polipropileno impresos en 3D (Walker et al., 2017) en el que se realizan pruebas de compresión uniaxiales. Un estudio realizado que analiza las propiedades mecánicas y térmicas de estructuras porosas es *Un estudio numérico del impacto de la geometría en propiedades térmicas y mecánicas de estructuras superficiales periódicas* (Gawronska & Dyja, 2021), sin embargo, este es un análisis estrictamente numérico que emplea Análisis de Elementos Finitos.

A nivel regional, específicamente en Colombia, se desarrolló la Caracterización dinámica de un material poroso (Rodríguez Pérez, 2015), el cual obtiene curvas de esfuerzo vs. deformación unitaria de la espuma SAN A800. En Ecuador, en 2020, se desarrolló el Monitoreo del proceso y propiedades mecánicas de andamios porosos durante la impresión 3D por DLM (Serpa Andrade, 2020) en el que se realizó pruebas de curado, dureza y medición de radiación UV-A de la resina SparkMarket (LCD-T) para andamios porosos.

El presente trabajo propone el desarrollo de un sistema de caracterización para fotopolímeros impresos mediante estereolitografía con el fin de predecir las propiedades energéticas y mecánicas de este material antes de la producción de medios porosos aplicados a intercambiadores de calor compactos.

Justificación e importancia

Actualmente, y en el futuro, se necesitará una amplia gama de herramientas de caracterización para medir y correlacionar eficazmente las propiedades y el comportamiento de los materiales (Pellegrino et al., 2016). Las propiedades mecánicas y energéticas del material con el que se producen matrices (o moldes) de fabricación pueden afectar significativamente el proceso de obtención de la parte, así como su costo y calidad. Debido a la búsqueda de emplear medios porosos para la fabricación de intercambiadores de calor, es preciso el empleo de polímeros para su obtención, ya que el único método capaz de lograr dichos medios es la manufactura aditiva; además que se requiere de un material adecuado para la fundición por cera perdida.

La fotopolimerización ha tenido un gran desarrollo en los últimos años, debido a que facilita el procesamiento de materiales con propiedades personalizadas y permite la impresión de geometrías de superficie compleja utilizando tecnologías como la estereolitografía. Los materiales fotopolimerizados ofrecen numerosas ventajas relacionadas a recursos y eficiencia energética (Ebner et al., 2021). En consecuencia, el empleo de fotopolímeros para la impresión de matrices TPMS es favorable.

Es esencial generar un sistema validado que permita caracterizar y predecir las propiedades de los fotopolímeros impresos que serán utilizados en la fabricación de matrices para intercambiadores de calor compactos, ya que hasta la fecha no se evidencian sistemas similares y no se reconocen adecuadamente las ventajas y desventajas que traería su empleo.

Desarrollar un sistema de caracterización de fotopolímeros que servirán de matrices para la fabricación de intercambiadores de calor es factible y rentable. Es posible emplear procedimientos basados en estándares y estudios internacionales que caracterizan las

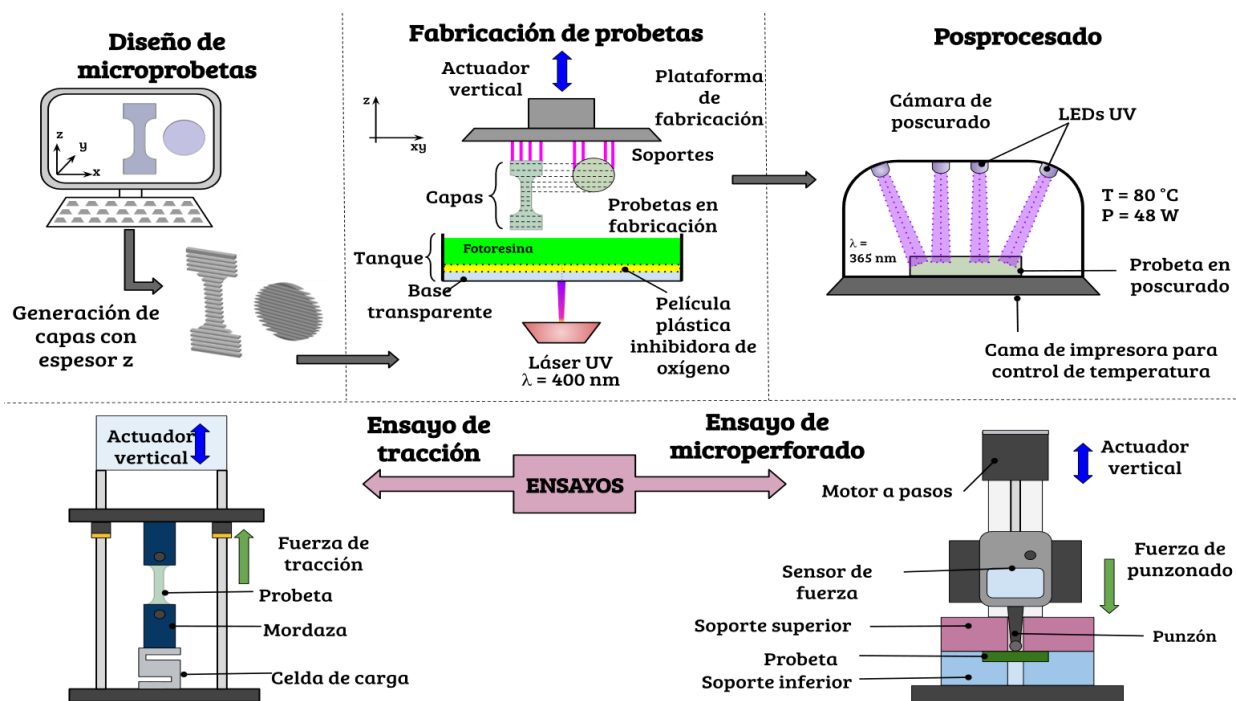
propiedades de polímeros, los cuales describen un proceso sistemático validado para la ejecución de ensayos mecánicos en probetas adecuadamente diseñadas. Al caracterizar las propiedades del material a utilizar, los diseñadores y fabricantes de intercambiadores de calor tienen una mejor visión y control sobre estas.

Alcance del proyecto

El trabajo propuesto estará compuesto de:

Figura 2

Diagrama del sistema propuesto.



El trabajo iniciará con la determinación de las propiedades mecánicas y energéticas críticas de las fotoresinas, a partir de lo cual se planteará el diseño experimental que permita la caracterización del material. Se diseñarán e imprimirán dos tipos de probetas según normas para ensayos de microtensión y microperforado a diferentes niveles de espesores de capa, tiempos de poscurado, orientación de impresión y tipo de fotoresina. Se fabricará un sistema

de microperforado para la caracterización de probetas pequeñas y se generará un protocolo de experimentación. Se ensayarán las probetas fabricadas y se obtendrá, a través de un análisis tipo ANOVA, los factores más influyentes en las respuestas de la experimentación (carga última y esfuerzo último).

Objetivos

Objetivo General

Caracterizar las fotoresinas que serán usadas como matrices de fabricación para los intercambiadores de calor compactos.

Objetivos Específicos

- Investigar las propiedades mecánicas y energéticas consideradas críticas para la caracterización de fotoresinas impresas mediante estereolitografía.
- Diseñar y fabricar las probetas que se usarán para la caracterización de las fotoresinas de acuerdo con recomendaciones de organismos regulatorios.
- Diseñar y fabricar un sistema de caracterización para fotopolímeros impresos mediante estereolitografía.
- Validar el sistema de caracterización a través de técnicas experimentales.

Capítulo II

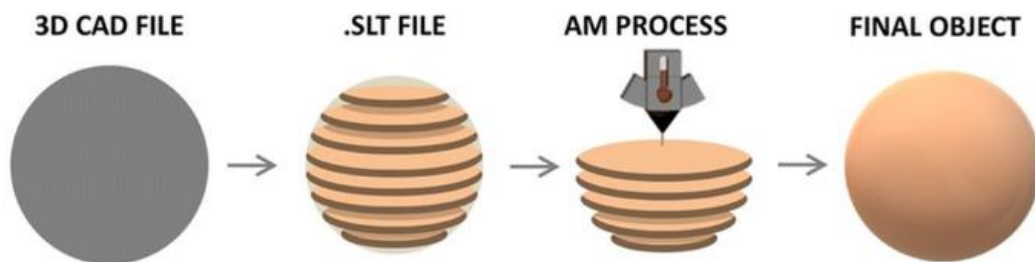
Revisión de Literatura

Manufactura Aditiva

La impresión 3D o Manufactura Aditiva (AM) es un proceso de manufactura digital que brinda extensas oportunidades para diseñar y desarrollar partes o estructuras complejas construyéndolas capa por capa. La parte es diseñada y modelada en un software de diseño asistido por computador (CAD) para luego ser exportada como un archivo .stl e importada en otro software capaz de dividirla en capas. En este software se ubican los soportes necesarios para el caso de geometrías que sobresalgan o se encuentren en voladizo. Una vez impresa la pieza, dependiendo de la tecnología de AM utilizada, se requiere de un posprocesado o directamente es retirada para su uso (Garcia et al., 2020) (Snelling et al., 2015).

Figura 3

Proceso de impresión 3D.



Nota. Adaptado de (Ghilan et al., 2020).

Impresión 3D por Fotopolimerización

En la impresión 3D a través de la Fotopolimerización, una resina fotocurable, que es un fotopolímero, es almacenada en un tanque y es tratada con luz visible o UV. La reacción de polimerización se manifiesta gracias a esta luz de curado para luego formar cadenas de polímeros o entrecruzarlos y solidificar la resina. Existen tres elementos de la mezcla de

fotopolímeros son los monómeros, oligómeros y fotoiniciadores. Al exponerse a la luz de curado, los fotoiniciadores liberan sustancias catalizadoras que permiten la formación de cadenas entre monómeros y oligómeros. Este proceso es irreversible y las partes impresas no pueden volver su forma líquida (Pagac et al., 2021). A nivel comercial y de investigación los materiales epoxy y acrilatos son utilizados, aunque otras investigaciones están explorando poliuretanos., hidrogeles y otros compuestos.

Dependiendo del método de curado, la impresión por fotopolimerización se clasifica en técnicas, descritas en la Tabla 1, donde se emplea láseres (SLA), proyección digital (DLP) y diodos LED y oxígeno (CDLP/CLIP).

Tabla 1

Tecnologías de impresión por fotopolimerización.

Impresión por fotopolimerización	
Método de curado	Tecnología
Curado con láser	SLA (Estereolitografía)
Curado con proyector	DLP (Procesamiento digital de luz)
Curado con LEDs y oxígeno	CDLP/CLIP (Procesamiento continuo digital de luz /Procesamiento continuo de luz líquida)

Nota. Adaptado de (Pagac et al., 2021).

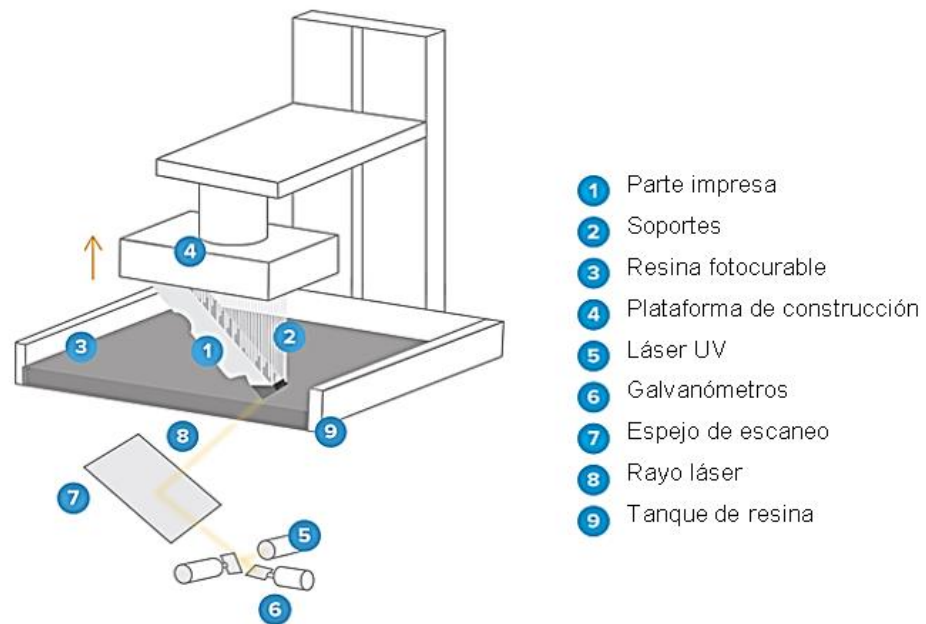
Estereolitografía

Existen diversas tecnologías de impresión 3D y una de las más ampliamente utilizada es la técnica de Estereolitografía (SLA). La impresión por SLA consiste en emplear una fotoresina para construir partes en 3D a través del curado de cada capa de resina líquida al exponerla a una fuente de luz UV (láser) como se muestra en la Figura 4. Se ha demostrado que factores como la potencia del láser o la duración de exposición afectan

considerablemente el tiempo de curado y la resolución de impresión. A pesar de que existen varios estudios acerca de otros procesos de AM, aún la información sobre el efecto de los parámetros de impresión o sobre las propiedades mecánicas de las piezas impresas por Estereolitografía (SLA) es escasa (Garcia et al., 2020).

Figura 4

Esquema de impresora 3D de estereolitografía



Nota. Adaptado de (3D Newworld, 2018).

Figura 5

Pieza impresa en 3D por estereolitografía



Nota. Tomado de (Print 3D, 2021)

Limitaciones de la manufactura aditiva

El estándar ASTM 52910 menciona algunas de las limitaciones que se tienen en la manufactura aditiva como los varios efectos que la discretización geométrica tiene en la parte fabricada, indicándose que las formas pequeñas como agujeros pueden resultar en formas distorsionadas, afectando la calidad final del producto. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que las estructuras de soportes necesarios para sostener la pieza en la plataforma de fabricación pueden afectar el acabado superficial o exactitud dimensional de las superficies soportadas.

En cuanto a métodos de manufactura aditiva como la estereolitografía, se debe prestar especial atención si la pieza tiene cavidades internas, para que los diseñadores puedan remover de forma adecuada posibles restos de resina líquida que afecten a la exactitud dimensional de las piezas o a su acabado superficial. Para contrarrestar estos inconvenientes, el posprocesado es requerido en varios de los métodos de manufactura aditiva y este puede ser realizado a través de procesos de maquinado para mejorar el acabado superficial, pulido, rectificado, entre otras.

Sistemas de coordenadas en la Manufactura Aditiva

En ASTM 52921 se describe el sistema de coordenadas utilizado para la manufactura aditiva, definiendo los siguientes términos:

Plataforma de fabricación

Cualquier base que provee una superficie sobre la cual comienza la fabricación y sobre la cual se desarrolla durante el proceso de construcción de la parte.

Superficie de fabricación

Área donde el material es adicionado, normalmente sobre la última capa depositada, el cual se convierte en el cimientado para la formación de la siguiente.

Frente de la máquina

Generalmente, lado de la máquina mediante el operador accede a la interfaz de usuario o ventana primaria de visualización.

Origen

Punto de referencia asignado donde los tres ejes primarios en un sistema Cartesiano de coordenadas se intersecan.

Localización de la parte

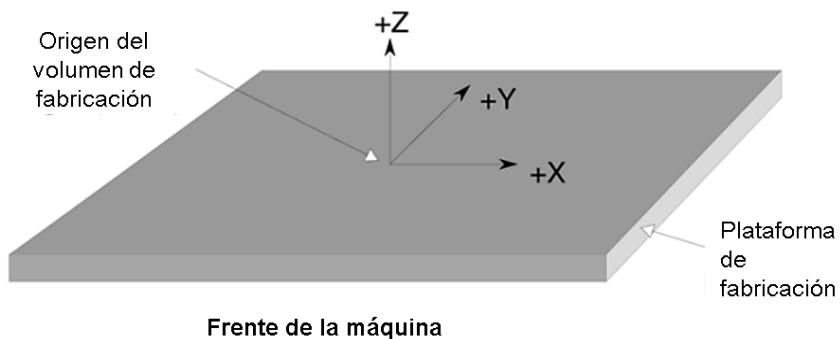
Posición geométrica respecto al origen de coordenadas.

Reorientación de la parte

La reorientación de las partes será especificada mediante la rotación alrededor del centro geométrico de la parte en la secuencia A, B y C (Figura 7). Solo los ángulos que no son cero deben ser especificados. En la Figura 8 se muestra posibles orientaciones de las partes impresas sobre la plataforma de fabricación.

Figura 6

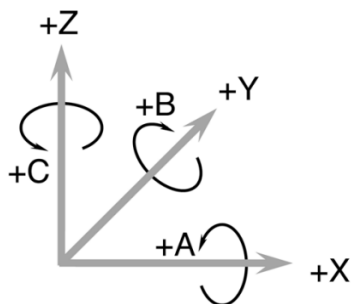
Máquina genérica de Manufactura aditiva



Nota. Tomado de ASTM 52921

Figura 7

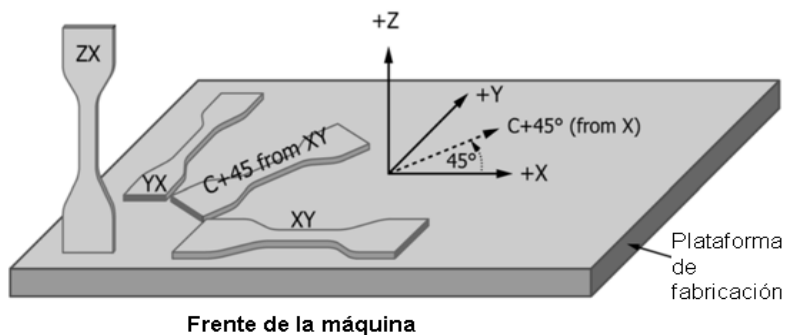
Regla de la mano derecha para rotaciones positivas con referencia al origen de volumen de fabricación.



Nota. Tomado de ASTM 52921

Figura 8

Posibles orientaciones de las partes sobre la plataforma de fabricación



Nota. Tomado de ASTM 52921

Propiedades de productos fabricados por Manufactura Aditiva

Las características de calidad en los productos fabricados mediante Manufactura Aditiva incluyen: exactitud dimensional y geométrica, acabado superficial, propiedades volumétricas (tamaño y estructura de grano) y errores volumétricos (poros, grietas). Estas características pueden influir en las propiedades mecánicas de la parte como: esfuerzo, resistencia a la tracción, resistencia a la fatiga, propiedades muy importantes en la funcionalidad del producto (Colosimo et al., 2018). En (Pellegrino et al., 2016) algunas de las capacidades y tecnologías deseadas para los materiales basados en polímeros son detalladas, donde una de las principales áreas de interés es el estudio de sus propiedades mecánicas.

Propiedades mecánicas y energéticas en partes impresas mediante SLA

Anisotropía

Es la propiedad de los materiales según la cual su comportamiento físico, químico o mecánico varía de acuerdo con la dirección en que es examinada, por lo que presenta diferentes métricas respecto a una misma propiedad en sus diferentes direcciones.

Formlabs, una empresa dedicada a la impresión mediante SLA, pone a disposición cierta información técnica sobre cómo las propiedades mecánicas de ciertas resinas son afectadas por el poscurado, analizando diferentes tiempos de poscurado, potencia y longitud de onda de la cámara de poscurado. Sin embargo, la información acerca de los efectos de la anisotropía es limitada, ya que solo se muestra una orientación de las probetas ensayadas (Zachary Zguris, s/f).

Varios estudios han demostrado la existencia de una alta anisotropía de las partes impresas, por ejemplo, mediante Procesamiento digital de la luz (DLP) (Monzón et al., 2017) y mediante SLA (Väyrynen et al., 2016), (García et al., 2020) indicando que es necesario estudiar las diferentes direcciones de impresión y su respuesta mecánica para determinar la

orientación adecuada al momento de emplearla en una aplicación específica. Por tanto, la anisotropía se convierte en una propiedad intrínseca de la Manufactura Aditiva que resulta en la variación de las propiedades mecánicas de la pieza en diferentes orientaciones, debido a que esta es fabricada capa por capa (Ladani et al., 2014), (Aravind Shanmugasundaram et al., 2020). Evidentemente, el comportamiento anisotrópico de la parte puede ser deseado o no dependiendo de los requerimientos de la aplicación.

Propiedades energéticas

Adicionalmente, el estudio de cómo las propiedades mecánicas se ven afectadas por parámetros energéticos como la exposición al láser de fotocurado, es fundamental para un mejor entendimiento de la impresión por SLA. De acuerdo con Jacobs (Jacobs, 1992), la energía de radiación por unidad de área se denomina exposición al láser, en este caso, de fotocurado. Según la ley de absorción de Beer-Lambert, esta exposición es función del espesor de la resina (z), exposición del láser en la superficie de la resina (E_o), es decir cuando $z = 0$ y de la profundidad de penetración en la resina a la longitud de onda del láser (D_p) de la siguiente manera:

Ecuación 1

$$E(z) = E_o e^{(-z/D_p)}$$

$E(z)$: Exposición al láser, [mJ/cm²]

E_o : Exposición del láser en la superficie de la resina, [mJ/cm²]

z : Espesor de capa de la resina, [μm]

D_p : Profundidad de penetración, [μm]

La exposición necesaria para la formación de gel es conocida como exposición crítica, E_c . La profundidad de curado, C_d , depende de las características de absorción del fotopolímero. De la Ecuación 1, y sabiendo que $E(z)$ alcanzará al menos la exposición crítica E_c cuando $z=C_d$:

Ecuación 2

$$C_d = D_p \ln\left(\frac{E_{max}}{E_c}\right)$$

C_d : Profundidad de curado, [μm]

D_p : Profundidad de penetración del láser, [μm]

E_{max} : Exposición al láser máxima, [mJ/cm^2]

E_c : Exposición crítica para la formación de gel, [mJ/cm^2]

Una relación cuantitativa entre los parámetros mecánicos (módulo, resistencia, tensión) y exposición (E) facilitaría una predicción de la resistencia de la parte. Esto podría permitir optimizar la fabricación de la pieza para obtener una suficiente resistencia mientras se logra cortos tiempos de construcción, a pesar de que deberían ser considerandos la geometría de la parte, sobrecurado, áreas de múltiple exposición y las profundidades de curado. El concepto de fotomódulo describe la dependencia del módulo de Young de la resina a la exposición y es útil para caracterizar la resistencia de la parte en “verde”. Este también provee un nexo entre las propiedades de la parte en verde y el material poscurado (Jacobs, 1992).

