



Prueba de concepto para sistemas de electrónica flexible usando impresión 3D

Balseca Cifuentes, Angie Luciana

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

25 de agosto de 2023



Plagiarism report

Balseca_Angie_Antiplagio.docx

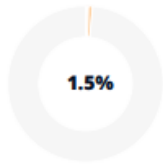
Scan details

Scan time:
August 25th, 2023 at 16:55 UTC

Total Pages:
54

Total Words:
13284

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
● Identical	0.4%	51
● Minor Changes	0.2%	25
● Paraphrased	1%	128
● Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage
● AI text
● Human text

.....
Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio

Director



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Prueba de concepto para sistemas de electrónica flexible usando impresión 3D”** fue realizado por la señorita **Balseca Cifuentes, Angie Luciana**, 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, 25 de agosto del 2023

.....
Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio

C.C.: 0603247362

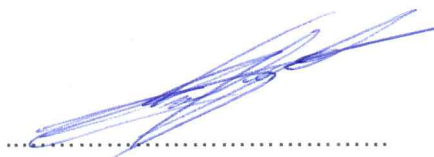


Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Balseca Cifuentes, Angie Luciana**, con cédula de ciudadanía n° 0604522961 declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Prueba de concepto para sistemas de electrónica flexible usando impresión 3D”** 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, 25 de agosto del 2023



Balseca Cifuentes, Angie Luciana

C.C.: 0604522961



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo, **Balseca Cifuentes, Angie Luciana**, con cédula de ciudadanía n° 0604522961 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **“Prueba de concepto para sistemas de electrónica flexible usando impresión 3D”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 25 de agosto del 2023

Balseca Cifuentes, Angie Luciana

C.C.: 0604522961

Dedicatoria

A mis padres, hermanos y sobrino.

Agradecimiento

A Martha y Juan, por ser mi apoyo incondicional, por todos los sacrificios que han hecho para darme siempre lo mejor, por poner mi bienestar muchas veces encima del suyo con tal de permitirme cumplir mis objetivos, por su paciencia, comprensión y cariño.

A Yidemny por estar conmigo en los momentos más difíciles y ayudarme con consejos, experiencia y conocimiento, por ser una persona que inspira a nivel personal y profesional.

Al ingeniero Hernán Lara, por permitirme conocer el mundo de la investigación y por las experiencias a lo largo de este trabajo que contribuyeron a mi crecimiento profesional.

Al ingeniero Jorge Aymara, por su apoyo intelectual y emocional.

A aquellos docentes que han marcado y contribuido en mi formación como profesional, a quienes realmente inspiran y son sinónimo de una educación de calidad.

A Pablito y la ingeniera Maritza Albán, por su paciencia, experiencia y conocimiento.

A todos los amigos que estuvieron para apoyarme con sus palabras de ánimo y con parte de sus vivencias y conocimiento.

A todas las personas que me apoyaron y sin los cuales no hubiera sido posible el desarrollo de este trabajo.

Índice de Contenidos

Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de Contenidos	8
Índice de Tablas.....	14
Índice de Figuras	17
Resumen.....	25
Abstract	26
Capítulo I.....	27
Introducción.....	27
Antecedentes	27
Tetraedro de la ciencia de materiales para aplicaciones de manufactura aditiva ...	27
Electrónica Flexible usando impresión 3D.....	28
Justificación.....	30
Importancia.....	31
Alcance del proyecto.....	31
Objetivos.....	34

Objetivo General.....	34
Objetivos Específicos	34
Capítulo II.....	35
Revisión de la literatura	35
Prueba de concepto	35
Manufactura Aditiva	36
Estereolitografía	37
Relaciones de procesamiento-estructura-propiedades en manufactura aditiva de polímeros.....	37
Sistema de coordenadas para manufactura aditiva	39
Anisotropía	40
Electrónica flexible	41
Caracterización mecánica.....	42
Ensayo de tracción	42
Ensayo de torsión.....	43
Conductores eléctricos.....	44
Caracterización eléctrica y electrónica	45

	10
Conductividad eléctrica	45
Incremento de temperatura	45
Tensión máxima de operación	46
Atenuación.....	46
Plantillas Inteligentes	46
Capítulo III.....	47
Metodología	47
Metodología enfocada al desarrollo de una prueba de concepto para sistemas de electrónica flexible usando impresión 3D	47
Desarrollo de plataforma de diseño para estructura flexibles	48
Sistema electrónico flexible y caracterización de sus partes.....	59
Diseño del sistema electrónico flexible	59
Sustrato.....	61
Cinta de aluminio/Cobre	71
Cinta de poliimida	77
Evaluación de propiedades mecánicas asociada al doblado y estiramiento.....	81
Diseño experimental.....	81