Jacobs determina el módulo de Young como una función de la exposición. Con esto se permite la predicción de la “resistencia en verde” de una parte impresa en estereolitografía curada por un láser y de la parte poscurada. La “resistencia en verde” es crítica para una fabricación satisfactoria.

Las propiedades y características mencionadas tienen influencia sobre la fabricación de partes complejas como estructuras TPMS que pueden ser empleadas como matrices en la fabricación de intercambiadores de calor pasivos (disipadores) (Ebner et al., 2021) .

Caracterización de fotopolímeros impresos mediante estereolitografía

Importancia de la caracterización de polímeros en manufactura aditiva

En la Manufactura Aditiva, la caracterización de los materiales es un aspecto clave para conocer el comportamiento de los materiales y así producir partes que tengan propiedades consistentes, repetibles y que puedan ser predichas. Esta caracterización permite también obtener información sobre cómo las propiedades iniciales del material de entrada afectan las propiedades mecánicas de la parte final. Se han empleado técnicas para la caracterización física de los polímeros como análisis del tamaño de las partículas por difracción láser, la tomografía computarizada de rayos X para el análisis del tamaño y la forma, y la microscopía óptica y electrónica de barrido. Para determinar la resistencia estructural, química y mecánica se han utilizado técnicas como la difracción de rayos X, la espectroscopía vibracional y los ensayos de fractura, respectivamente. A pesar de que muchas técnicas son aplicadas para la caracterización de los materiales poliméricos empleados en Manufactura Aditiva, la caracterización del ciclo de vida de estos materiales y la comprensión de su comportamiento durante su procesamiento y las partes finales sigue siendo un reto (Pellegrino et al., 2016).

En su texto, Pellegrino et al. (2016) señalan que modelos predictivos para las capacidades de las partes y materiales son cada vez más necesarios para correlacionar las propiedades del material con los parámetros de AM y producir partes de alta calidad. Para producir estos modelos se requiere de una amplia habilidad y recolección de datos de las propiedades de los materiales, siendo las principales áreas de interés la correlación de estas

propiedades con el comportamiento de las partes finales, estudio de propiedades mecánicas, el impacto de los métodos de procesamiento y cómo se relaciona las propiedades del material con la unión de las capas que firman la parte. Algunas de las capacidades deseadas para la caracterización de polímeros empleados en la AM que Pellegrino et al. (2016) proponen se explican a continuación.

Predicción de piezas/materiales

Se busca encontrar modelos predictivos capaces de correlacionar las propiedades de los materiales con los parámetros del proceso de AM para generar piezas con propiedades aceptables.

Parámetros de procesamiento y caracterización

Obtener técnicas de análisis para proporcionar información rápida y precisa sobre la caracterización de los materiales, tanto antes como después de la impresión

Sostenibilidad y seguridad del ciclo de vida

Capacidad para predecir la reutilización de polímeros y polvos y para fabricar materiales "seguros".

Caracterización y diseño de materiales poliméricos

Capacidad para permitir funcionalidades complementarias, además de la resistencia estructural: electrónica, magnética, interfaz biológica, etc.

Procesamiento de materiales/impresión

Impresión satisfactoria y fiable de piezas que compiten con las técnicas de fabricación más antiguas. Procesos de impresión y materiales que requieren menos/ningún procesamiento posterior.

Una de las mayores barreras que se enfrenta hoy en día es la carencia de la capacidad de comparar resultados e identificar las variables clave del proceso y las variables del material para ayudar a conseguir resultados reproducibles en todas las plataformas de impresión y de material. Lo que se busca es identificar y priorizar las variables clave para todas las partes del proceso, desde el material hasta la pieza final (Pellegrino et al., 2016).

Caracterización de un material

Es el proceso mediante el cual se mide y determina propiedades físicas, químicas, mecánicas y microestructurales de los materiales. Permite alcanzar un mayor nivel de entendimiento sobre los materiales con el fin de mejorar o solucionar problemas aplicativos y determinar las causas para un determinado comportamiento. Finalmente, permite a los diseñadores y fabricantes tomar las mejores decisiones respecto a los materiales a emplear en sus productos (RJ LEE GROUP, s/f).

Caracterización mecánica

Debido a que en ciertos casos el volumen disponible de un material para caracterizar su comportamiento mecánico es limitado o la manipulación del material en grandes volúmenes es difícil (Arunkumar, 2020), se ha visto la necesidad de desarrollar técnicas que empleen una cantidad reducida de este material. Una de estas técnicas es la de la miniaturización del tamaño de las probetas utilizadas llamada SSTT (por sus siglas en inglés de Small Specimen Test Techniques) incluyendo ensayos de tracción, microdureza, punzonado, flexión, impacto, fractura y fatiga (Moreno & Yawny, 2012).

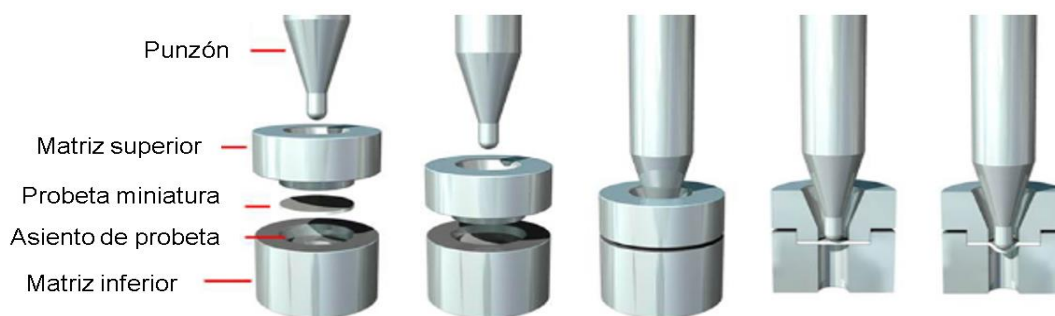
Ensayo de Microperforado

El ensayo de Microperforado o SPT (del inglés Small Punch Test) es ampliamente utilizado para determinar las propiedades de probetas con espesores muy pequeños. El ensayo consiste en determinar la respuesta del material con forma de disco y de espesor muy

delgado que se encuentra empotrado en un soporte ante la penetración de una esfera de radio reducido (Moreno & Yawny, 2012), como se observa en la Figura 9. Los resultados obtenidos de este ensayo no son directos, por lo que se requiere correlacionarlos con ensayos convencionales y evaluar la fiabilidad de estas correlaciones para determinar que estos resultados son repetibles y coherentes (Arunkumar, 2020).

Figura 9

Esquema del ensayo de microperforado.



Nota. Adaptado de (Hurst et al., 2016).

Con el fin de estandarizar el ensayo y asegurar resultados más fiables, están disponibles algunos estándares sobre la técnica SPT, como la norma ASTM F2977 para materiales poliméricos. En esta norma se especifican algunos de los parámetros que se sugiere seguir para realizar el ensayo. Los resultados del SPT, es decir, la carga máxima, el desplazamiento último, la carga última y el trabajo hasta la falla, proporcionan métricas de la fluencia, la resistencia última, la ductilidad y tenacidad en condiciones de carga multiaxial.

Debido a que el comportamiento mecánico puede ser diferente cuando se carga bajo condiciones de carga uniaxial y multiaxial, este ensayo es una técnica complementaria al ensayo de tracción uniaxial. Sin embargo, los resultados del ensayo SPT pueden no estar correlacionados con los resultados del ensayo de tracción uniaxial según ASTM F2977. En la Figura 10 se muestran las dimensiones del aparato para el ensayo de SPT.

Capítulo III

Metodología

Metodología para la caracterización de fotoresinas

Figura 11

Diagrama de flujo del proceso de caracterización de fotoresinas impresas por SLA.



Propiedades críticas para la caracterización de las fotoresinas

Con base en el Capítulo II las propiedades que se investigan a través de la caracterización de las fotoresinas son las propiedades mecánicas a través del ensayo de tracción utilizando microprobetas con referencia a la norma ASTM D1708. Adicionalmente, el

ensayo de microperforado descrito en ASTM F2977 es factible a aplicar, ya que el material disponible es limitado. Por tanto el sistema de caracterización a fabricarse está destinado para ejecutar este ensayo, siguiendo las recomendaciones del estándar en todo lo que sea posible.

Diseño experimental

El objetivo del diseño experimental es proporcionar al investigador o al profesional un método estadístico que determine qué variables de entrada son más influyentes en la salida y dónde establecer las variables de entrada influyentes para que la salida sea maximizada, minimizada o lo más cerca posible de un resultado. valor objetivo deseado. Por su naturaleza, el diseño experimental se puede aplicar a muchas disciplinas. De hecho, se ha aplicado en manufactura, finanzas, compañías farmacéuticas, ciencias sociales, biología, química y una multitud de otras áreas (Rekab & Shaikh, 2005).

Definición de la meta

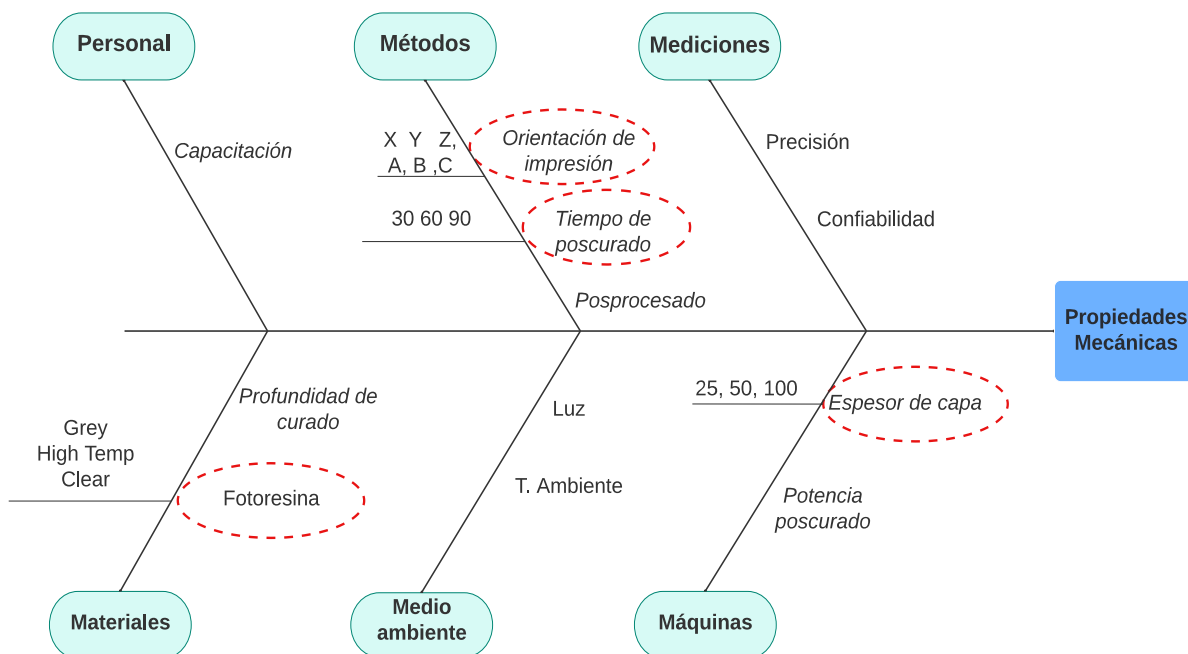
El proceso de caracterización de resinas utilizadas en impresión por estereolitografía tiene como objetivo determinar cuáles son los parámetros de impresión que tienen mayor influencia sobre la esfuerzo y carga máximos que pueden soportar antes de romperse.

Factores y niveles

Para representar los factores que podrían influir en las propiedades mecánicas de las fotoresinas impresas por SLA, se realiza el diagrama de Ishikawa mostrado en la Figura 12. En él se resaltan los factores editables dentro del sistema de impresión.

Figura 12

Diagrama de Ishikawa para el proceso de caracterización de las fotoreinas.



Los parámetros editables para la impresión de probetas por SLA dentro de la impresora utilizada FormLabs 3+ son los siguientes:

Fotoreina: Material utilizado para la impresión de la parte por SLA.

Espesor de capa: Altura de capa de impresión medida en [μm].

Orientación de impresión: Posicionamiento de la pieza dentro del volumen de impresión

Tiempo de poscurado: Tiempo de exposición de la pieza impresa ante luz UV para endurecerla medida en minutos.

Método de diseño experimental

Dados los factores que pueden ser modificados con los niveles propuestos, se realiza un diseño experimental tipo Taguchi Ortogonal L9, 4 factores, 3 niveles y 3 réplicas, resultando en 27 corridas para cada tipo de probeta. debido a que el material es limitado por

su alto costo y difícil adquisición dentro del país. Con este tipo de experimento se optimizan los recursos y se obtiene la configuración que proporcione la mejor respuesta. Los factores y los niveles del experimento son detallados en la Tabla 1. Con referencia a las Figuras 6 y 7, los niveles de orientación de impresión escogidos son observados en la Figura 13. La orientación B45XY resulta de la rotación de 45° del ángulo B (Figura 7) a partir de la orientación XY.

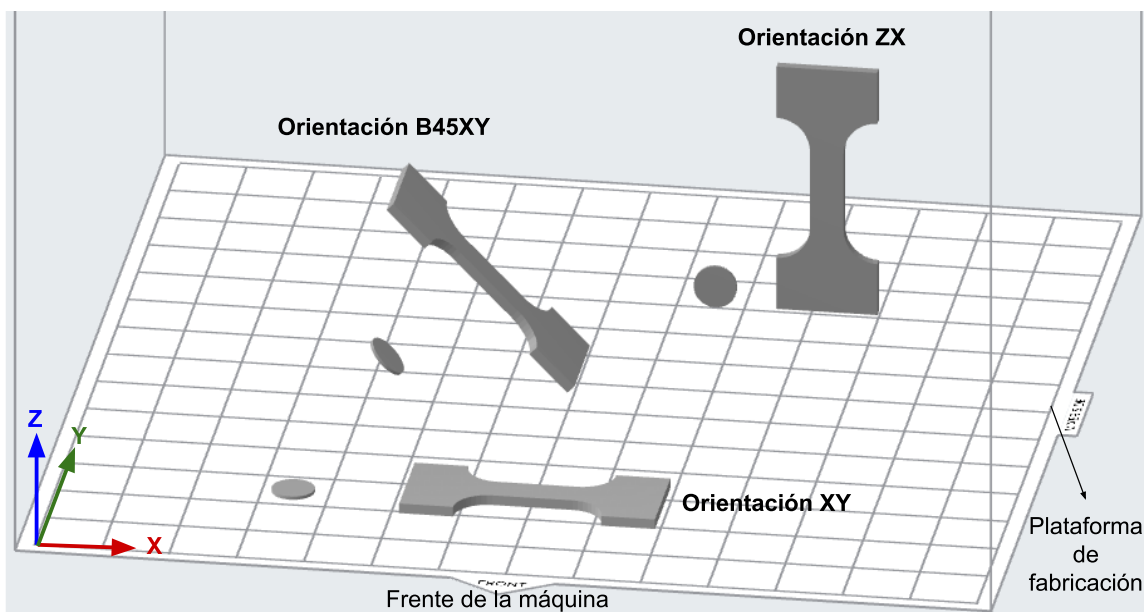
Tabla 2

Factores y niveles para el diseño experimental.

Factor	Unidad	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Fotoresina	-	Grey	High Temp	Clear
Tiempo de poscurado	[min]	30	60	90
Espesor de capa	[μm]	25	50	100
Orientación	-	XY	B45XY	ZX

Figura 13

Niveles de Orientación de impresión.

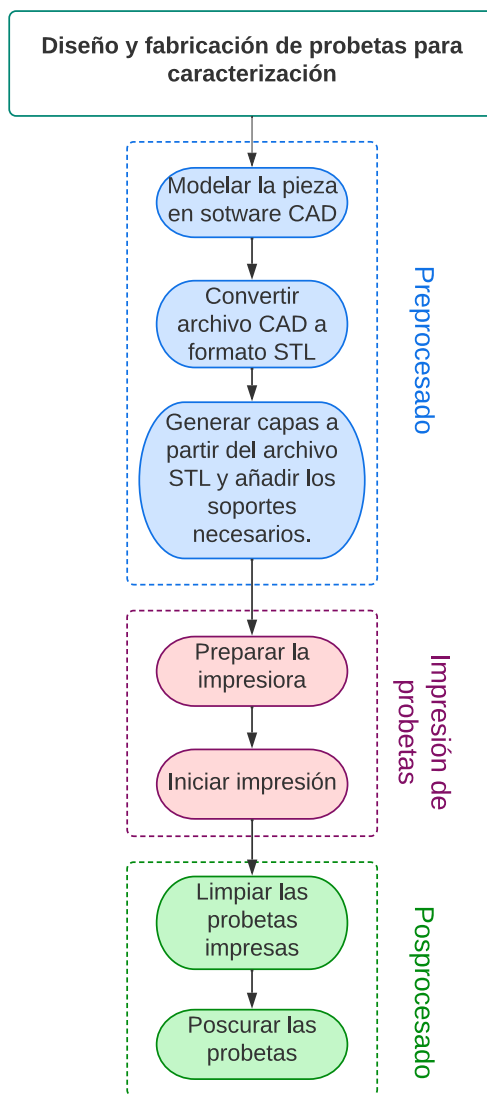


Nota. Dirección de impresión: eje Z.

Diseño y fabricación de probetas para caracterización

Figura 14

Diagrama de flujo del diseño y fabricación de probetas



Nota. Para más detalles ver el protocolo de caracterización en el Apéndice 1.

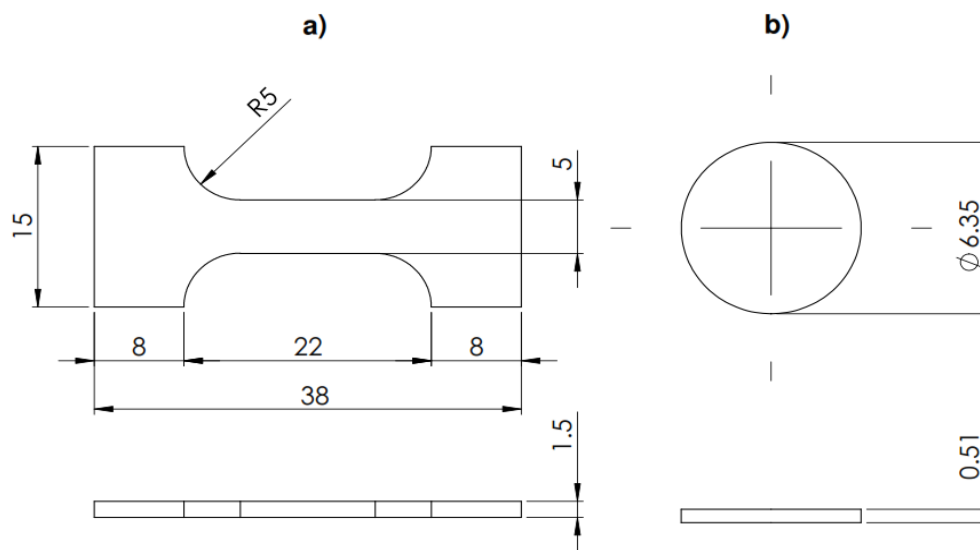
En la Figura 14 se describe el proceso de diseño y fabricación de las probetas que serán caracterizadas. A continuación se describe brevemente este proceso.

Diseño CAD

Las probetas fueron diseñadas en software CAD siguiendo los parámetros dimensionales expresados en las normas ASTM D1708 para las probetas del ensayo de microtensión que serán denominadas de ahora en adelante como MT y ASTM F2977 para las probetas de microperforado que serán denominadas como MP. En la Figura 15 se indican sus medidas respectivamente.

Figura 15

Diseño de probetas para caracterización. a) Probeta MT. b) Probeta MP.



Nota. Medidas en milímetros.

Impresión de probetas mediante SLA

Materiales y equipos

Impresora Form 3+ de SLA de FormLabs (Hoja técnica, Apéndice 2)

Resinas FormLabs: Grey, High Temp y Clear (Hoja técnica, Apéndice 3)

Alcohol Isopropílico 97%

Cámara de poscurado

Paleta para remoción de piezas

Alicate para remoción de soportes

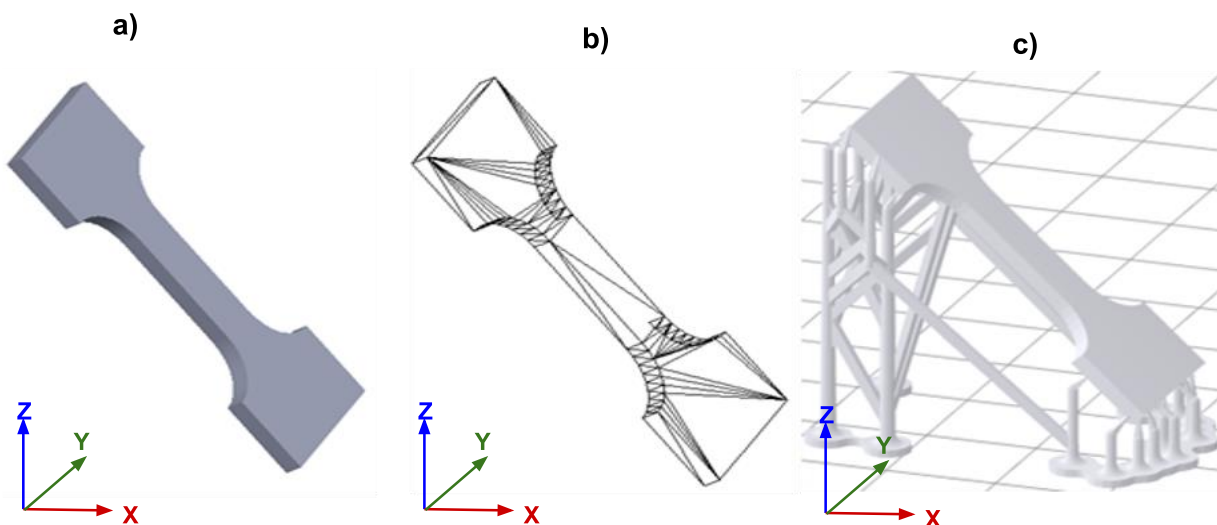
Fuente de aire comprimido

Preprocesado

El archivo CAD fue exportado en formato STL con una máxima tolerancia de desviación de 0,02 [mm] y máxima tolerancia de ángulo de 10°. Posteriormente, el archivo STL fue procesado en el software PreForm (Formlabs, 2022b), donde se generaron las capas respectivas para la impresión. Además, en este paso también se añadieron los soportes necesarios para cada parte como se muestra en la Figura 16 c). Como último paso, cada archivo fue enviado hacia la impresora. Este procedimiento es realizado para ambos tipos de probetas.

Figura 16

Preprocesado. a) Archivo CAD. b) Archivo STL. c) Procesado de probeta en PreForm.



Impresión de probetas

Las impresiones se llevaron a cabo en la impresora Form 3+ de Formlabs, la cual tiene una resolución de 25 $[\mu\text{m}]$. Se realizaron 9 impresiones siguiendo las configuraciones obtenidas en el planteamiento del diseño experimental, es decir considerando el tipo de fotoreolina, espesor de capa y orientación. Cada grupo de impresión incluyó ambos tipos de probetas. En la Figura 17 se observa las probetas impresas.

Figura 17

Probetas impresas. a) Probetas de fotoreolina Clear, orientación B45XY y espesor de capa 100 $[\mu\text{m}]$. b) Probetas de fotoreolina Grey, orientación XY y espesor de capa 25 $[\mu\text{m}]$.



Posprocesado

Una vez impresas, todas las probetas fueron “lavadas” como lo indica el fabricante (Formlabs, 2022a) con el fin de eliminar la resina no curada de la superficie de las piezas impresas sumergiéndolas en alcohol isopropílico al 97% durante 10 minutos y luego secadas con aire comprimido durante 2 minutos. Las estructuras de soporte fueron retiradas con alicates. Posteriormente, las probetas fueron colocadas en una cámara de poscurado frente a una luz LED de 1,10 $[\text{mW}/\text{cm}^2]$, longitud de onda de 365 $[\text{nm}]$ y potencia de 48 $[\text{W}]$ a una

temperatura de 80 [°C]. El tiempo de poscurado fue variable según el diseño experimental planteado. Las probetas finales se muestran en la Figura 19.

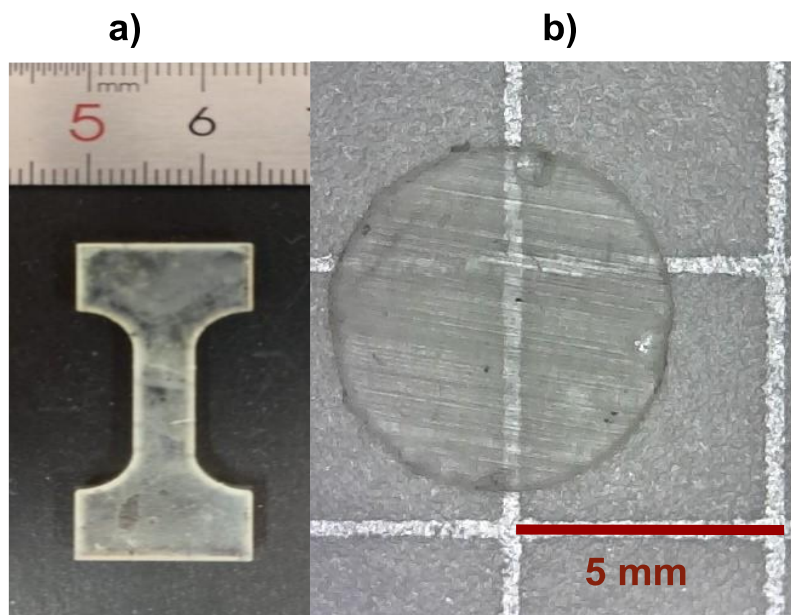
Figura 18

Lavado de probetas con alcohol isopropílico al 97%.



Figura 19

Probetas finales. a) Probeta MT impresa. b) Probeta MP impresa.



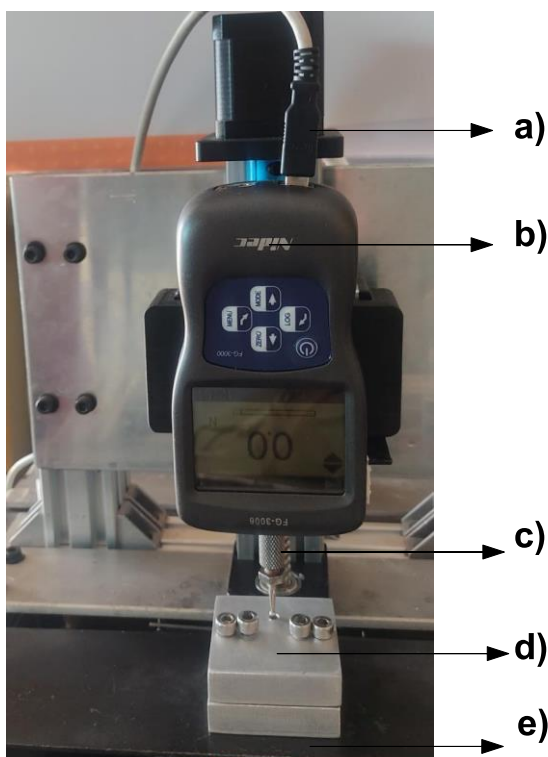
Fabricación del sistema de caracterización

Plataforma de microperforado

La plataforma para ensayos de microperforado realizada se muestra en la Figura 20. Esta es una adaptación realizada sobre la máquina destinada para la medición de fuerzas de separación en impresión por DLP que se muestra en la Figura 21, donde se observan sus componentes. El objetivo de este ensayo es medir la fuerza de punzonado junto con el desplazamiento ocurrido en el material producto de dicha fuerza.

Figura 20

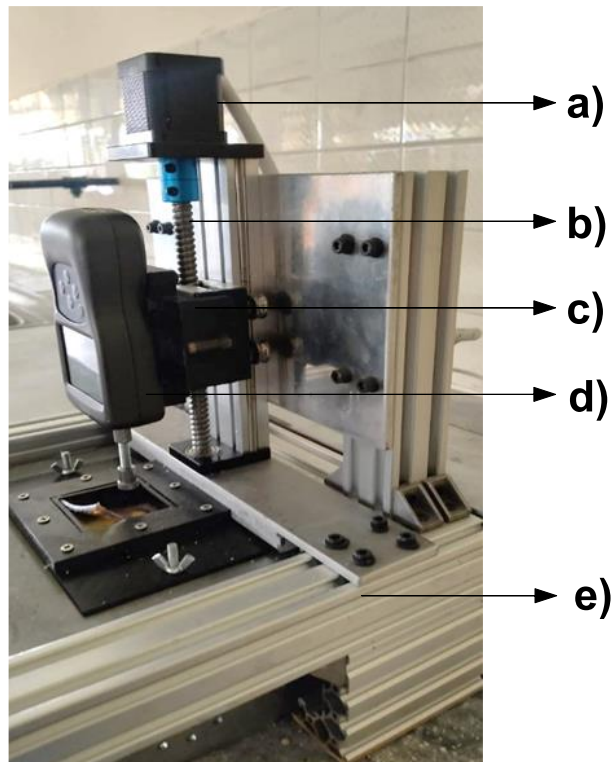
Plataforma para ensayos de microperforado. a) Bus para adquisición de datos. b) Sensor de fuerza. c) Punzón. d) Soporte para probetas. e) Placa base.



Los planos de la placa base y de los soportes para las probetas se encuentran en el Apéndice 4.

Figura 21

Máquina para medición de fuerzas de separación en impresión por DLP. a) Motor a pasos NEMA 17. b) Husillo de bolas. c) Guía lineal. d) Sensor de fuerza FG-3006. e) Estructura.



Nota. Los demás componentes y subsistemas no son identificados, ya que no son utilizados para la plataforma de caracterización.

Medición de fuerza

La fuerza de punzonado es medida en tiempo real con el sensor de fuerza FG-3006, Figura 20 b). El sensor tiene un rango de 100 [N] con una exactitud de ± 0.3 [%] F.S. y cuenta con un puerto USB para la adquisición de datos.

Calibración del sensor de fuerza

Debido al desempeño del material del sensor o a la influencia de factores externos, puede haber errores de cierto nivel después de un periodo de uso.

En la hoja técnica (Apéndice 5) se recomienda enviar el sensor de fuerza a una organización de pruebas especializada para su calibración. Sin embargo, también indica que si se dispone de pesos de fuerza u otra carga estándar y un banco de pruebas, se puede utilizar el procedimiento detallado en la hoja técnica para calibrar el sensor.

Punzón para microperforado

El punzón de la Figura 20 c) fue adaptado de un instrumento para realizar punteado artístico. Tiene una longitud de 40 [mm] con una punta esférica de 2,56 [mm] de diámetro la cual tiene contacto directo con las probetas para su perforado. Cuenta con un adaptador de rosca M6 que permite el acople adecuado con el eje de medición del sensor de fuerza. En la Figura 22 se observa a detalle la herramienta.

Figura 22

Punzón para microperforado



Matrices de soporte para probetas

Las dimensiones de las matrices de soporte para las probetas son mostradas en el plano encontrado en el Apéndice 4. El diseño realizado toma en cuenta las dimensiones propuestas por ASTM F2977, sin embargo, se propone medidas con hasta 0,5 [mm] adicionales, debido a que las probetas impresas presentan dimensiones superiores de espesor y diámetro. En la Figura 23 se muestra un esquema del aparato de soporte para probetas MP, observándose las matrices de soporte superior e inferior y la ubicación de la probeta. En la Figura 24 se muestran las matrices de soporte fabricadas de duraluminio.

Figura 23

Aparato de soporte para probetas MP.

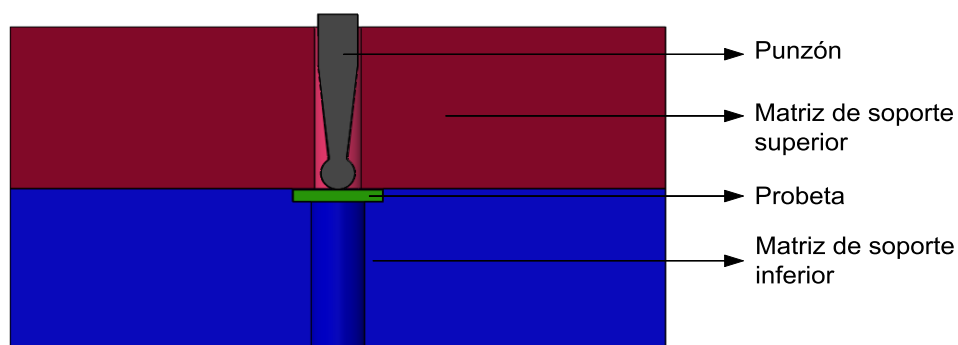
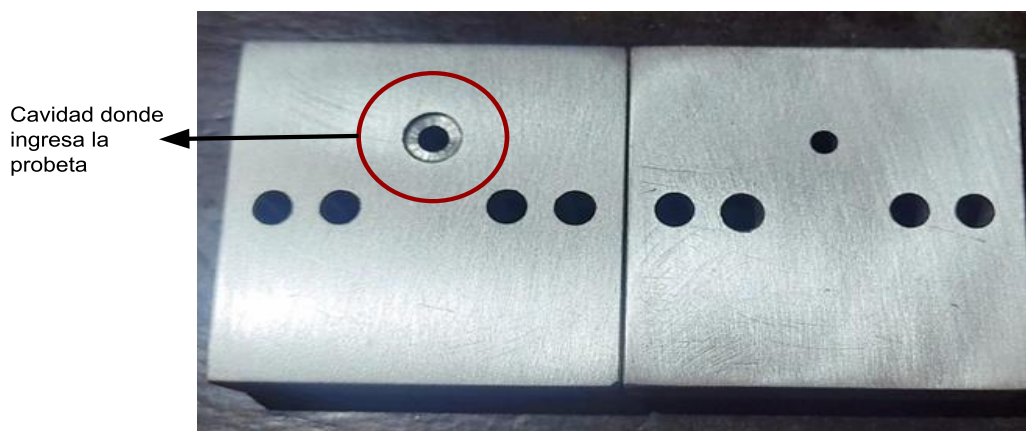


Figura 24

Matrices para soporte de probetas.



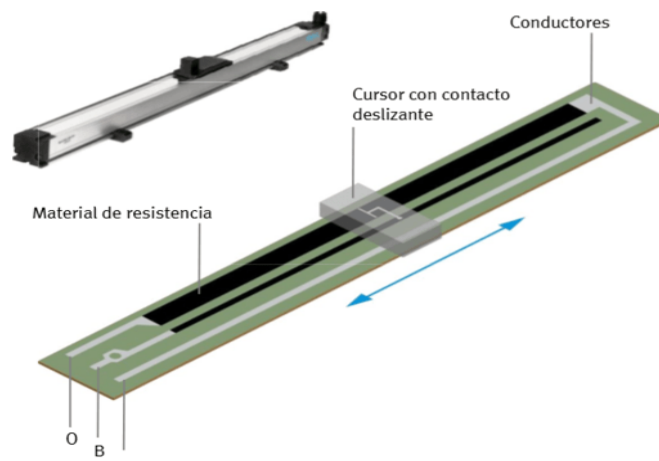
Microcontrolador

El microcontrolador escogido fue la tarjeta Arduino Mega, por su versatilidad y compatibilidad con diversos módulos y sensores de bajo costo. Arduino Mega es una placa basada en el microcontrolador ATmega2560, la cual posee 54 pines digitales y 16 analógicos con una velocidad de reloj de 16 [MHz] y una memoria Flash de 256 [KB] lo que facilita el control de varias entradas y salidas.

Medición de desplazamiento

Se realizaron varias pruebas para medir el desplazamiento ocurrido al aplicar la fuerza de punzonado, empleando diferentes instrumentos.

En primera instancia, se utilizó un potenciómetro lineal el cual varía su resistencia en función del movimiento del cursor (Figura 25). Se genera un voltaje proporcional a la variación de la resistencia del potenciómetro, el cual es transmitido a un convertidor analógico digital de 16 bits, para asegurar una mayor resolución de conversión que la del microcontrolador utilizado que es de 10 bits, como se expresa en los resultados de las Ecuaciones 2 y 3. El conversor analógico digital utilizado fue el módulo ADS 1115 que se muestra en la Figura 26 (Hoja de datos, Apéndice 6).

Figura 25*Potenciómetro lineal*

Nota. Imagen referencial. Tomado de (José Ramón Vaello Sancho, s/f)

Figura 26*Convertor analógico digital ADS 1115.*

Considerando que la salida del convertor es un entero con signo (es decir que utiliza un bit para determinar el signo positivo o negativo), se utilizan solo 15 bits lo que significa que hay 32768 valores posibles (2^{15}). Además, este dispositivo permite tener una ganancia programable, PGA (Programmable-Gain Amplifier), lo que aumenta su resolución mediante la variación del voltaje de referencia de conversión. En la Tabla 3 se detallan los valores posibles de voltaje para la programación de esta ganancia.

Tabla 3

Voltajes de referencia posibles para la programación de la PGA

PGA	Referencia, VR [V]
2/3	6,144
1	4,096
2	2,048
4	1,024
8	0,512
16	0,256

Un regulador de voltaje que permita obtener los valores para la referencia de conversión fue requerido, por lo que se utilizó el convertidor de voltaje tipo Buck LM2596 (Hoja técnica, Apéndice 7), el cual proporciona una salida de 1,25 a 37 [V] DC. El conversor fue ajustado para que su salida sea de 2,048 [V] a fin de obtener un PGA de 2. Con la Ecuación 3 se calcula el mínimo valor de voltaje que es capaz de leer, tomando en cuenta que el máximo valor de lectura es de N-1 por ser 0 el mínimo.

Ecuación 3

Factor de escala

$$F = \frac{V_R}{N - 1}$$

F : Factor de escala [mV]

V_R : Voltaje de referencia [V]

N : Número de bits

Con el voltaje de referencia de 2,048 [V], para el convertidor se obtiene el factor de escala calculado en la Ecuación 4. Considerando que el microcontrolador utilizado, Arduino

Mega, es de 10 bits y su voltaje de referencia es 5 [V], el factor de escala es el calculado en la Ecuación 5, demostrándose que la resolución del sensor de aumenta gracias al convertidor.

Ecuación 4

Factor de escala para el convertidor analógico digital ADS 1115 con una referencia de 2,048 [V].

$$F = \frac{2,048 [V]}{2^{15} - 1} = \frac{2,048 [V]}{32\,767} = 0,0625 [mV]$$

Ecuación 5

Factor de escala para el microcontrolador con una referencia de 5 [V].

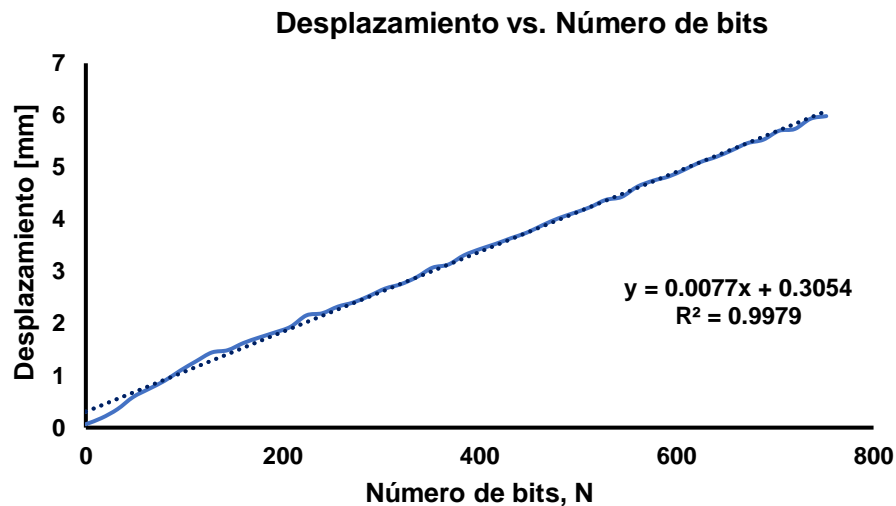
$$F = \frac{5 [V]}{2^{10} - 1} = \frac{5 [V]}{1023} = 4,8876 [mV]$$

Calibración del potenciómetro

El potenciómetro fue calibrado a través de la obtención de datos de entrada (desplazamiento en [mm]) y salida (número de bits, N) para obtener la curva característica del sensor y adquirir los datos de manera más precisa. Se tomó como referencia el desplazamiento realizado por el husillo de bolas según los pasos dados por el motor NEMA 17 (Hoja técnica, Apéndice 8) que fue calculado utilizando la Ecuación 5. Al mismo tiempo que se tomaron datos del número de bits entregado por el potenciómetro, se registró su correspondiente desplazamiento calculado a partir de los pasos ejecutados por el motor. En la Figura 27 se muestra la curva característica del potenciómetro lineal y la ecuación de calibración a implementar en el código para la adquisición de datos.

Figura 27

Curva de calibración para potenciómetro lineal



A pesar de haber realizado el acondicionamiento del potenciómetro y su calibración, la resolución que se obtuvo para el desplazamiento es de 0,2 [mm], valor que no favorece al ensayo de microperforado, dado que el desplazamiento para este tamaño de probetas está en el orden de los 10 [μ m].

Sin embargo, el sistema trabaja con el motor a pasos tipo NEMA 17 permite obtener una posición de manera precisa según el número de pasos y el paso del husillo al cual está acoplado. El motor fue programado para avanzar 1600 pasos por vuelta y el paso del husillo de bolas para el desplazamiento vertical es de 5 [mm], es decir que permite recorrer esta distancia al completar una vuelta. Utilizando la Ecuación 6 para calcular la distancia recorrida dado el número de pasos se determina que por cada paso del motor el punzón recorre 0,003 [mm].

Ecuación 6

$$d_p = \frac{p}{P_M} = \frac{5}{1600} = 0,003 \text{ [mm]}$$

d_p : Desplazamiento por paso, [mm].

p : Paso del husillo de bolas, [mm].

P_M : Número de pasos que el motor realiza en una vuelta.

Ecuación 7

Para $n \geq 0$ y con el valor inicial de $d_0 = 0$

$$d_{n+1} = d_p + d_n$$

d_{n+1} : Desplazamiento actual, [mm].

d_p : Desplazamiento por paso, [mm].

d_n : Desplazamiento anterior, [mm].

Los datos de desplazamiento fueron calculados a través del empleo de la Ecuación 7 dentro de la programación, realizando este cálculo en cada paso realizado como se muestra en la Figura 29. Estos datos son los que se tomaron como válidos para el sistema de caracterización. Sin embargo, con el fin de mejorar la calidad del sistema se requiere utilizar un instrumento de alta sensibilidad y resolución capaz de medir el desplazamiento de una manera más confiable, por ejemplo, un sensor LVDT.

Control del movimiento

El movimiento vertical del punzón de microperforado fue controlado a través del movimiento del motor a pasos NEMA 17. El control del motor se realizó a través de la programación en Arduino y control del driver TB6560 (Hoja técnica, Apéndice 9) al cual se le proporciona señales digitales de trabajo y dirección para permitir el movimiento. La configuración del driver está resumida en la Tabla 4.