Diseño y Fabricación de probetas.....	82
Monitoreo de conductividad eléctrica y atenuación durante los ensayos	84
Ensayos mecánicos.....	85
Ley de mezclas.....	89
Evaluación de las propiedades eléctricas y electrónicas del sistema	90
Diseño y Fabricación de probetas.....	90
Incremento de temperatura	92
Voltaje máximo de operación	93
Implementación de un sistema electrónico flexible en una aplicación industrial.....	95
Sistema mecánico	96
Sistema eléctrico	98
Ensamble del prototipo.....	100
Capítulo IV	101
Análisis y discusión de resultados.....	101
Resultado de desarrollo de una plataforma de diseño para estructura flexibles.....	101
Resultados de caracterización del sistema	101
Sustrato.....	101

Cinta de aluminio comercial	107
Cinta de cobre comercial.....	110
Cinta de Poliimida.....	113
Resultados de la evaluación de las propiedades mecánicas asociadas al doblado y estiramiento.....	114
Ensayo de tracción	114
Ensayo de torsión.....	121
Caracterización del sistema electrónico flexible	128
Atenuación.....	129
Resultados de las propiedades eléctricas y electrónicas del sistema	129
Incremento de temperatura	129
Voltaje máximo de operación	130
Resultado de la implementación de un sistema electrónico flexible en una aplicación industrial	131
Discusión.....	133
Plataforma de diseño de estructuras flexibles	133
Sustrato.....	133
Cinta de Cobre/Aluminio/Poliimida.....	135

Propiedades mecánicas del sistema electrónico flexible	136
Propiedades eléctricas del sistema electrónico flexible	137
Implementación de un sistema electrónico flexible en una aplicación industrial ...	138
Capítulo V	139
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro	139
Conclusiones.....	139
Recomendaciones	141
Trabajo Futuro.....	142
Bibliografía	143

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Matriz de selección. Conductor</i>	51
Tabla 2 <i>Matriz de selección. Cobertura</i>	53
Tabla 3 <i>Parámetros de entrada de la plataforma de diseño</i>	54
Tabla 4 <i>Ecuaciones de parámetros de salida</i>	57
Tabla 5 <i>Parámetro de traza conductoras de cobre y aluminio</i>	60
Tabla 6 <i>ANOVA para maximización de propiedades mecánicas del sustrato</i>	61
Tabla 7 <i>Materiales y equipos para impresión 3D por estereolitografía</i>	63
Tabla 8 <i>Parámetros de ensayo de tracción – Orientación de sustratos</i>	69
Tabla 9 <i>Parámetros de ensayo de torsión – Orientación de sustratos</i>	70
Tabla 10 <i>Parámetros de funcionamiento del SEM para análisis EDS</i>	72
Tabla 11 <i>Reactivos para ataque químico</i>	73
Tabla 12 <i>Materiales y equipos para corte plotter de cinta de aluminio/cobre</i>	74
Tabla 13 <i>Parámetros corte plotter aluminio/cobre</i>	75
Tabla 14 <i>Parámetros de ensayo de tracción – Cinta de aluminio/cobre</i>	76
Tabla 15 <i>Parámetros de ensayo de torsión – Aluminio/Cobre</i>	76
Tabla 16 <i>Materiales y equipos para corte láser de poliimida</i>	78

Tabla 17 <i>Parámetros corte láser poliimida</i>	79
Tabla 18 <i>Parámetros de ensayo de tracción – Cinta de poliimida</i>	79
Tabla 19 <i>Parámetros de ensayo de torsión – Poliimida</i>	80
Tabla 20 <i>Factores y niveles de diseño experimental</i>	81
Tabla 21 <i>Materiales y equipos para ensayos mecánicos de sistema electrónico flexible</i>	86
Tabla 22 <i>Parámetros de ensayo de tracción – Sistema electrónico flexible</i>	87
Tabla 23 <i>Parámetros de ensayo de torsión – Sistema electrónico flexible</i>	89
Tabla 24 <i>Materiales y equipos para evaluación de propiedades eléctricas y electrónicas</i>	91
Tabla 25 <i>Materiales y equipos para la implementación de taconera inteligente</i>	100
Tabla 26 <i>Plataforma de diseño</i>	101
Tabla 27 <i>Análisis de varianza para resistencia última a la tracción según diferentes orientaciones de impresión</i>	102
Tabla 28 <i>Análisis de varianza para porcentaje de alargamiento a la rotura según diferentes orientaciones de impresión</i>	104
Tabla 29 <i>Análisis de varianza para resistencia al corte según diferentes niveles de orientación</i>	105
Tabla 30 <i>Análisis de varianza para deformación por cortante según diferentes niveles de orientación</i>	106
Tabla 31 <i>Caracterización resina elástica 50A</i>	107