Tabla 4*Configuración del driver TB6560.*

Voltaje de alimentación DC [V]	Corriente de trabajo [A]	Corriente de paro [%]	Resolución (P_M)	Decaimiento [%]
12	1	20	1/8 (1600)	0

Velocidad del motor

La velocidad del ensayo de microperforado es constante y es de 0,5 [mm/min], según se indica en la NORMA ASTM F2977. Para alcanzar esta velocidad, la velocidad del motor es ajustada de acuerdo con el tiempo de espera entre cada paso. De esta manera, al conocer el paso del tornillo de bolas que es 5 [mm], el tiempo de espera, t_d , entre cada paso es calculado en la Ecuación 8.

Ecuación 8

$$t_d = \frac{60 \cdot p}{v \cdot P_M} = \frac{60 \cdot 5}{0,5 \cdot 1600} = 0,375 \text{ [s/paso]}$$

t_p : Tiempo de espera por paso, [s/paso]

p : Paso del husillo de bolas, [mm]

v : Velocidad del ensayo, [mm/min]

P_M : Número de pasos que el motor realiza en una vuelta

Figura 28

Diagrama de flujo para el control del sentido de giro del motor.

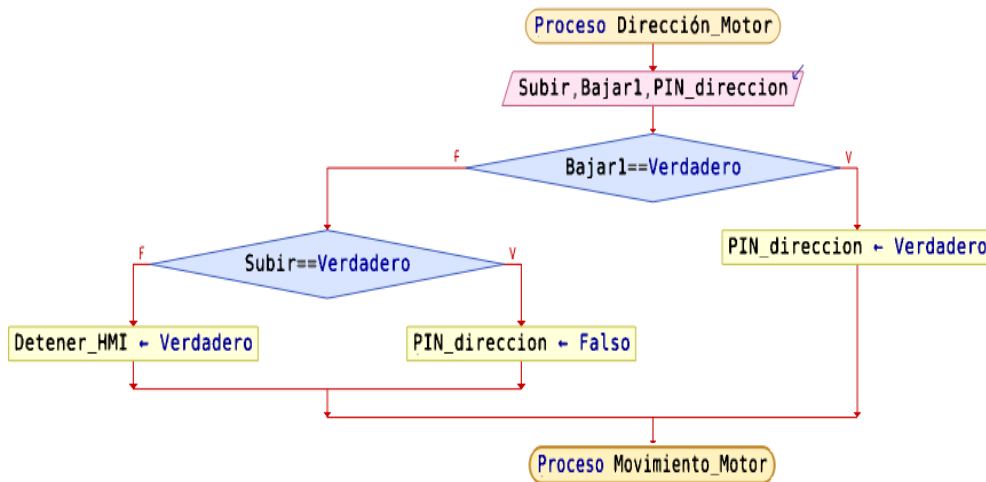
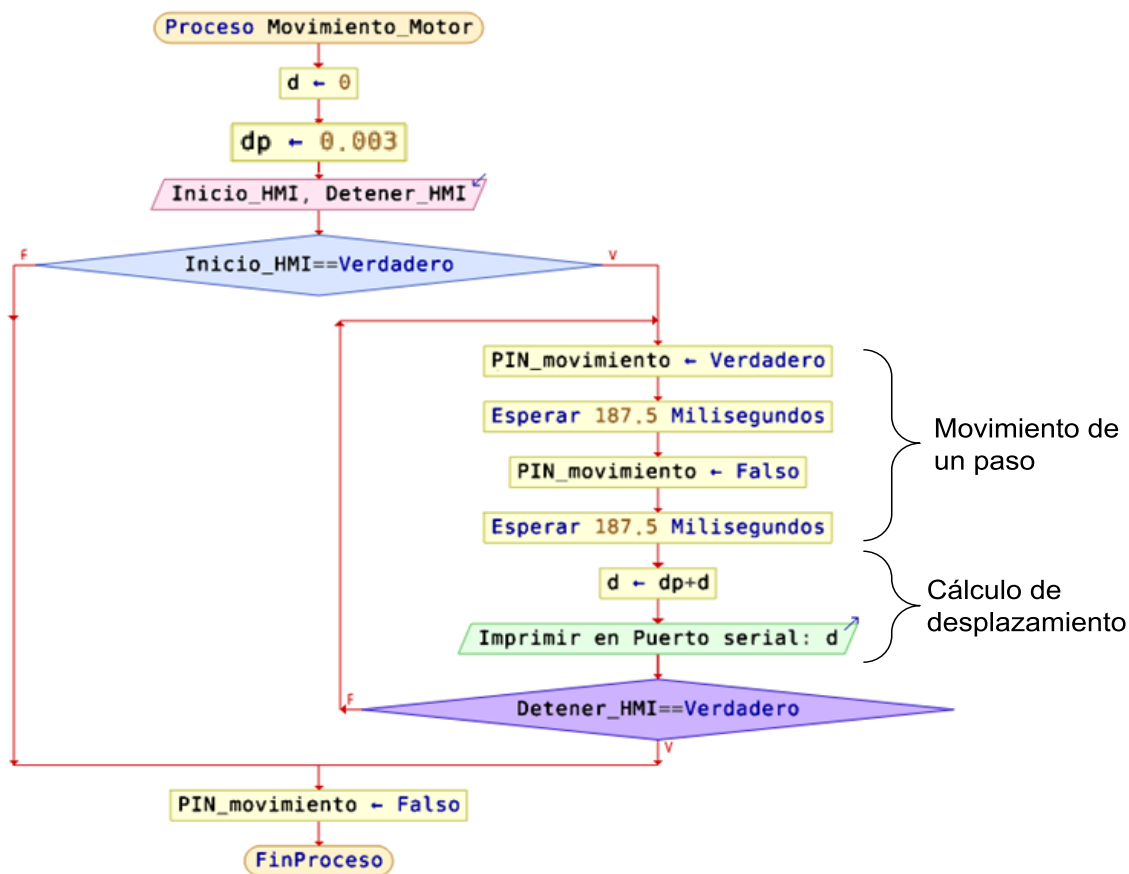


Figura 29

Diagrama de flujo para el control del movimiento del motor.



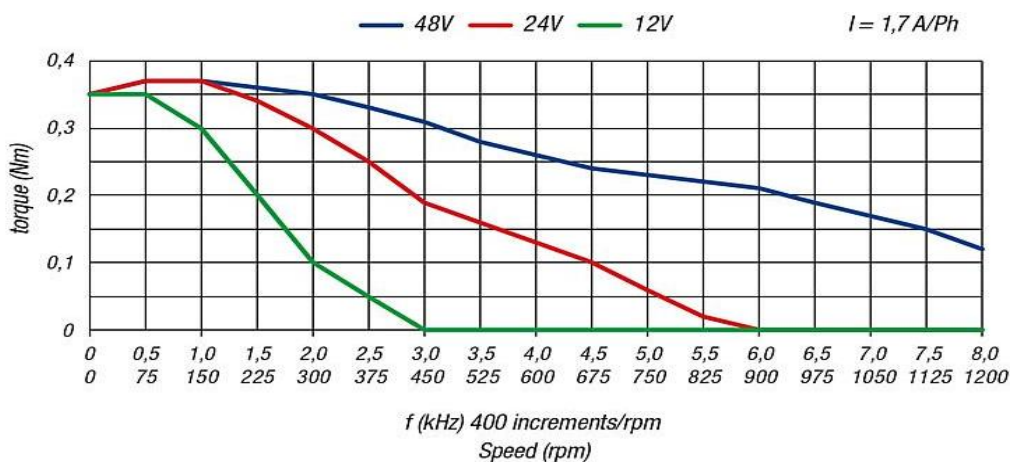
En la Figura 28 se observa el diagrama de flujo correspondiente a la programación para el control del sentido de giro del motor, control que es realizado por el usuario en la interfaz gráfica que se explica más adelante. En la Figura 29 se muestra el control del movimiento del motor, el cual es activado o desactivado desde la interfaz. El tiempo de espera se divide en 2, dado que para ejecutar un paso es necesario activar y desactivar el PIN de salida de movimiento del motor.

El diagrama de conexión del motor con el driver y el microcontrolador se encuentra en Apéndice 10. Se realizaron pruebas donde se comprobó que el husillo completaba una vuelta cada 10 minutos. Considerando el paso del husillo de bolas de 5 [mm], se determina que con la programación del motor antes descrita se alcanzó la velocidad requerida de 0,5 [mm/min]

Cálculo aproximado de la fuerza del sistema

Figura 30

Curva característica para torque de motor NEMA 17



Nota. Tomado de la Hoja técnica, Apéndice 10.

Según la Figura 30 se observa que para 12[V] con una velocidad menor a 75 [rpm] y considerando una corriente por bobinado de 1,7 [A], el valor del torque que produce el motor a

pasos es de aproximadamente 0,35 [Nm]. El motor del sistema presenta una velocidad de 0,1 [rpm] con una corriente máxima por fase de 1,2 [A], por ello se aproxima que el torque producido por el motor es máximo 0,3 [Nm]. Según (HIWIN, s/f) la eficiencia de los husillos de bolas está alrededor del 90%, por su bajo coeficiente de fricción. Sin embargo, se considerará una eficiencia del 80% debido a la falta de lubricación y desgaste que posiblemente ha experimentado el equipo afectando a la transmisión. Se calcula la carga que el motor debe mover sumando los pesos del patín de la guía lineal y el sensor.

Ecuación 9

$$W = (m_s + m_{gl}) \cdot g = (0,6 + 0,4) \cdot 9,8 = 9,8[N]$$

m_s : Masa del sensor, [kg]

m_{gl} : Masa de la guía lineal, [kg]

g : Gravedad, [m/s²]

W : Carga a mover por el motor, [N]

Se calcula aproximadamente la fuerza axial que el sistema es capaz de generar con la Ecuación 10, considerando la carga que producen el patín de la guía lineal y el sensor.

Ecuación 10

$$F = \frac{T \cdot 2000 \cdot \pi \cdot \eta}{p} - W = 291,79 [N]$$

F : Fuerza axial capaz de generar el sistema, [N]

T : Torque del motor a pasos, [Nm]

p : Paso del husillo de bolas, [mm]

η : Eficiencia de transmisión

Adquisición de datos

Los datos del sensor fueron adquiridos mediante una comunicación serial entre el sensor de fuerza FG-3006 y el computador. Los datos de desplazamiento fueron calculados en el microcontrolador Arduino Mega, una vez se complete cada paso del motor como se muestra en el diagrama de flujo del movimiento del motor de la Figura 29.

Ambos datos fueron concatenados para ser adquiridos con un tiempo de muestreo, T_m , de 750 [ms] a través del programa de adquisición de datos realizado en Python. Para esto es necesario conectarse al puerto COM tanto del sensor como de la tarjeta Arduino Mega. Los datos obtenidos son mostrados a través de la interfaz de usuario donde se genera un archivo de tipo CSV con la información de Fuerza y Desplazamiento como se muestra en el esquema de adquisición de datos de la Figura 31. En la Figura 32 se muestra el diagrama de flujo de la adquisición de datos realizada en Python.

Figura 31

Esquema de adquisición de datos

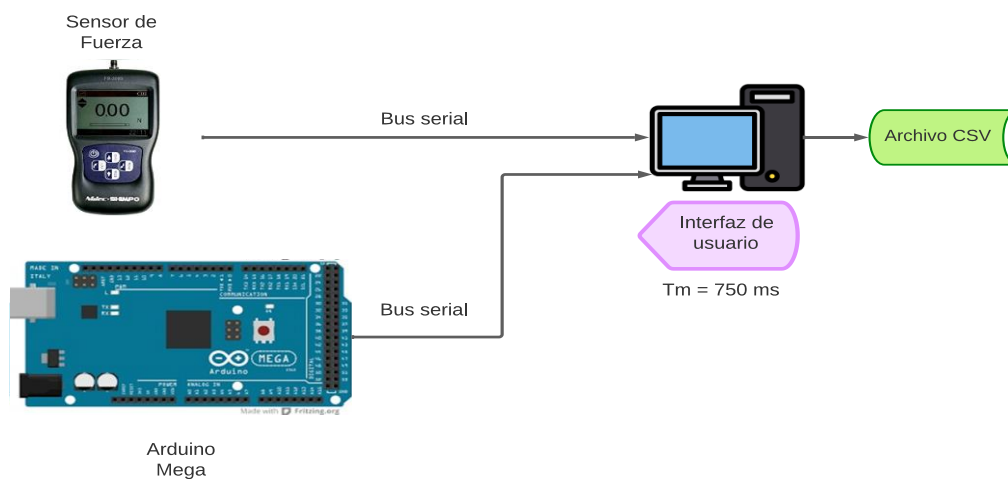
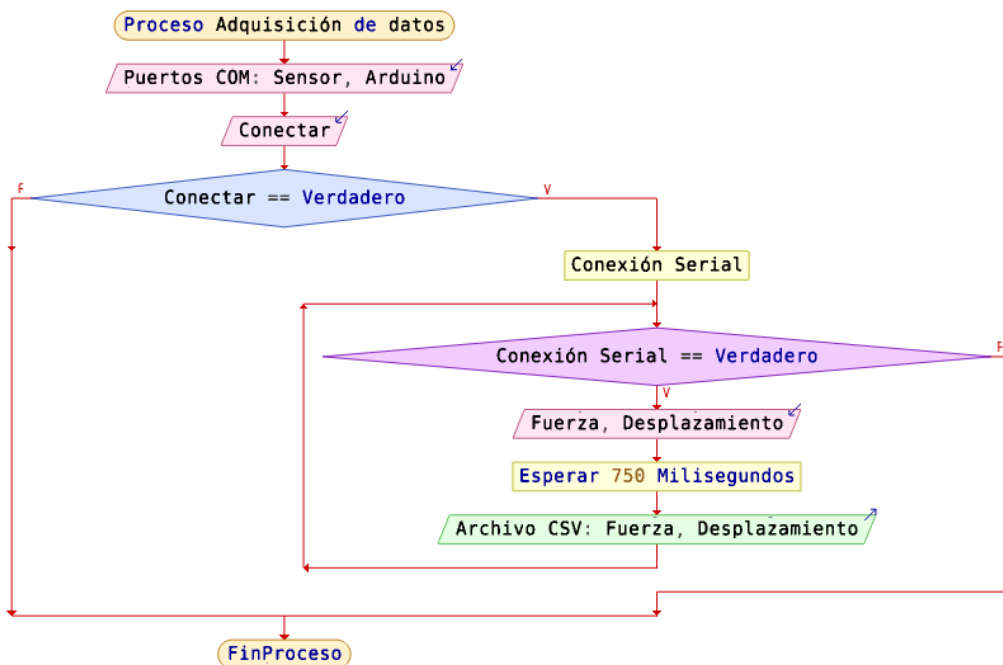


Figura 32

Diagrama de flujo de Adquisición de datos programa en Python.



Interfaz de usuario

La interfaz de usuario fue diseñada en Qt Designer y programada en Python, donde se reúne la adquisición de los datos de cada uno de los puertos seriales (sensor y microcontrolador) y también el control del movimiento del sensor de fuerza. En esta ventana es posible observar en tiempo real los datos que se están adquiriendo de Fuerza y Desplazamiento, a su vez que se observa la gráfica de estos parámetros para un adecuado monitoreo del ensayo. La interfaz de usuario es mostrada en las Figuras 33 y 34.

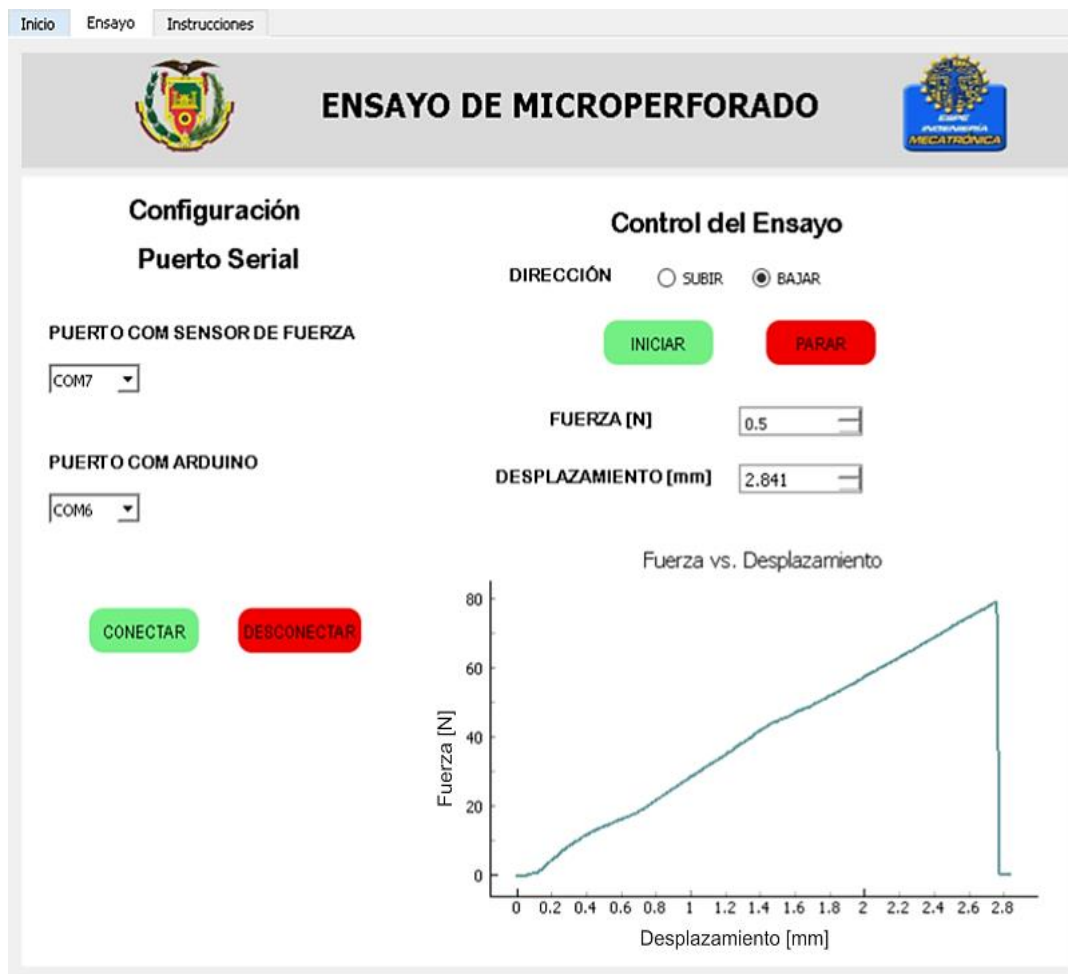
Figura 33

Pestaña de inicio de interfaz de usuario



Figura 34

Pestaña de control del ensayo en interfaz de usuario



En la Pestaña “Ensayo” de la interfaz de usuario de la Figura 34 se realiza la configuración de la conexión tanto del sensor de fuerza como de la tarjeta Arduino a través de sus puertos COM correspondientes. Se realiza la conexión entre el computador y los dispositivos a través del botón “CONECTAR”. Seguidamente, es necesario seleccionar la dirección de movimiento del sensor para luego dar inicio este movimiento con el botón “INICIAR”.

Protocolo experimental

El protocolo desarrollado para la caracterización de las fotoreinas impresas mediante SLA se encuentra en Apéndice 1. En este se indica el procedimiento a seguir desde el preprocesado de las probetas hasta el ensayo de estas. Se realizan dos tipos de ensayos: ensayo a tracción utilizando las probetas MT y ensayo de microperforado utilizando las probetas MP.

Control dimensional de probetas impresas

Con el fin de verificar la calidad de impresión y la diferencias que puede existir entre el modelo CAD y la pieza impresa, se tomaron medidas del espesor y ancho del cuello, obteniéndose los resultados mostrados en las Tablas 5 a 8. En la Figura 35 se muestra la prueba de hipótesis que se sigue para el análisis ANOVA.

Figura 35

Prueba de hipótesis para todos los análisis tipo ANOVA.

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$	

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

De la Figura 35 se plantea que:

Si el Valor $p < \alpha$, entonces rechazar H_0 (Hipótesis nula) y aceptar H_1 (Hipótesis alterna).

Si el Valor $p > \alpha$, entonces no rechazar H_0 (Hipótesis nula) y aceptarla.

Nota: La palabra “aceptar” se emplea solo con fines didácticos.

Figura 36

Gráfica de intervalos para el espesor de probetas MT.

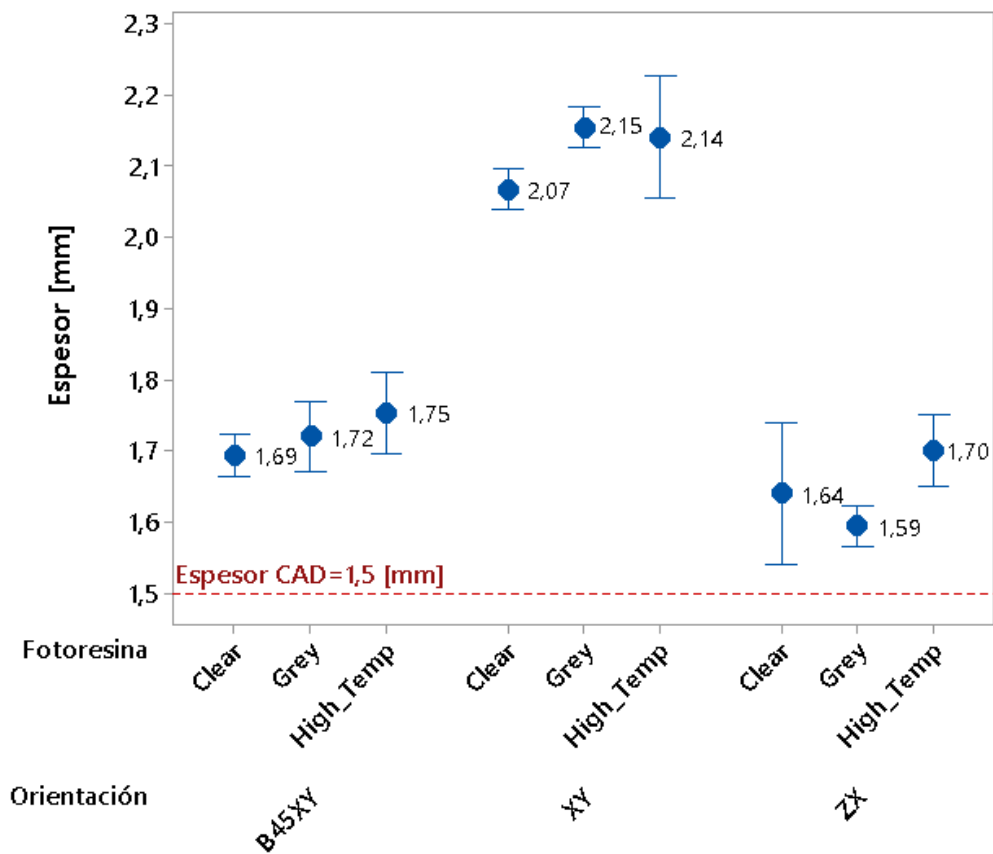


Tabla 5

Análisis de Varianza para el espesor de probetas MT según los diferentes niveles de orientación.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Orientación	2	1,17129	0,585644	312,50	0,000
Error	24	0,04498	0,001874		
Total	26	1,21627			

Valor p ($0 < \alpha$ (0,05))

Rechazando H_0 y aceptando H_1 , no todas las medias son iguales. Existe una diferencia significativa para el espesor de la probeta según las diferentes orientaciones de impresión.

Figura 37

Gráfica de intervalos para el ancho de cuello de probetas MT.

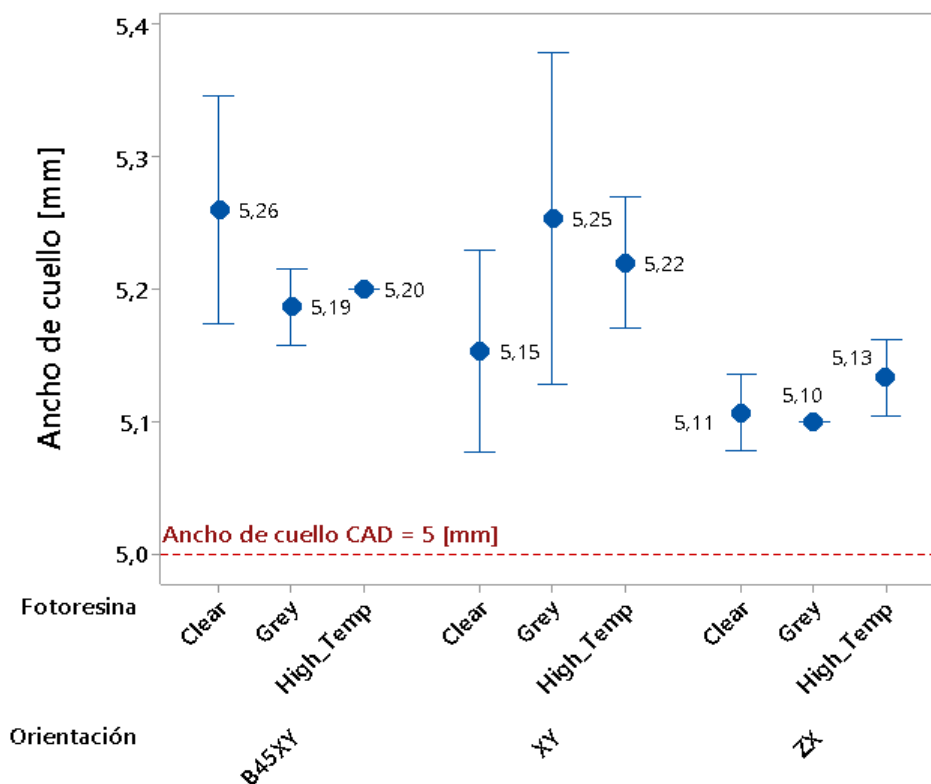


Tabla 6

Análisis de Varianza para el ancho de cuello de probetas MT según los diferentes niveles de orientación.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Orientación	2	0,05887	0,029437	18,83	0,000
Error	24	0,03751	0,001563		
Total	26	0,09639			

Valor $p(0) < \alpha(0,05)$

Rechazando H_0 y aceptando H_1 , no todas las medias son iguales. Existe una diferencia significativa para el ancho de cuello de la probeta según las diferentes orientaciones de impresión.

Figura 38

Gráfica de intervalos para el espesor de probetas MP.

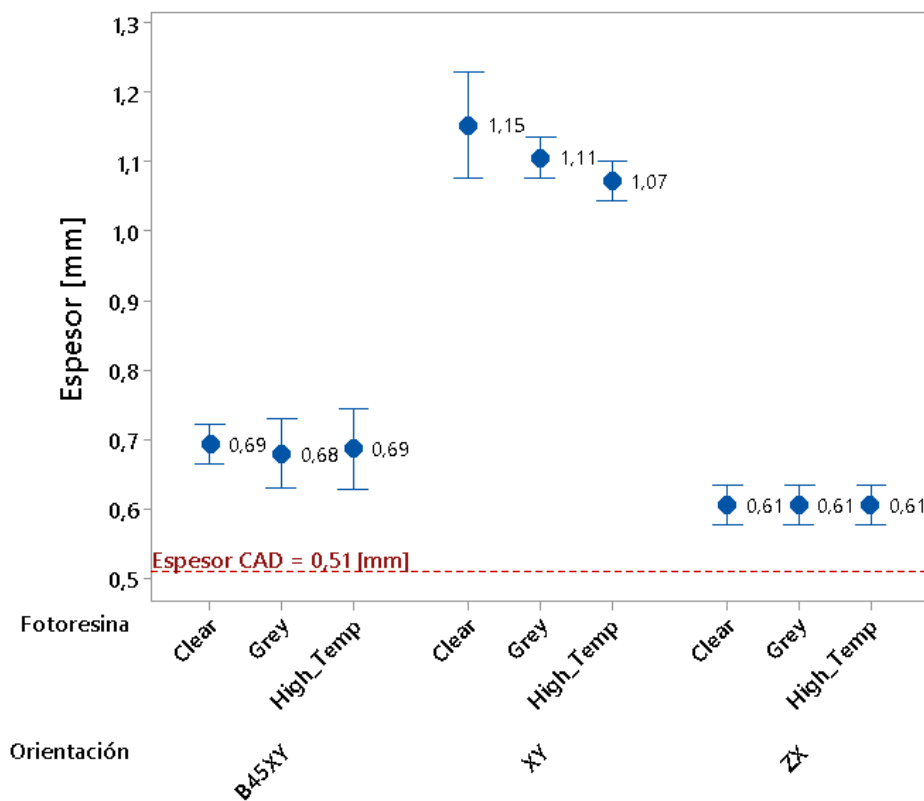


Tabla 7

Análisis de Varianza para el espesor de probetas MP según los diferentes niveles de orientación.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Orientación	2	1,32305	0,661526	1038,44	0,000
Error	24	0,01529	0,000637		
Total	26	1,33834			

Valor p (0) < α (0,05)

Rechazando H_0 y aceptando H_1 , no todas las medias son iguales. Existe una diferencia significativa para el espesor de la probeta MP según las diferentes orientaciones de impresión.

Figura 39

Gráfica de intervalos para el diámetro de probetas MP.

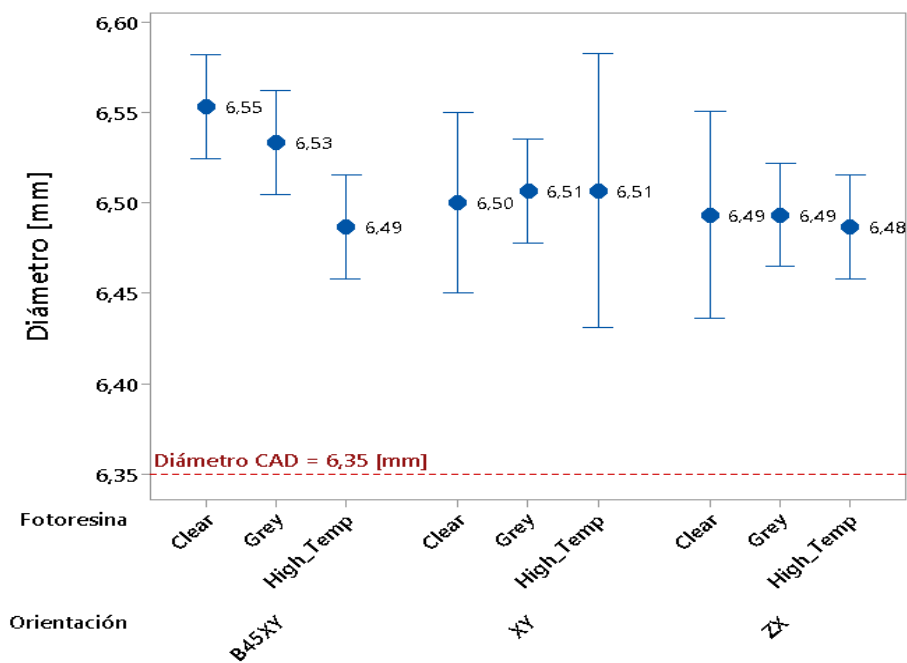


Tabla 8

Análisis de Varianza para el diámetro de probetas MP según los diferentes niveles de orientación.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Orientación	2	0,005067	0,002533	4,85	0,017
Error	24	0,012533	0,000522		
Total	26	0,017600			

Valor p (0,017) < α (0,05)

Rechazando H_0 y aceptando H_1 , no todas las medias son iguales. Existe una diferencia significativa para el diámetro de la probeta MP según las diferentes orientaciones de impresión.

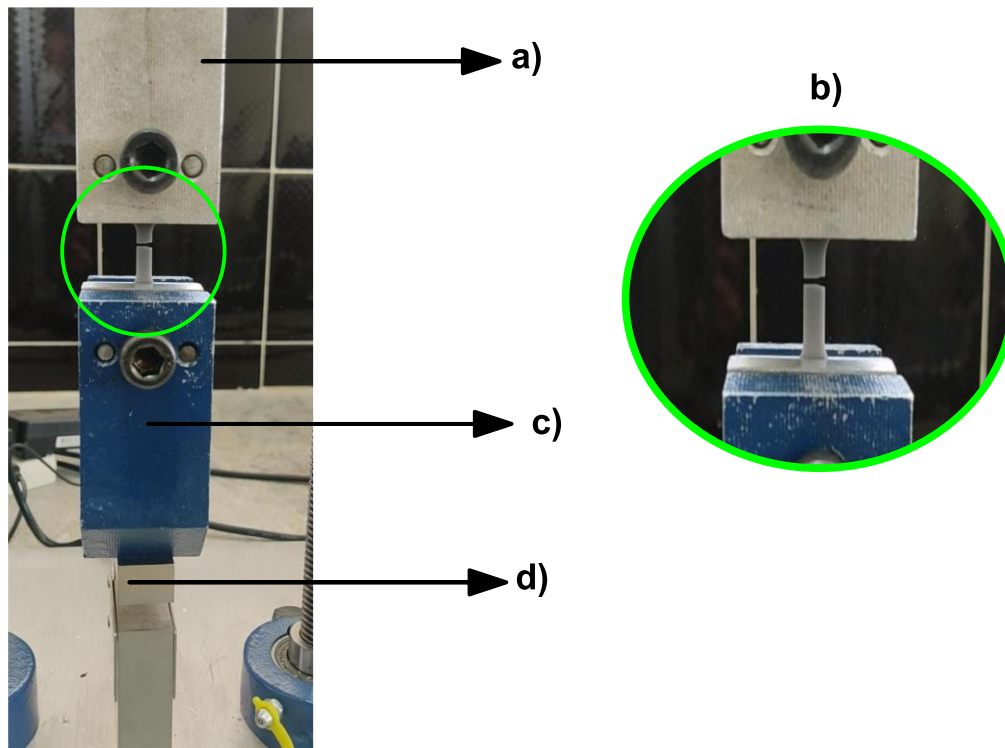
Las probetas presentan dimensiones significativamente diferentes entre las distintas orientaciones de impresión y en ningún caso se cumple que las dimensiones son iguales a las del diseño CAD, sino que las superan.

Ensayo a tracción

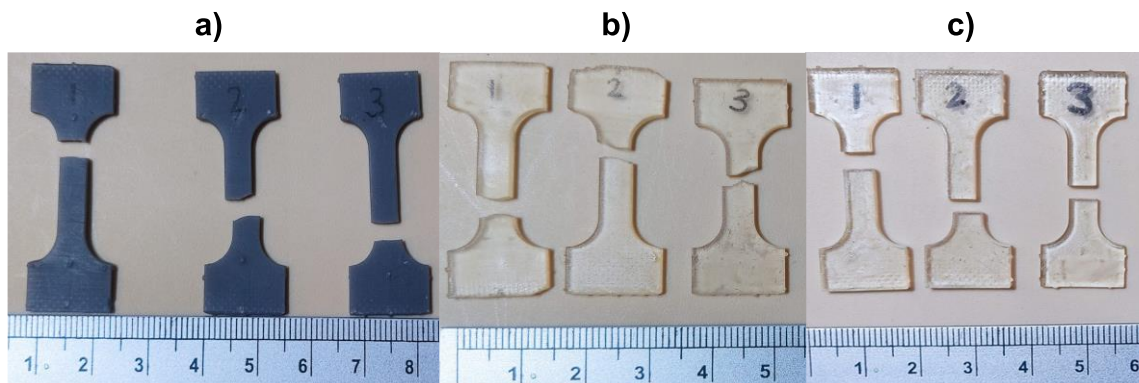
El ensayo a tracción fue realizado en la máquina para ensayos de tracción para probetas pequeñas de plástico del Laboratorio de Resistencia de los Materiales de la Universidad de Las Fuerzas Armadas - ESPE, la cual cuenta con una celda de carga de 100 [kgf]. Todas las probetas fueron ensayadas a una velocidad de 5 [mm/min]. 3 probetas fueron ensayadas para cada configuración del diseño experimental. El ensayo consistió en sujetar a la probeta por el un extremo y por el otro someterla a una fuerza axial hasta su rotura como se muestra en la Figura 40. Se registró la longitud inicial de la probeta, la fuerza, el desplazamiento, el esfuerzo y la deformación durante el ensayo.

Figura 40

Ensayo a tracción de probetas MT. a) Mordaza superior. b) Probeta ensayada: fotoresina Grey. c) Mordaza inferior. d) Celda de carga.

**Figura 41**

Probetas ensayadas a tracción. Fotoresinas: a) Grey. b) High Temp. c) Clear.

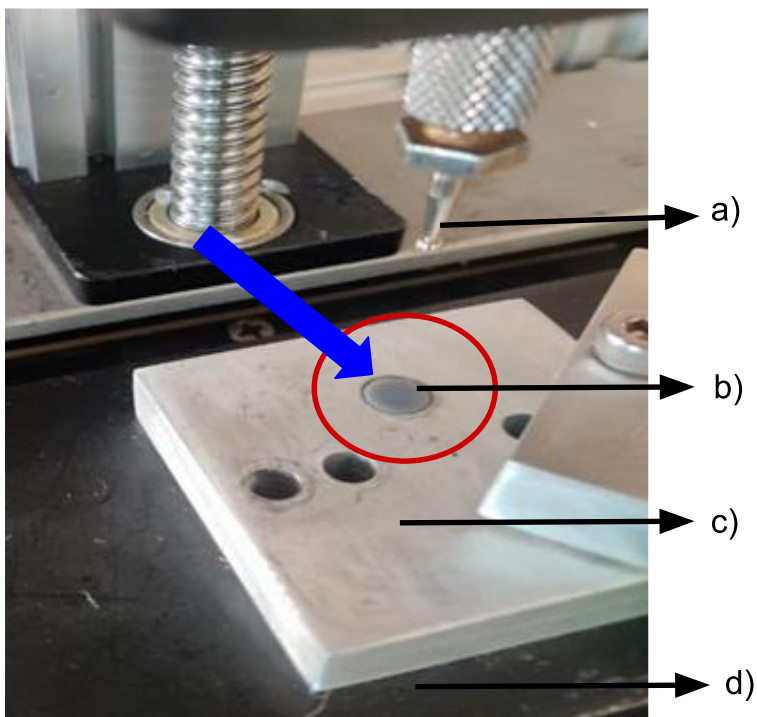


Ensayo de microperforado

El ensayo de microperforado fue realizado en la plataforma de caracterización fabricada antes descrita. La velocidad de ensayo para todas las probetas fue de 0,5 [mm/min], de acuerdo con lo que se especifica en ASTM F2977. 3 probetas fueron ensayadas para cada configuración del diseño experimental. El ensayo consistió en someter a la probeta a una fuerza de punzonado y registrar el valor de fuerza y desplazamiento Figuras 42-45.

Figura 42

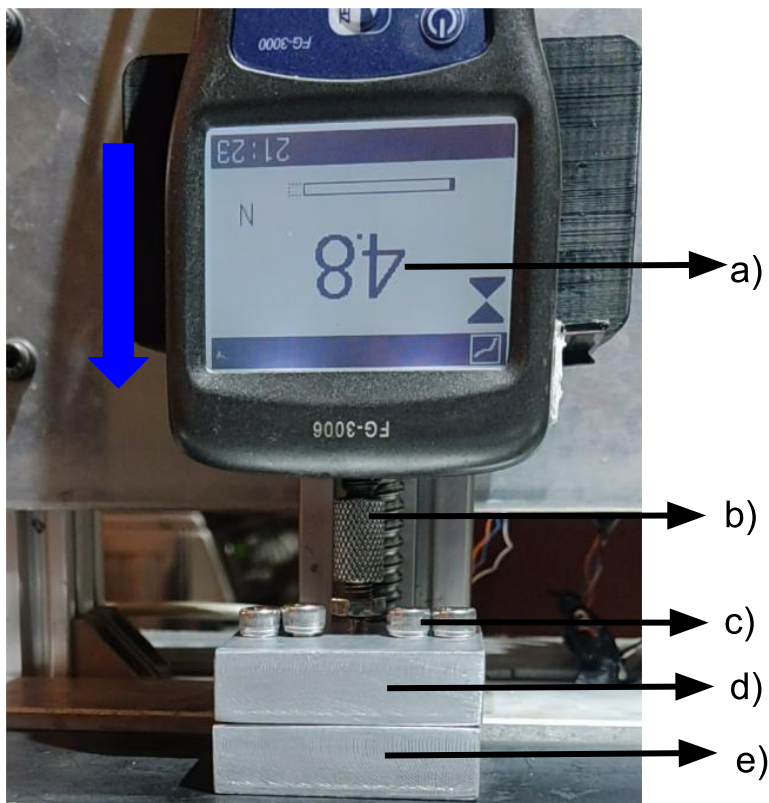
Montaje de la probeta para el ensayo de microperforado. a) Punzón. b) Probeta dentro de cavidad del soporte inferior. c) Soporte inferior. d) Placa base.



Nota. La flecha de color azul indica el ingreso de la probeta dentro de la cavidad del soporte inferior.

Figura 43

Ejecución del ensayo. a) Indicador de fuerza medida. b) Punzón. c) Pernos de sujeción. d) Soporte superior. e) Soporte inferior.

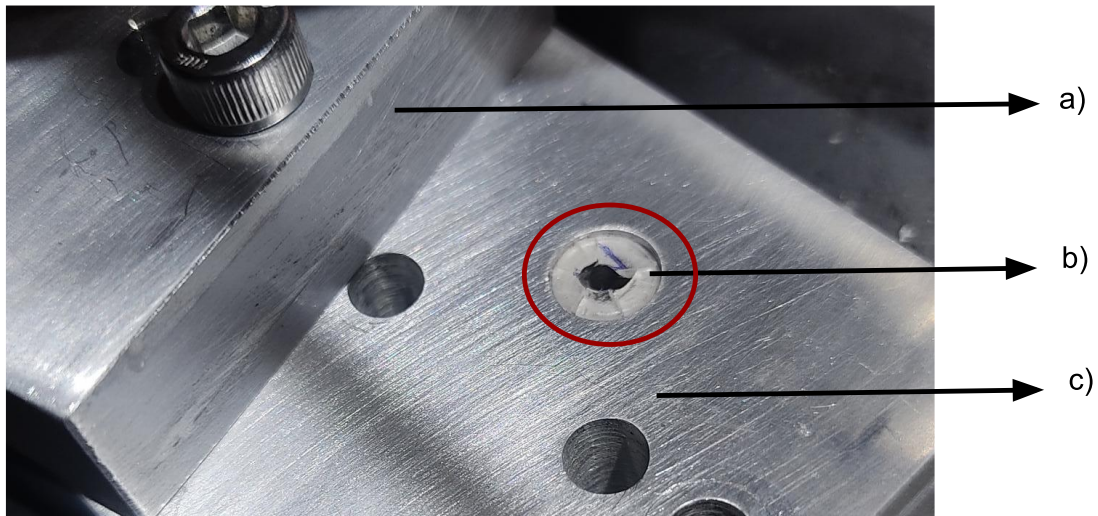


Nota. La flecha de color azul indica que se está realizando un movimiento en dirección vertical hacia abajo.

En la Figura 43 se muestra la ejecución del ensayo, donde el punzón de la Figura 43 b), ingresa a través del agujero del soporte superior de la Figura 43 d). Continúa descendiendo el punzón para ejercer la fuerza de punzonado sobre la probeta montada que se explica en la Figura 42. A partir de aquí se registran los valores de fuerza y desplazamiento ocurridos al punzonar la probeta. En ciertos casos, la probeta es perforada como se muestra en la Figura 44 b). Sin embargo, por razones explicadas más adelante, la probeta solo se deforma en concordancia con la fuerza que recibe del punzón como en la Figura 45 c).