Tabla 32 <i>Composición química – Cinta de aluminio</i>	108
Tabla 33 <i>Caracterización cinta de aluminio comercial</i>	109
Tabla 34 <i>Composición química – Cinta de cobre</i>	110
Tabla 35 <i>Caracterización cinta de cobre comercial</i>	112
Tabla 36 <i>Caracterización cinta de poliimida</i>	113
Tabla 37 <i>Análisis de varianza – Resistencia última a la tracción</i>	116
Tabla 38 <i>Análisis de varianza – Porcentaje de alargamiento a la rotura</i>	119
Tabla 39 <i>Análisis de varianza – Resistencia al corte</i>	124
Tabla 40 <i>Análisis de varianza – Deformación por cortante</i>	126
Tabla 41 <i>Caracterización del sistema electrónico flexible</i>	129
Tabla 42 <i>Incremento de temperatura</i>	130
Tabla 43 <i>Incremento de temperatura para voltaje máximo de operación</i>	130

Índice de Figuras

Figura 1 Tetraedro de la ciencia de materiales para aplicaciones de manufactura aditiva	28
Figura 2 Esquema de la electrónica flexible y sus aplicaciones	29
Figura 3 Alcance del proyecto	33
Figura 4 Desarrollo de tablero con pantalla flexible de automóvil	35
Figura 5 Pasos para generar un modelo de impresión 3D	36
Figura 6 Funcionamiento de impresión 3D por SLA	37
Figura 7 Desafíos de la manufactura aditiva basa en polímeros.....	38
Figura 8 Hoja de ruta de manufactura aditiva con fotopolímeros	39
Figura 9 Orientaciones y configuración de especímenes impresos en 3D	40
Figura 10 Anisotropía en piezas impresas obtenidas por fotopolimerización	41
Figura 11 Estructura de un sistema electrónico flexible	41
Figura 12 Ensayo de tracción	43
Figura 13 Ensayo de torsión.....	44
Figura 14 Diagrama de flujo - prueba de concepto para sistema electrónico flexible usando impresión 3D.....	47
Figura 15 Estructura del sistema electrónico flexible.....	48
Figura 16 Interacción material – función – proceso y forma. Sustrato	49

Figura 17 Interacción material – función – proceso y forma. Conductor	51
Figura 18 Interacción material – función – proceso y forma. Cobertura.....	52
Figura 19 Estructura del sistema electrónico flexible diseñado.....	53
Figura 20 Parámetros de entrada y salida de plataforma de diseño para estructura flexibles ..	54
Figura 21 Forma del sustrato. a) Rectangular. b) Ovalada. c) Pentagonal Irregular. d) Hexagonal irregular.....	55
Figura 22 Patrones geométricos de traza. a) Lineal. b) Curvo	56
Figura 23 <i>Orientaciones de impresión</i>	61
Figura 24 <i>Hipótesis para análisis ANOVA</i>	62
Figura 25 <i>Dimensiones de espécimen de resina elástica 50A para ensayos de tracción y torsión</i>	62
Figura 26 <i>Preprocesado. a) Modelo CAD. b) Modelo en formato STL. c) Mejorado del mallado. d) Ubicación de soportes</i>	64
Figura 27 <i>Impresión 3D de probetas para análisis de orientaciones</i>	65
Figura 28 <i>Diagrama de flujo para posprocesado de probetas impresas en 3D por estereolitografía</i>	66
Figura 29 <i>Poscurado de probetas impresas en 3D por estereolitografía</i>	67
Figura 30 <i>Evaluación visual de las probetas para detección de anomalías. a) Orientación ZX. b) Orientación B45XY. c) Orientación B45XZ</i>	67