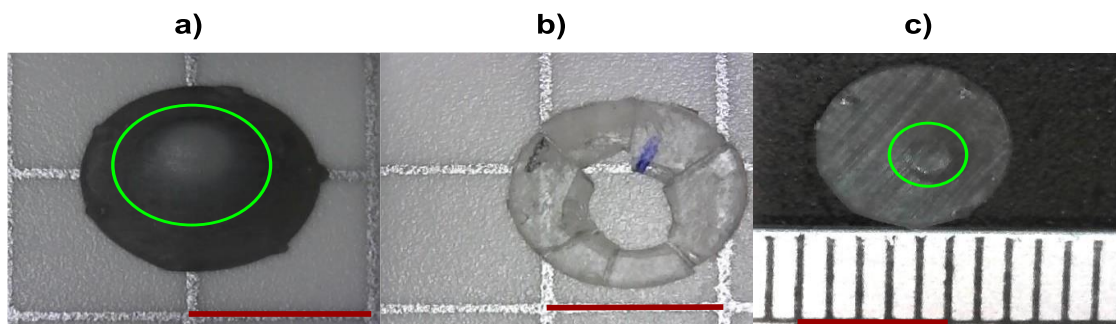
Figura 44

Probeta después del ensayo. a) Soporte superior. b) Probeta perforada después del ensayo. c) Soporte inferior.

**Figura 45**

Probetas del ensayo microperforado. Fotoresinas: a) Grey. b) High Temp. c) Clear.

Escala 5 [mm].



Capítulo IV

Análisis y discusión de resultados

Resultados del ensayo de tracción

Siguiendo las recomendaciones de ASTM D1708 para el ensayo de tracción con las probetas MT, se reportan los resultados del esfuerzo de tracción último y porcentaje de elongación ocurrida.

Esfuerzo de tracción último

En las Figuras 46 a 49 se muestran las gráficas de intervalos para el esfuerzo de tracción último obtenido para cada factor del diseño experimental y su correspondiente análisis ANOVA, mismo que sigue la prueba de hipótesis planteada en la Figura 33.

Figura 46

Gráfica de intervalos para Esfuerzo de tracción último según los diferentes tipos de fotoresinas.

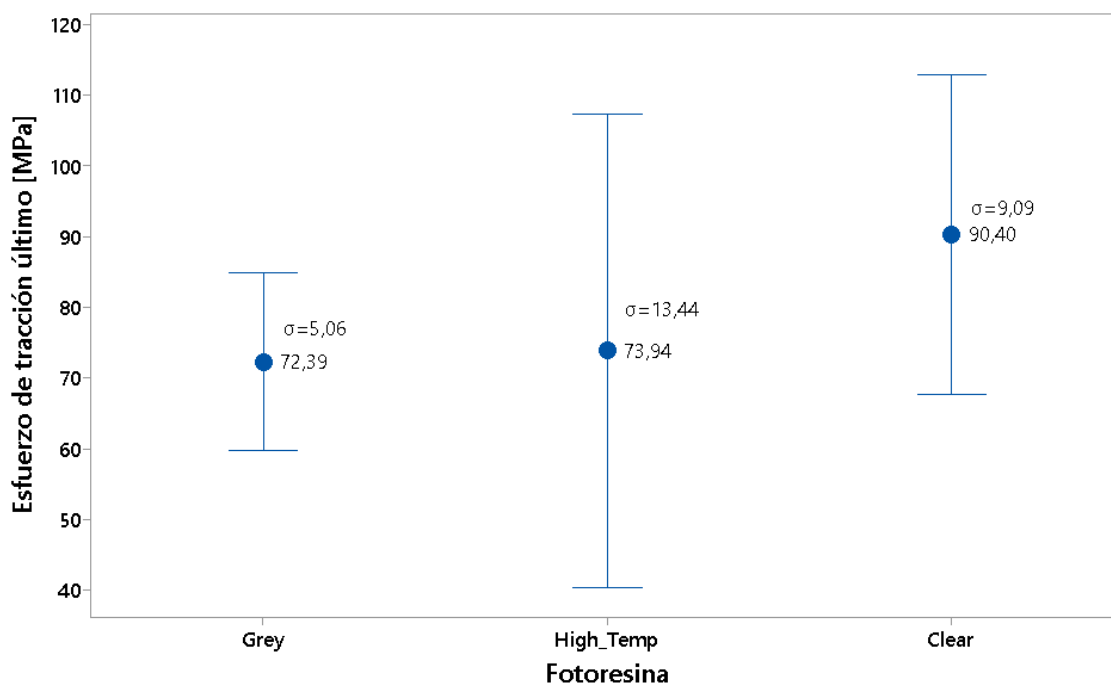


Tabla 9

Análisis de Varianza para el Esfuerzo de tracción último según los diferentes tipos de fotoresinas.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Orientación	2	597,8	298,92	3,10	0,119
Error	6	578,1	96,35		
Total	8	1175,9			

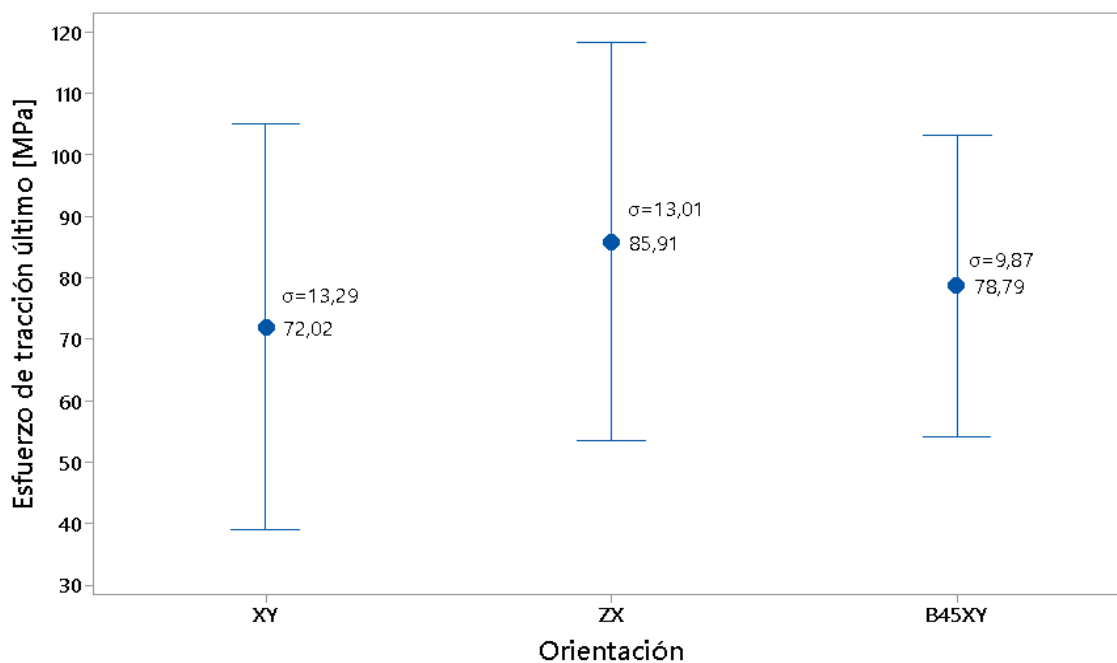
Valor p (0,119) > α (0,05)

De la Tabla 9, se acepta H_0 , lo que indica que todas las medias son iguales. No existe una diferencia significativa para el esfuerzo de tracción último entre los diferentes tipos de fotoresinas.

En la Figura 46 se muestran los intervalos resultantes del esfuerzo de tracción último según el tipo de fotoresina. Se evidencia que la fotoresina Clear presenta el mayor valor medio. Además, se observa una diferencia de 18,01 [MPa] entre los valores medios obtenidos para la fotoresina tipo Clear y la fotoresina tipo Grey, la cual fue la fotoresina que presentó el valor medio. A pesar de que la diferencia entre los resultados de esfuerzo último a tracción no es significativa entre las tres fotoresinas, es evidente la desviación estándar que existe en los resultados de la fotoresina High Temp, donde su menor valor registrado fue de 58,64 [MPa] y su máximo 83,87 [MPa]. Esto no ocurre para la fotoresina tipo Grey que presenta un valor medio similar a la fotoresina High Temp, pero que presenta una baja desviación estándar.

Figura 47

Gráfica de intervalos para Esfuerzo de tracción último según los diferentes niveles de orientación.

**Tabla 10**

Análisis de Varianza para el Esfuerzo de tracción último según los diferentes niveles de orientación.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Orientación	2	289,6	144,8	0,98	0,428
Error	6	886,3	147,7		
Total	8	1175,9			

Valor p (0,428) > α (0,05)

De la Tabla 10, se acepta H_0 , lo que indica que todas las medias son iguales. No existe una diferencia significativa para el esfuerzo de tracción último entre los diferentes niveles de orientación. En la Figura 47 se muestran los intervalos resultantes del esfuerzo

último a tracción por orientación de impresión. Se observa que las probetas impresas en la orientación ZX son las que presentaron un esfuerzo de tracción mayor que las impresas en las otras orientaciones. Más adelante se discute la posible causa de este fenómeno, ya que para esta orientación las capas son adicionadas de manera vertical para formar la probeta y se esperaría que su rotura sea más fácil al someterla a ensayos de tracción, sin embargo, en la impresión por SLA intervienen los parámetros energéticos que modifican este fenómeno.

Figura 48

Gráfica de intervalos para Esfuerzo de tracción último para los diferentes tiempos de poscurado.

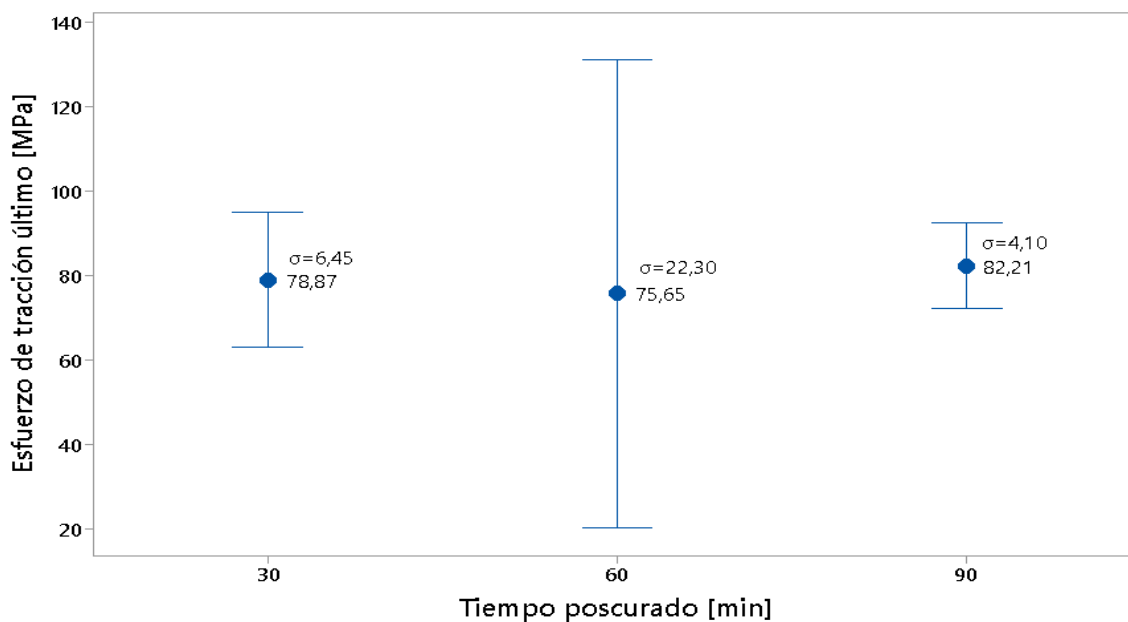


Tabla 11

Análisis de Varianza para el Esfuerzo de tracción último según los diferentes tiempos de poscurado.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo poscurado	2	64,45	32,23	0,17	0,844
Error	6	1111,49	185,25		
Total	8	1175,95			

$$\text{Valor } p (0,844) > \alpha (0,05)$$

Aceptando H_0 , todas las medias son iguales. No existe una diferencia significativa para el esfuerzo de tracción último entre los diferentes tiempos de poscurado. En la Figura 48 se muestran los intervalos resultantes del esfuerzo último a tracción según el tiempo de poscurado. Se observa una mínima diferencia entre los resultados obtenidos entre los tres niveles de tiempo de poscurado. Sin embargo, existe una elevada desviación estándar para el tiempo de 60 minutos, nivel para el cual se obtiene el menor valor medio de esfuerzo a tracción último. Para el tiempo de 90 minutos se obtiene el mayor resultado que solamente difiere en 6,56 [MPa] con el nivel de 60 minutos.

Figura 49

Gráfica de intervalos para Esfuerzo de tracción último para los diferentes niveles de espesor de capa.

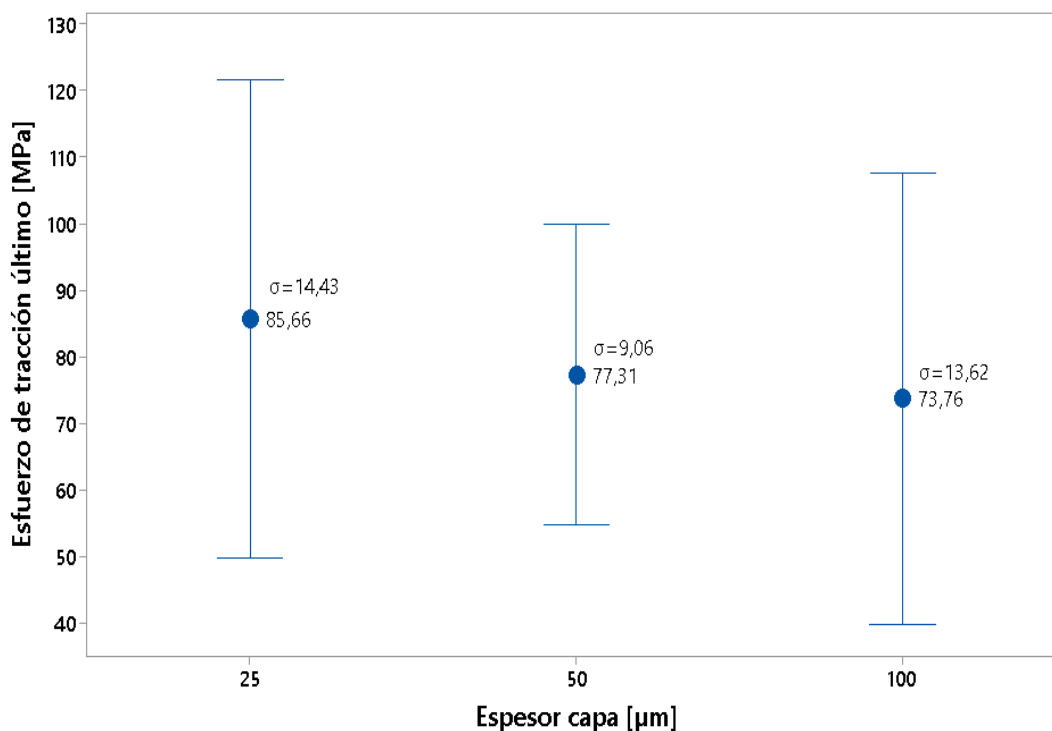


Tabla 12

Análisis de Varianza para el Esfuerzo de tracción último según los diferentes niveles de espesor de capa.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Espesor capa	2	224,1	112,0	0,71	0,530
Error	6	951,9	158,6		
Total	8	1175,9			

Valor p (0,530) > α (0,05)

Por la Tabla 12, se acepta H_0 , lo que indica que todas las medias son iguales. No existe una diferencia significativa para el esfuerzo de tracción último entre los diferentes niveles de espesor de capa. Los intervalos para el esfuerzo de tracción último según el espesor de capa mostrados en la Figura 49, indican que con un espesor de capa de 25 [μm] se obtiene el mayor valor medio de esfuerzo a tracción último. Se muestra una diferencia de 11,9 [MPa] entre el mayor valor medio registrado y el menor, el cual corresponde a un espesor de capa de 100 [μm].

Los resultados ANOVA indican que no existe una diferencia significativa para la respuesta del esfuerzo a tracción último realizando este análisis frente a cada factor de manera independiente. Sin embargo, una alta desviación estándar es observada en la mayoría de los intervalos, por lo que se requiere de otros análisis estadísticos para explorar los efectos de cada factor como el análisis de efectos principales, prueba de Tukey o gráficas de interacciones.

En la Tabla 13 se muestra la relación señal/ruido (S/N). Esta relación mide el efecto de cada factor incluido en el diseño experimental. En este caso, se utilizó la configuración "Más grande es mejor" para calcular la relación S/N.

Tabla 13*Relaciones de Señal/Ruido para Esfuerzo de tracción último*

Nivel	Fotoresina	Tiempo poscurado	Espesor capa	Orientación
1	37,18	37,92	38,57	37,05
2	37,27	37,34	37,72	37,88
3	39,10	38,29	37,25	38,62
Delta	1,92	0,95	1,32	1,57
Clasificar	1	4	3	2

Nota. Configuración: Más grande es mejor

Los valores para Delta representan la variación de la relación S/N dentro del mismo factor, calculado como la relación S/N máxima menos la relación S/N mínima (Garcia et al., 2020). Clasificar muestra el orden de los factores en función del mayor Delta. En este caso, el tipo de fotoresina es el factor más relevante que afectará al esfuerzo de tracción último representando el 33%, seguido por el tipo de orientación con el 27% y el espesor de capa con el 23%.

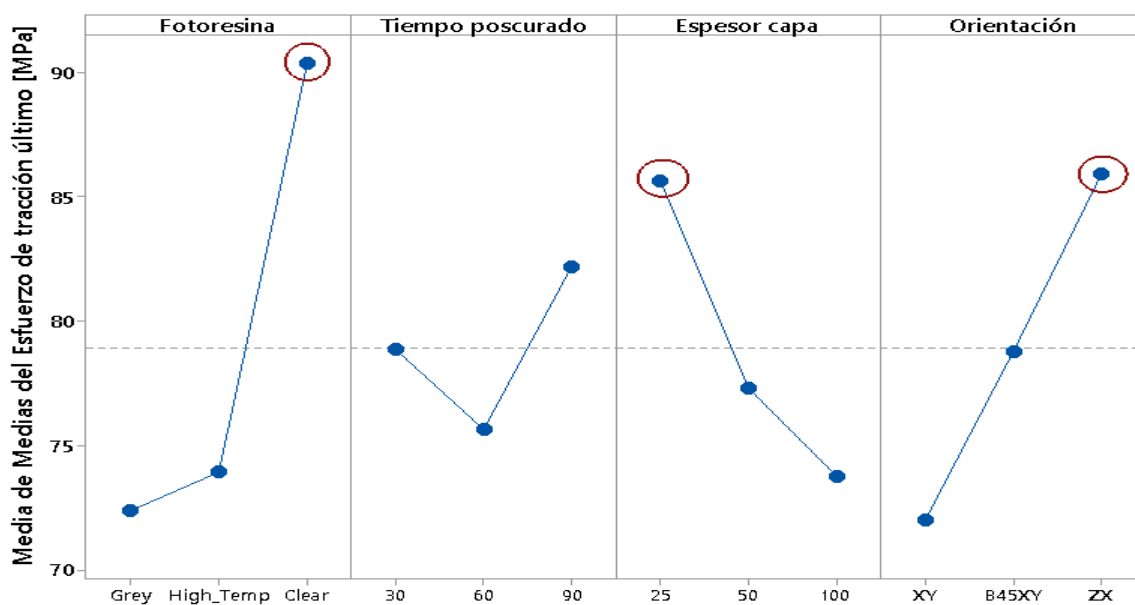
La gráfica de efectos principales para medias para la respuesta esfuerzo a tracción último es mostrado en la Figura 50. Esta gráfica representa la media obtenida de todos los experimentos agrupados por factores y niveles y ratifica que el tipo de fotoresina, la orientación y el espesor de capa son los factores más importantes para la respuesta de esfuerzo de tracción último.

Figura 50

Gráfica de efectos principales para Medias para esfuerzo de tracción último

Figura 51

Gráfica de efectos principales para Medias la fuerza de tracción última registrada



Porcentaje de elongación

Tabla 14

Relaciones de Señal/Ruido para porcentaje de elongación

Nivel	Fotoresina	Tiempo poscurado	Espesor capa	Orientación
1	20,78	22,17	22,31	21,31
2	19,99	19,18	20,89	20,43
3	22,16	21,58	19,73	21,20
Delta	2,18	2,99	2,57	0,88
Clasificar	3	1	2	4

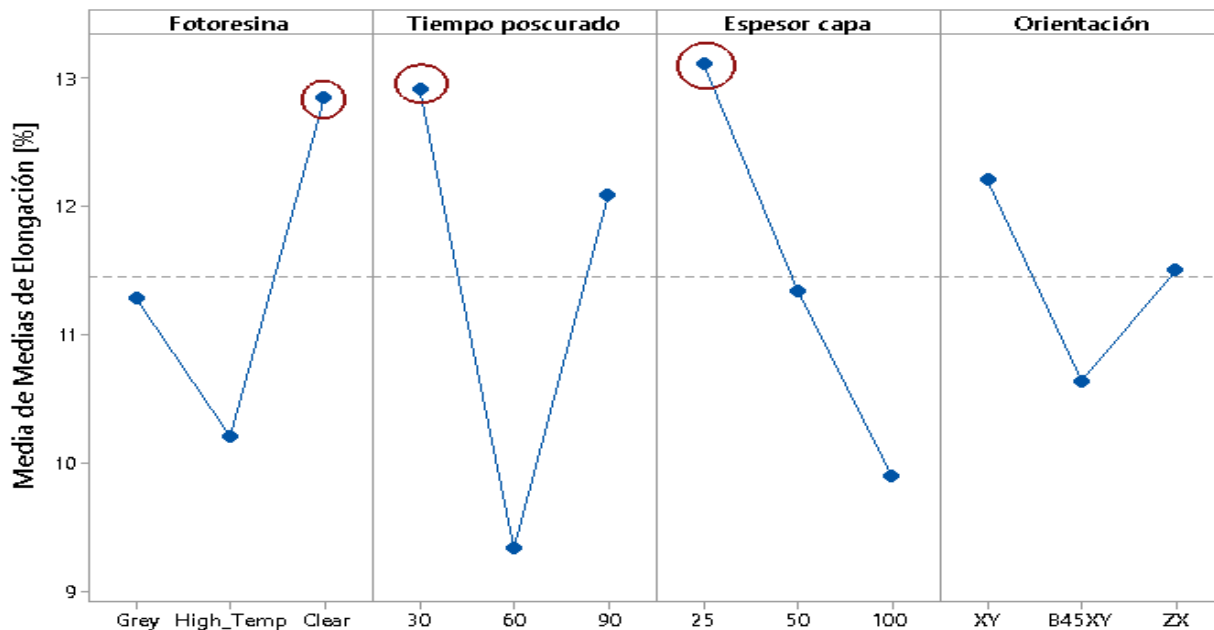
Nota. Configuración: Más grande es mejor.

En este caso, el tiempo de poscurado es el factor más relevante que afectará al porcentaje de elongación representando el 34% de la variación de la respuesta, seguido por el espesor de capa con el 29% y el tipo de fotoresina con el 25%.

La gráfica de efectos principales para medias para la respuesta de elongación es mostrada en la Figura 52. Esta gráfica confirma que el tiempo de poscurado, el espesor de capa y el tipo de fotoresina son los factores más importantes que influyen en la respuesta de porcentaje de elongación.

Figura 52

Gráfica de efectos principales para medias para la elongación



A pesar de que mediante el análisis de ANOVA se determinó que las medias del esfuerzo de tracción último no son significativamente diferentes bajo los diferentes factores, los niveles con los que se obtendría el mayor valor de esta propiedad son mostrados en la Tabla 4.

Tabla 15

Configuración para obtener el mayor valor de esfuerzo a tracción último.

Fotorresina	Tiempo Poscurado [min]	Espesor capa [μm]	Orientación
Clear	90	25	ZX

El valor teórico de este ensayo para la configuración mostrada es un esfuerzo de tracción último de 107,45 [MPa] y una elongación de 15,2%.

De acuerdo con la Figura 50, la respuesta del esfuerzo de tracción último para la orientación XY no es la más favorable, sin embargo, en la Figura 51 se observa que esta

orientación requiere de mayor fuerza para romperse. Esto es explicado por el aumento significativo en las dimensiones de las probetas impresas en esta orientación, debido a la acumulación de resina que se genera entre los soportes y la pieza provocando que en la formación de la siguiente capa el excedente de resina se cure para luego adicionarse a la cara inferior de la probeta. La orientación donde se consiguió una menor variación dimensional fue la orientación ZX, por lo que esta opción sería la que reemplace la orientación XY. No obstante, la orientación ZX presenta la desventaja de generar un mayor número de capas de impresión y si la pieza se imprime con el menor espesor de capa (25 [μm]) el tiempo de impresión asciende considerablemente. Por tanto, un estudio similar a este trabajo considerando el tiempo de impresión sería útil para optimizar recursos manteniendo el comportamiento mecánico de las piezas.

Discusión

Fotoresina

Los resultados indican que la fotoresina que presenta un mayor esfuerzo de tracción último es la resina tipo Clear. Sin embargo, en el análisis de ANOVA observado en la Figura 48 muestra que no hay una diferencia significativa entre las fotoresinas, considerando que la elevada desviación estándar observada especialmente en la resina tipo High-Temp.

Orientación

Las probetas impresas en la orientación ZX presentan una media superior de esfuerzo a tracción último que en otras orientaciones y según lo expresa Garcia et al. (2020), la razón de posiblemente sea que la unión de la capa anterior y la capa actual que se expone es más dúctil que la unión dentro de la propia capa expuesta; llevando a retrasar el punto de rotura y evitando el fallo de las capas.

Tiempo de poscurado

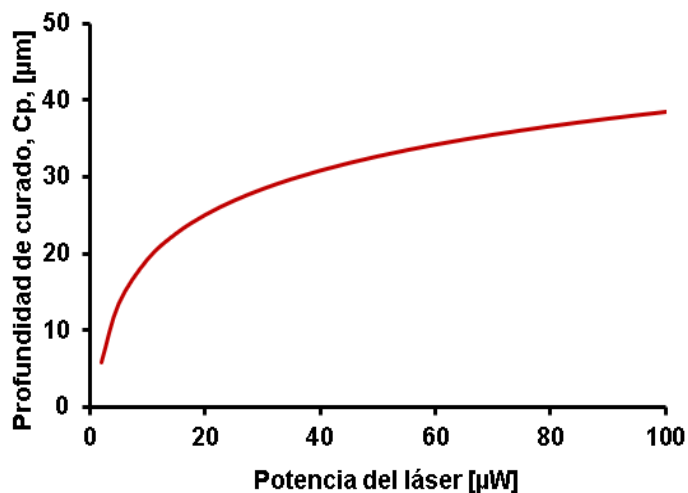
A diferencia de lo que se concluye en (Garcia et al., 2020) acerca de que el tiempo de poscurado es significativamente influyente en el esfuerzo de tracción último, para el experimento realizado en este trabajo no se observó esa condición. Considerando los valores de la media de esfuerzo a tracción último se evidenció que para el tiempo de poscurado de 90 minutos el esfuerzo a tracción último (82,21 [MPa]) aumenta 4% respecto a un tiempo de poscurado de 30 minutos (78,87 [MPa]) y 9% respecto al tiempo de poscurado de 60 minutos (75,65 [MPa]). Además, para el tiempo de poscurado de 60 minutos se obtiene un esfuerzo menor que para el tiempo de 30 minutos, esto puede ser influenciado por la temperatura a la que se llevó a cabo el poscurado de las probetas, ya que se mantuvo una temperatura de 80 [°C] para todos los casos, sin embargo, en las hojas técnicas de los materiales se sugiere temperaturas diferentes de poscurado. Este comportamiento también puede ser producido por las características de la cámara de poscurado, ya que no se cuenta con un control que asegure la calidad de esta, pudiendo influir en el proceso de poscurado la posición de las probetas dentro de la cámara y parámetros externos como la temperatura del ambiente, entre otros.

Espesor de capa

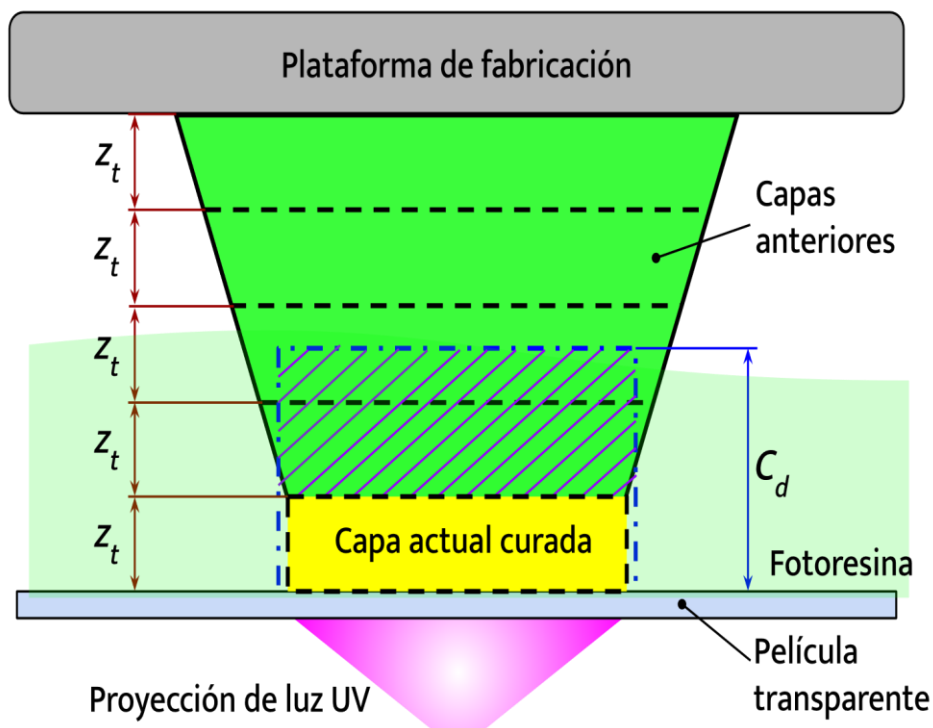
Al disminuir el espesor de capa el esfuerzo de tracción último aumenta. Esto es explicado por la Ley de Beer-Lambert (Jacobs, 1992), donde la disminución del espesor de capa provoca que la potencia del láser de curado aumente y que este penetre más a través de las capas anteriores, aumentando la profundidad de curado como se observa en la Figura 53. El aumento de la profundidad de curado, C_p , provoca un curado adicional en las capas anteriores y permite obtener un aumento en las propiedades de resistencia mecánica. En la Figura 54 este fenómeno es observado, donde C_p permite que no solo la capa actual sea curada sino también las capas de espesor z_t previas a esta.

Figura 53

Relación entre la profundidad de curado y la potencia del láser

**Figura 54**

Curado adicional en capas anteriores por disminución del espesor de capa



Al obtenerse valores del esfuerzo a tracción último superiores a los que el fabricante indica en la hoja técnica de cada material (High Temp: 58,3 [MPa], Clear y Grey: 65 [MPa]) se

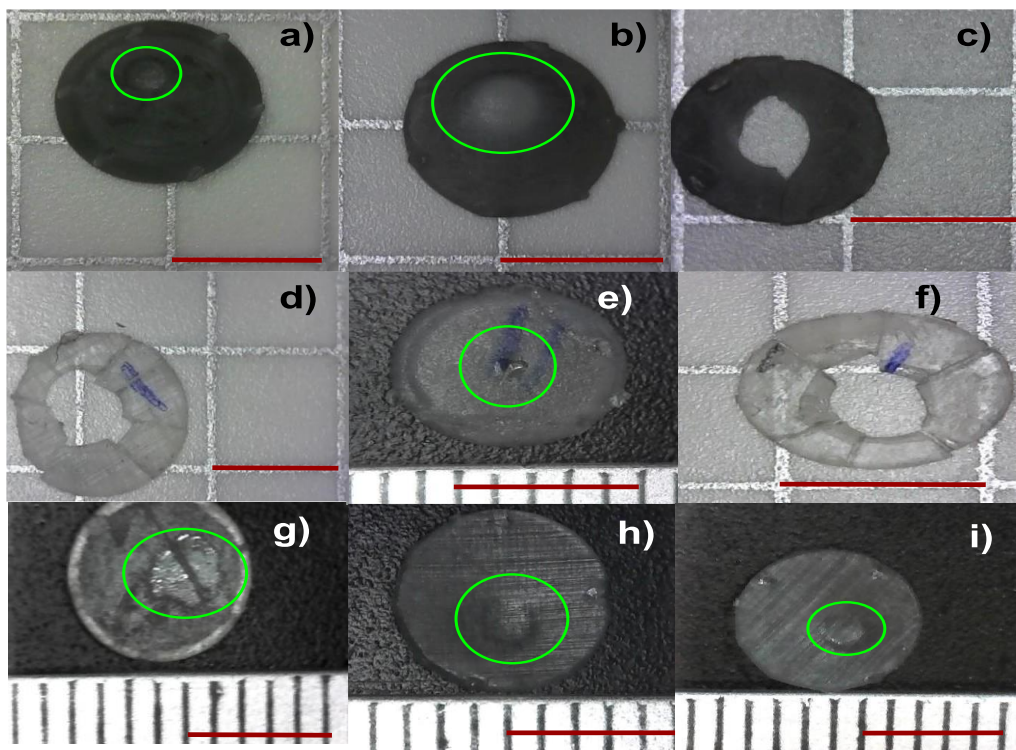
da lugar a ciertos cuestionamientos respecto a la calidad de los equipos con los que cuentan los laboratorios de la universidad. Se requiere establecer un procedimiento de calibración de los equipos donde se desarrollan los ensayos por parte de los organismos competentes para poder realizar un análisis de reproducibilidad y repetibilidad con el fin de asegurar la calidad de las máquinas y de los datos obtenidos en los ensayos. Debido a que las certificaciones pueden ser muy costosas, al menos se recomienda realizar pruebas de comparación con máquinas en laboratorios certificados de otras instituciones.

Resultados del ensayo de microperforado

En la Figura 55 se muestran las probetas ensayadas para cada configuración del diseño experimental. Se observa que no todas las probetas alcanzaron la ruptura, sin embargo, sí sufrieron una deformación evidenciándose la marca del punzón como en la Figura 55 a). Siguiendo las recomendaciones de ASTM F2977 para el ensayo de microperforado con las probetas MP, se reportan los resultados de fuerza y desplazamiento máximos para cada ensayo, debido a que no fue posible determinar la fuerza última (a la cual la probeta se rompe) para todas las probetas.

Figura 55

Probetas MP resultantes del ensayo de microperforado. Números de experimento: a) 1. b) 2. c) 3. d) 4. e) 5. f) 6. g) 7. h) 8. i) 9. Escala 5 [mm].

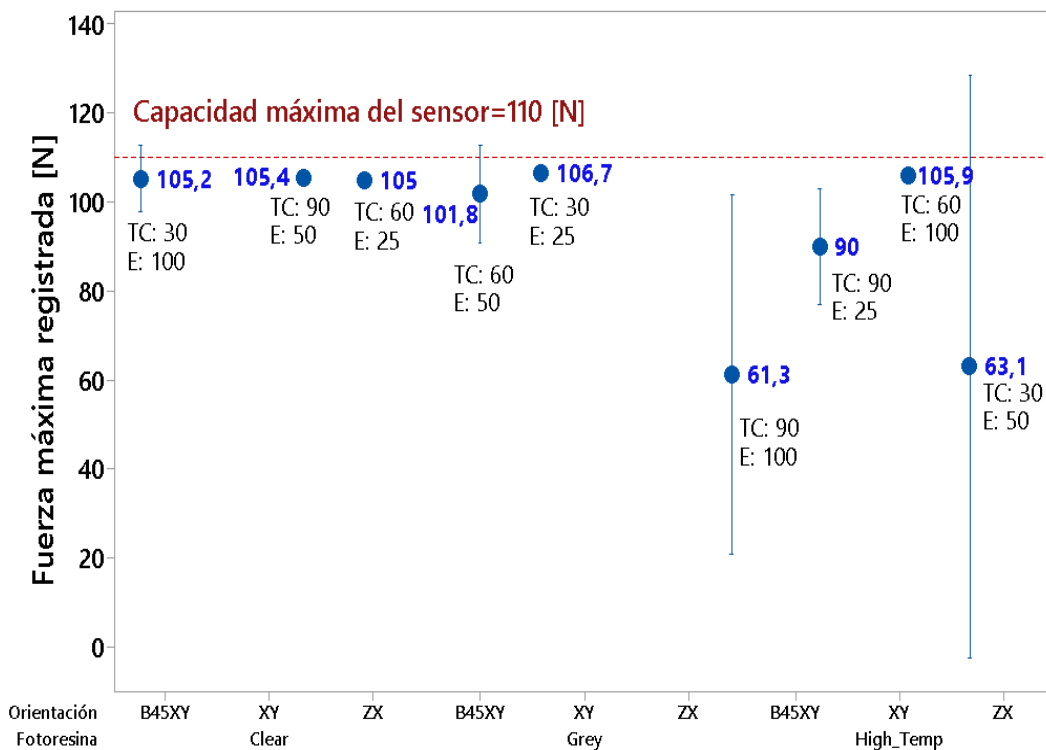


En la Figura 55 b) se observa una deformación considerable en la probeta lo que conduce a pensar que estaba a punto de romperse, teniendo en cuenta que las dos probetas adicionales de esta configuración sí lograron ser perforadas. En las Figuras 55 c), e) y f) se observa que las probetas fueron perforadas por el punzón, obteniendo como resultado un agujero en su centro. En las Figuras 55 d), g), h) e i) se observa que las probetas no fueron perforadas, sino que presentan una deformación donde el punzón las marcó aunque esta deformación no se encuentra en su centro. Esto puede ser debido a que en estos casos la fuerza de sujeción entre la probeta y el soporte no es suficiente, lo cual provoca que la probeta resbale. Esto se evidencia sobre todo en la Figura 55 g). Arunkumar (2020) señala que esta fuerza es otro de los parámetros importantes que afecta la curva fuerza-

desplazamiento y que debe ser lo suficientemente fuerte para evitar que la probeta resbale, pero a su vez lo suficientemente pequeña para no causar una deformación irreversible en la probeta. Se sugiere que para una mejor comprensión de este comportamiento, se realice un mayor número de experimentos.

Figura 56

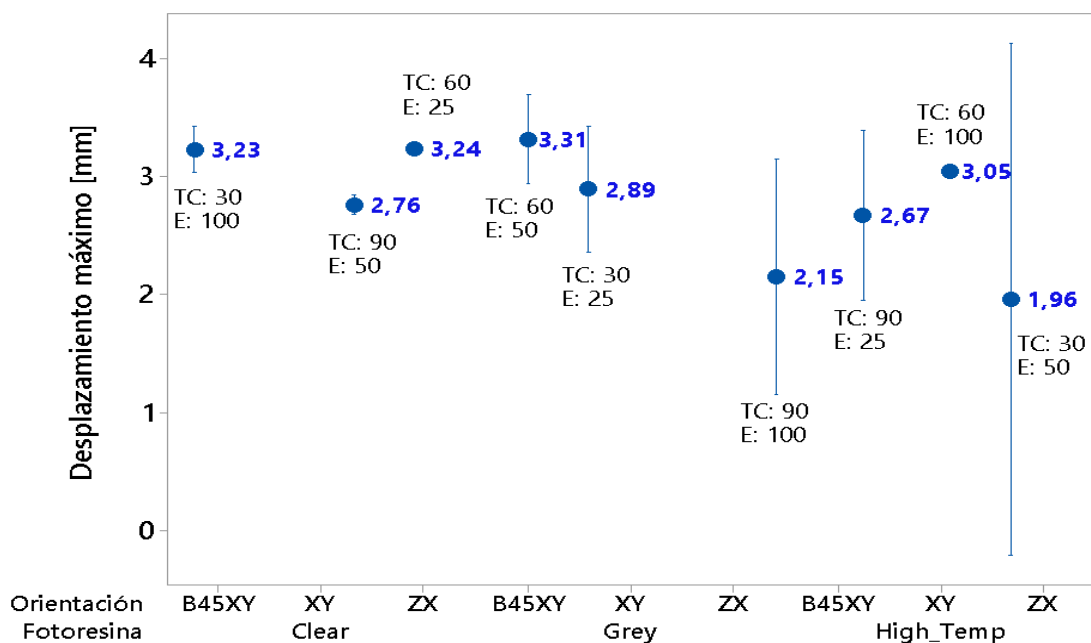
Gráfica de intervalos de la fuerza máxima registrada



Nota: E=espesor de capa. TC=Tiempo de Poscurado.

Figura 57

Gráfica de intervalos del desplazamiento máximo registrado



Nota: E=espesor de capa. TC=Tiempo de Poscurado.

Las Figuras 56 y 57 muestran las gráficas de intervalos para la fuerza y desplazamiento máximos registrados, respectivamente. Las barras representan el rango entre el primer y el tercer cuartil y corresponden a los tres resultados correspondientes a tres repeticiones del mismo experimento. Cada experimento corresponde a cada una de las configuraciones del diseño experimental planteado. En ambas gráficas se evidencia una elevada desviación estándar para las probetas que lograron ser perforadas.

En la Figura 57 se evidencia que la mayoría de los grupos soportan más de 100 [N] de fuerza, lo que determina que las probetas que no se rompieron requerían más fuerza para ser perforadas. Desafortunadamente, y a pesar de que el motor y la transmisión proporcionan la suficiente fuerza de empuje, el sensor tiene una capacidad limitada para esta aplicación, lo que no permite registrar datos superiores a 110 [N], por lo que se requiere reemplazarlo por

uno con un mayor rango de medición. En promedio, el mínimo valor registrado de fuerza capaz de perforar las probetas es de 61,27 [N].

En la Figura 62 se evidencia que el mínimo desplazamiento ocurrido fue de 1,96 [mm] y el máximo registrado es de 3,31 [mm]. Los datos registrados de desplazamiento deben ser evaluados una vez se implemente el sensor con mayor rango de medición, ya que al no contar con un sensor de alta sensibilidad que mida directamente el desplazamiento ocurrido al aplicar la fuerza, los datos probablemente conduzcan a interpretaciones erróneas. Como se indicaba en apartados anteriores, un sensor de alta sensibilidad como el sensor de tipo LVDT es necesario implementar en la plataforma de microperforado. En su artículo Torres y Gordon (2021), señalan que la ubicación de este sensor también es importante para asegurar mediciones más precisas de este desplazamiento, colocando el sensor LVDT frente al punzón, en lugar de utilizar extensómetros a fin de no requerir una corrección por deformación.

En las Figuras 58, 59 y 60 se observan las gráficas de Fuerza vs. Desplazamiento registrados durante el ensayo de microperforado. Se han agrupado por tipo de orientación y tipo de fotoresina. En las gráficas se observa que todas siguen la tendencia lineal hasta llegar a la rotura o en su defecto, capacidad máxima del sensor. En la Figura 58 se observa que ninguna probeta alcanza la rotura y esto puede relacionarse con la mayor cantidad de fuerza que se necesitó para romper las probetas impresas en esta orientación del ensayo de tracción. En las Figuras 59 y 60 se aprecia que solamente las probetas de fotoresina Clear no logran ser perforadas con una fuerza inferior a 110 [N], apreciándose que al igual que en el ensayo de tracción, esta resina presenta una mayor resistencia mecánica. Además, se nota que para las fotoresinas High Temp y Grey existe un comportamiento dependiente de las orientaciones, observándose que a las probetas impresas en la orientación XY no fue posible

perforarlas, mientras que para estas mismas fotoresinas, las probetas impresas en las otras dos direcciones sí fueron perforadas, indicando la anisotropía presente.

Figura 58

Gráfica de Fuerza vs. Desplazamiento para la orientación XY.

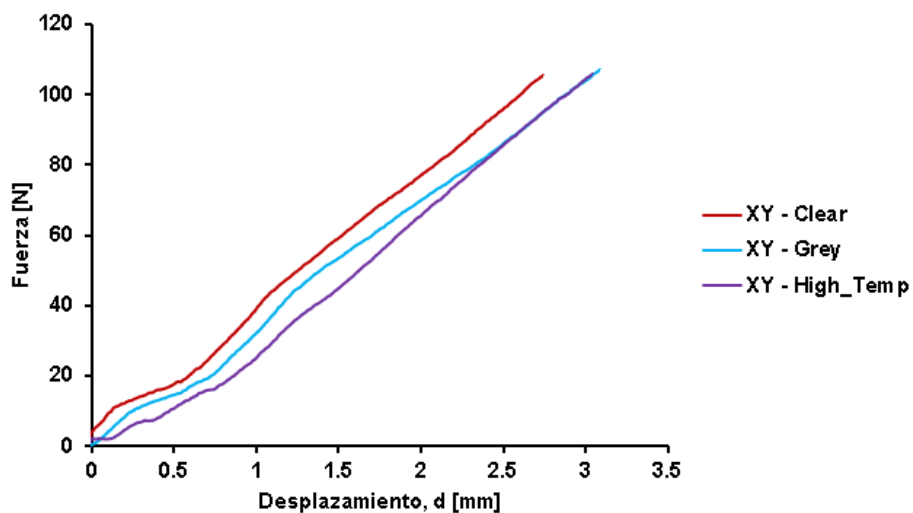


Figura 59

Gráfica de Fuerza vs. Desplazamiento para la orientación 45BXY.

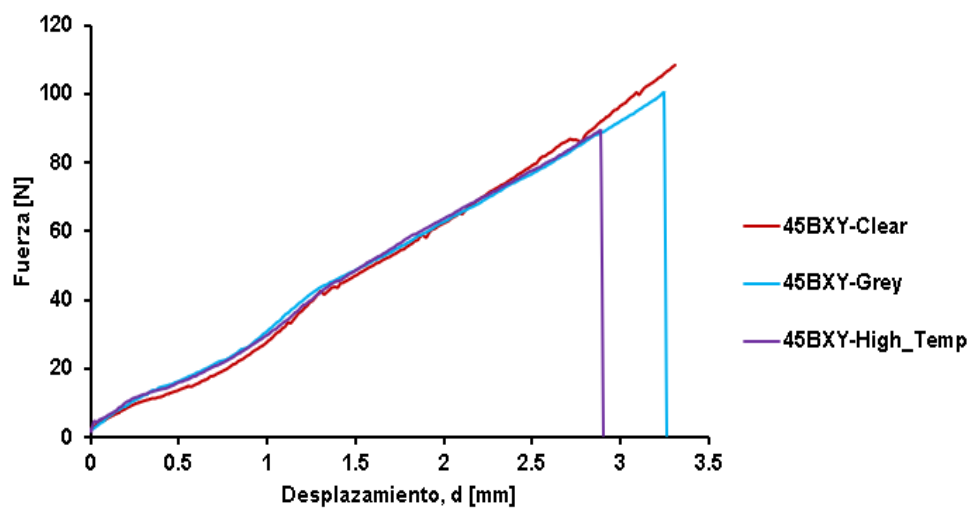
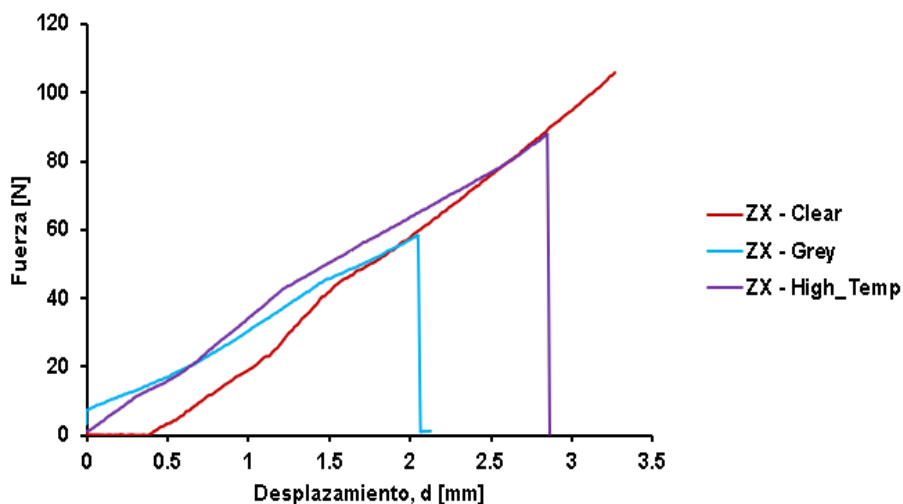


Figura 60

Gráfica de Fuerza vs. Desplazamiento para la orientación ZX.



Correlación entre ensayo de tracción y microperforado

Varios autores han puesto sus esfuerzos en correlacionar los ensayos de microperforado con otros ensayos como por ejemplo, el de tracción, generando distintas relaciones como resultado de una extensa experimentación. Arunkumar (2020) y Torres y Gordon (2021), hacen una recopilación de las técnicas que otros autores han utilizado para comparar los resultados de ambos ensayos con el fin de poder obtener las propiedades de tracción a partir del ensayo de microperforado. Las correlaciones desarrolladas en la literatura como en (Rodríguez et al., 2016) muestran dependencia en variables como el espesor de la probeta y utilizan puntos de la curva fuerza-desplazamiento como la fuerza de fluencia, P_y , y la fuerza máxima, $P_{máx}$. Sin embargo, la interpretación de estas técnicas es difícil, ya que las constantes para correlacionar estos ensayos y obtener las propiedades de los materiales que suelen establecerse mediante curvas de esfuerzo-deformación adquiridas en ensayos

convencionales muestran dependencia del material y los datos obtenidos muestran una alta sensibilidad a las condiciones del experimento y del material a ensayar.

Estas deficiencias hacen que, por ahora, sea difícil utilizar el ensayo de microperforado para caracterizar los materiales con una adecuada repetibilidad, sin embargo, la gran ventaja que presenta de reducir los recursos empleados en la realización de ensayos hace que se continúe estudiando y mejorando esta técnica.

Para la aplicación de este ensayo para caracterizar fotoreinas para la impresión por SLA, es necesario realizar una extensa experimentación para obtener las relaciones con el ensayo de tracción según la configuración de impresión y posprocesado seleccionada, ya que como sea ha discutido anteriormente, la orientación de impresión, los parámetros energéticos como el tiempo de poscurado, el espesor de capa y el tipo de fotoreina son factores que influyen en las propiedades de resistencia mecánica.

Validación del sistema de caracterización

Tabla 16 Comparación de dispositivos empleados para ensayos de microperforado

Referencia	Tamaño de probeta [mm]	Diámetro del punzón [mm]	Medición de desplazamiento	Medición de fuerza	Velocidad de ensayo [mm/min]
(Rodríguez et al., 2016)	10x10x0,5	2,40	Extensómetro tipo COD	Celda de carga de 5 [kN]	0,5
ASTM 2977	D: 6,35 E: 0,51	2,54	-	-	0,5
Este trabajo	D: 6,35 E: 0,51	2,56	Mediante desplazamiento del punzón	Sensor de fuerza FG-3006 con celda de carga de 100 [N]	0,5

Nota. D: Diámetro. E: Espesor.

En la Tabla 16 se muestra una comparación del dispositivo empleado para el ensayo de microperforado de materiales poliméricos desarrollado por (Rodríguez et al., 2016), las recomendaciones propuestas en ASTM F2977 y el dispositivo realizado en este trabajo. Se detallan características como el tamaño de la probeta, tamaño del punzón, medición de desplazamiento y medición de fuerza. Se evidencia que el dispositivo fabricado en este trabajo presenta características muy similares a las que se recomienda en la norma ASTM F2977 y a las que se emplea por Rodríguez et al. (2016) en cuanto tiene que ver con el tamaño de las probetas, tamaño del punzón y velocidad de ensayo.

Las diferencias encontradas radican en los dispositivos utilizados para la medición del desplazamiento y de la fuerza de punzonado. Como ya se ha comentado en secciones anteriores, la medición de desplazamiento del presente trabajo fue calculando el desplazamiento que realizaba el punzón a través del número de pasos del motor y el paso del husillo de bolas. Sin embargo, el desplazamiento registrado requiere de una corrección para obtener mediciones adecuadas. De forma similar ocurre cuando se utiliza un extensómetro para esta medición. Esta corrección se vería eliminada si se efectuara la medición directa del desplazamiento de la probeta colocando una varilla justo debajo de la muestra, que se conecta a un sensor LVDT. Como este tipo de sensores tienen un rozamiento muy pequeño y su sensibilidad es muy alta, la fuerza aplicada a la varilla es muy pequeña para ser considerada (Arunkumar, 2020).

Los ensayos realizados permitieron identificar que el rango del sensor de fuerza empleado no es suficiente para realizar estas pruebas en las fotoresinas destinadas para caracterización, creando la necesidad de utilizar un sensor con una celda de carga superior a por lo menos 200 [N]. Este valor es recomendado al observar los resultados de los ensayos de microperforado en materiales PET, PLA y EVOH realizados por Rodríguez et al. (2016), en los que se supera una fuerza de 150 [N] antes de romperse.

Las recomendaciones de estándares internacionales para la caracterización de fotoreinas impresas por estereolitografía y utilizadas en este estudio, fueron acertadamente aplicadas, lo que permitió validar cada una de las etapas del desarrollo del sistema. Sin embargo, de los resultados obtenidos de la experimentación, se evidencia que es necesario la ejecución de un mayor número de pruebas utilizando los instrumentos de medición recomendados para que las mediciones obtenidas por la plataforma de caracterización implementada tengan un alto índice de confiabilidad.

Capítulo V

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Conclusiones

La Mecatrónica, siendo una rama multidisciplinaria de la ingeniería, juega un papel primordial en el desarrollo de nueva tecnología permitiendo diseñar y mejorar sistemas sinérgicos que contribuyen al estudio, perfeccionamiento y optimización de los materiales y procesos de fabricación modernos cuyo fin es convertirse en productos útiles en diversas aplicaciones que suponen desafíos de sostenibilidad, biocompatibilidad, rendimiento, entre otros.

La caracterización las fotoresinas impresas en 3D mediante el proceso de estereolitografía bajo diferentes parámetros de impresión y posprocesado fue realizada con la obtención de los siguientes datos promedios: Para las probetas de microtensión el máximo esfuerzo de tracción último obtenido fue de 100,9 [MPa] con una elongación del 12,46 [%] y el mínimo de 58,64 [MPa] con una elongación de 7,3 [%]. Para las probetas de microperforado, se requirió una fuerza mínima de 61,27 [N] para perforar las probetas y se obtuvo un desplazamiento mínimo de 1,96 [mm]. La mayoría de las probetas destinadas para el ensayo de microperforado resistieron una fuerza de punzonado superior a 100 [N].

Los parámetros de impresión afectan significativamente a la respuesta mecánica de partes impresas mediante estereolitografía, medida en términos de esfuerzo de tracción último y porcentaje de elongación. El tipo de fotoresina es el factor más relevante que afectó al esfuerzo de tracción último con el 33% de representación en la variación de la respuesta, seguido por el tipo de orientación de impresión con el 27% y el espesor de capa con el 23%. El porcentaje de elongación se ve afectado por el tiempo de poscurado representando el 34%

en la variación de la respuesta, seguido por el espesor de capa con el 29% y el tipo de fotoresina con el 25%.

La orientación de impresión fue un factor que afectó significativamente el valor de la resistencia mecánica, permitiendo comprobar la anisotropía de las partes impresas por SLA. La orientación ZX alcanzó una media de 85,91 [MPa] de esfuerzo de tracción último, siendo la orientación que presentó el valor más alto de esta magnitud en comparación con las otras dos estudiadas. Además, se halló que la orientación de impresión también afectó la geometría de las partes impresas al incrementar sus dimensiones respecto a las del diseño CAD, observándose en la orientación XY el mayor incremento de las medidas de espesor para ambos tipos de probetas. Esto puede ser perjudicial para aplicaciones en las que se requiera una alta exactitud dimensional.

El factor que influyó en la respuesta mecánica de las fotoresinas al estar estrechamente relacionado con los fenómenos energéticos que ocurren durante la impresión como son la energía de exposición y por consiguiente la profundidad de penetración del láser, fue el espesor de capa; comprobándose que a menor espesor de capa, mayor es la profundidad de curado durante la impresión y mejor es la respuesta mecánica de la parte.

La plataforma de caracterización implementada para realizar el ensayo de microperforado permitió observar el comportamiento de las probetas bajo una fuerza de punzonado, consiguiendo en la mayoría de los casos deformar la probeta y en otros perforarla. Esta plataforma permitió registrar los valores de fuerza y desplazamiento que sustentarían la correlación con otros ensayos mecánicos, siendo ventajoso especialmente para caracterización de las fotoresinas impresas mediante SLA considerando la difícil adquisición de este material.

El estudio de las propiedades mecánicas y energéticas de las fotoresinas impresas mediante SLA bajo los estándares internacionales contribuyó a la obtención de resultados comparables con estudios similares elaborados.

Recomendaciones

Realizar un control de calidad y perfeccionamiento de la cámara de poscurado, así como de los diferentes elementos que constituyen el posprocesamiento de las piezas a fin de obtener probetas adecuadamente fabricadas.

Actualizar la plataforma de caracterización elaborada, especialmente reemplazando el sensor de fuerza actual por uno con un rango de medición superior. Además incorporar un sensor de desplazamiento con una alta sensibilidad y resolución como el sensor LVDT para obtener valores de desplazamiento más precisos.

Realizar mediciones de otras variables que pueden influir en la resistencia mecánica de las partes impresas como la longitud de onda y potencia lumínica de poscurado, y profundidad de curado. Esto porque, al ser fotosensibles los materiales utilizados para SLA y por lo evidenciado en la revisión de la literatura, es necesario explorar cómo afectan sobre las propiedades mecánicas y cómo pueden ser optimizados los parámetros presentes de la luz a la que son expuestas las fotoresinas en las diferentes etapas del proceso de fabricación (impresión y poscurado).

Calibrar periódicamente las máquinas y equipos utilizados para la ejecución de ensayos a fin de que las mediciones sean confiables y los estudios de experimentación sean válidos.

Ejecutar un mayor número de pruebas de la plataforma de caracterización para asegurar una alta repetibilidad en sus resultados y estos puedan ser validados por la normativa internacional vigente.

Trabajo futuro

El sistema de caracterización por microperforado serviría como un método rápido de evaluación de la fuerza de separación generada durante la impresión de fotoreinas. Mediante este ensayo se estudiaría las probetas de la prueba de “Test de curado” propuesto en (Mott et al., 2016) y con ello se pretendería correlacionar la fuerza de microperforado con la fuerza de separación. A través del empleo de microprobetas, se optimizaría la cantidad de estos costosos materiales destinada para ensayos. Sin embargo, este ensayo no solo podría correlacionarse con la fuerza de separación, sino que también podría encontrarse relaciones entre los valores obtenidos con este método y los resultados de otros ensayos mecánicos, como el de tracción, compresión, entre otros. Para ello, es necesario realizar una extensa experimentación para obtener las relaciones que se buscan entre estos ensayos aplicadas en las fotoreinas utilizadas para la impresión por SLA. Se debería considerar los factores aquí presentados como la anisotropía, parámetros energéticos, espesor de capa y tipo de fotoreina a caracterizar.

Bibliografía

- 3D Newworld. (2018). LA GUÍA DE IMPRESIÓN DE ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA) EN 3D. *3D Newworld*. <https://3dnewworld.com/la-guia-de-impresion-de-estereolitografia-sla-en-3d/>
- Aravind Shanmugasundaram, S., Razmi, J., Mian, M. J., & Ladani, L. (2020). Mechanical Anisotropy and Surface Roughness in Additively Manufactured Parts Fabricated by Stereolithography (SLA) Using Statistical Analysis. *Materials*, 13(11), 2496. <https://doi.org/10.3390/ma13112496>
- Arunkumar, S. (2020). Overview of Small Punch Test. *Metals and Materials International*, 26(6), 719–738. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00454-5>
- Attarzadeh, R., Rovira, M., & Duwig, C. (2021). Design analysis of the “Schwartz D” based heat exchanger: A numerical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 177, 121415. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121415>
- Colosimo, B. M., Huang, Q., Dasgupta, T., & Tsung, F. (2018). Opportunities and challenges of quality engineering for additive manufacturing. *Journal of Quality Technology*, 50(3), 233–252. <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1487726>
- Ebner, C., Mitterer, J., Gonzalez-Gutierrez, J., Rieß, G., & Kern, W. (2021). Resins for Frontal Photopolymerization: Combining Depth-Cure and Tunable Mechanical Properties. *Materials*, 14(4), 743. <https://doi.org/10.3390/ma14040743>
- Faist, N., & Troop, L. (2020). *Photopolymer suitability for a 3D printed model of the bile ducts*. <https://hdl.handle.net/10898/12295>
- Formlabs. (2022a). *Form Wash/Form Wash L time settings*. https://support.formlabs.com/s/article/Form-Wash-Time-Settings?language=en_US
- Formlabs. (2022b). *PreForm (3.24.2)*. <https://formlabs.com/latam/software/>
- Garcia, E. A., Ayranci, C., & Qureshi, A. J. (2020). Material Property-Manufacturing Process Optimization for Form 2 Vat-Photo Polymerization 3D Printers. *Journal of*

Manufacturing and Materials Processing, 4(1), 12.

<https://doi.org/10.3390/jmmp4010012>

Gawronska, E., & Dyja, R. (2021). A Numerical Study of Geometry's Impact on the Thermal and Mechanical Properties of Periodic Surface Structures. *Materials*, 14(2), 427.

<https://doi.org/10.3390/ma14020427>

Ghilan, A., Chiriac, A. P., Nita, L. E., Rusu, A. G., Neamtu, I., & Chiriac, V. M. (2020). Trends in 3D Printing Processes for Biomedical Field: Opportunities and Challenges. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(5), 1345–1367. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01722-x>

Gonçalves Pereira Passos, A. (2019). *Laminar flow and heat transfer in triply periodic minimal surfaces*. Técnico Lisboa.

HIWIN. (s/f). *Ballscrews*. <https://hiwin.us/wp-content/uploads/ballscrews.pdf>

Hurst, R. C., Lancaster, R. J., Jeffs, S. P., & Bache, M. R. (2016). The contribution of small punch testing towards the development of materials for aero-engine applications.

Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 86, 69–77.

<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.07.013>

Jacobs, P. F. (1992). *Rapid prototyping & manufacturing: Fundamentals of stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers.

José Ramón Vaello Sancho. (s/f). *El potenciómetro medición lineal*.

<https://automatismoindustrial.com/curso-servomotores-ejes-electricos/el-potenciometro-medicion-lineal/>

Ladani, L., Razmi, J., & Farhan Choudhury, S. (2014). Mechanical Anisotropy and Strain Rate Dependency Behavior of Ti6Al4V Produced Using E-Beam Additive Fabrication.

Journal of Engineering Materials and Technology, 136(3), 031006.

<https://doi.org/10.1115/1.4027729>

- Monzón, M., Ortega, Z., Hernández, A., Paz, R., & Ortega, F. (2017). Anisotropy of Photopolymer Parts Made by Digital Light Processing. *Materials*, *10*(1), 64. <https://doi.org/10.3390/ma10010064>
- Moreno, M. ., Gongora, P. ., Bertolino, G., & Yawny, A. (2012). *Small Punch Tests applied to the nuclear industry; Ensayos SPT (Small Punch Test) aplicados a la industria nuclear*.
- Mott, E. J., Busso, M., Luo, X., Dolder, C., Wang, M. O., Fisher, J. P., & Dean, D. (2016). Digital micromirror device (DMD)-based 3D printing of poly(propylene fumarate) scaffolds. *Materials Science and Engineering: C*, *61*, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.11.071>
- Pagac, M., Hajnys, J., Ma, Q.-P., Jancar, L., Jansa, J., Stefek, P., & Mesicek, J. (2021). A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing. *Polymers*, *13*(4), 598. <https://doi.org/10.3390/polym13040598>
- Pellegrino, J., Makila, T., McQueen, S., & Taylor, E. (2016). *Measurement science roadmap for polymer-based additive manufacturing* (NIST AMS 100-5; p. NIST AMS 100-5). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-5>
- Print 3D. (2021). *SLA 3D Printing. High resolution at it's best*. <https://print-3d.com.au/sla-3d-printing-high-resolution-at-its-best/>
- Rekab, K., & Shaikh, M. (2005). *Statistical Design of Experiments with Engineering Applications* (0 ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16326>
- RJ LEE GROUP. (s/f). *MATERIAL CHARACTERIZATION*. Recuperado el 25 de julio de 2022, de <https://www.rjlg.com/materials-characterization/>
- Rodríguez, C., Cuesta, I. I., MasPOCH, M. LI., & Belzunce, F. J. (2016). Application of the miniature small punch test for the mechanical characterization of polymer materials.

Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 86, 78–83.

<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.10.001>

Rodríguez Pérez, M. E. (2015). *Caracterización dinámica de un material poroso*. Universidad de los Andes.

Serpa Andrade, K. E. (2020). *Monitoreo del proceso y propiedades mecánicas de andamios porosos durante la impresión 3D por DLM*. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

Snelling, D., Li, Q., Meisel, N., Williams, C. B., Batra, R. C., & Druschitz, A. P. (2015). Lightweight Metal Cellular Structures Fabricated via 3D Printing of Sand Cast Molds: Lightweight Metal Cellular Structures Fabricated via 3D Printing. *Advanced Engineering Materials*, 17(7), 923–932. <https://doi.org/10.1002/adem.201400524>

Torres, J., & Gordon, A. P. (2021). Mechanics of the small punch test: A review and qualification of additive manufacturing materials. *Journal of Materials Science*, 56(18), 10707–10744. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05929-8>

Väyrynen, V. O. E., Tanner, J., & Vallittu, P. K. (2016). The anisotropy of the flexural properties of an occlusal device material processed by stereolithography. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 116(5), 811–817. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2016.03.018>

Walker, J. M., Bodamer, E., Kleinfehn, A., Luo, Y., Becker, M., & Dean, D. (2017). Design and mechanical characterization of solid and highly porous 3D printed poly(propylene fumarate) scaffolds. *Progress in Additive Manufacturing*, 2(1–2), 99–108. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0021-3>

Zachary Zguris. (s/f). *How Mechanical Properties of Stereolithography 3D Prints are Affected by UV Curing*.