Figura 31 <i>Ensayos de tracción sustrato. a) Mordaza superior. b) Probeta ZX. c) Mordaza inferior.</i>	68
Figura 32 <i>Probetas ensayadas sustrato tracción. a) Orientación ZX. b) Orientación B45XZ. c) Orientación B45XY</i>	68
Figura 33 <i>Ensayos de torsión sustrato. a) Extremo giratorio. b) Mordaza superior. c) Probeta B45XZ. d) Mordaza inferior.....</i>	69
Figura 34 <i>Probetas ensayadas sustrato torsión. a) Orientación ZX. b) Orientación B45XZ. c) Orientación B45XY</i>	70
Figura 35 <i>Microscopio electrónico de barrido (Incluye detector EDS)</i>	71
Figura 36 <i>Microscopio metalúrgico.....</i>	72
Figura 37 <i>Dimensiones de espécimen de aluminio/cobre para ensayos de tracción y torsión .</i>	73
Figura 38 <i>Corte plotter. a) Actuador horizontal. b) Rodillos. c) Cuchilla. d) Cinta de materia prima</i>	74
Figura 39 <i>Ensayos de tracción cinta aluminio/cobre. a) Mordaza superior. b) Probeta de aluminio. c) Mordaza inferior.</i>	75
Figura 40 <i>Probetas ensayadas tracción. a) Aluminio. b) Cobre.</i>	76
Figura 41 <i>Ensayos de torsión aluminio/cobre. a) Extremo giratorio. b) Mordaza superior. c) Probeta aluminio. d) Mordaza inferior</i>	77
Figura 42 <i>Probetas ensayadas torsión. a) Aluminio. b) Cobre.</i>	77

Figura 43 <i>Probetas manufacturadas por corte láser</i>	78
Figura 44 <i>Ensayos de tracción poliimida. a) Mordaza superior. b) Probeta. c) Mordaza inferior.</i>	79
Figura 45 <i>Probetas ensayadas por tracción de poliimida</i>	80
Figura 46 <i>Probetas ensayadas por torsión de poliimida</i>	80
Figura 47 <i>Dimensiones del sustrato del sistema electrónico flexible</i>	82
Figura 48 <i>Dimensiones de las trazas del sistema electrónico flexible. a) Aluminio Curvo. b) Aluminio Lineal. c) Cobre Curvo. d) Cobre Lineal</i>	83
Figura 49 <i>Ensamble del sistema electrónico flexible</i>	83
Figura 50 <i>Ensamble del sistema electrónico flexible. a) Adhesión de la traza conductora en sustrato. b) Retiro de excedentes de traza conductora. c) Traza conductora colocada. d) Prensado de terminales. e) Sistema ensamblado</i>	84
Figura 51 <i>Sistema para evaluación de conductividad eléctrica y atenuación</i>	85
Figura 52 <i>Ensayos de tracción sistema electrónico flexible. a) Cables del sistema de evaluación de conductividad eléctrica y atenuación. b) Mordaza superior. c) Probeta curva de cobre. d) Mordaza inferior</i>	86
Figura 53 <i>Probetas ensayadas tracción del sistema electrónico flexible. a) Curvo Aluminio. b) Lineal Aluminio. c) Curvo cobre. d) Lineal Cobre</i>	87

Figura 54 <i>Ensayos de torsión sistema electrónico flexible. a) Extremo giratorio. b) Cables del sistema de evaluación de conductividad eléctrica y atenuación. c) Mordaza superior. d) Probeta curva aluminio. e) Mordaza inferior</i>	88
Figura 55 <i>Probetas ensayadas torsión del sistema electrónico flexible. a) Curvo Aluminio. b) Lineal Aluminio. c) Curvo cobre. d) Lineal Cobre</i>	88
Figura 56 <i>Dimensiones de la probeta del sistema electrónico flexible para evaluación de propiedades eléctricas y electrónicas</i>	90
Figura 57 <i>Dimensiones de las trazas conductoras del sistema. a) Traza para incremento de temperatura y voltaje máximo de operación de aluminio. b) Traza para incremento de temperatura y voltaje máximo de operación de cobre</i>	91
Figura 58 <i>Ensamble del sistema electrónico flexible. a) Sustrato. b) Adhesión de la traza conductora en sustrato. c) Retiro de excedentes de traza conductora. d) Traza conductora colocada y prensado de terminales. e) Sistema ensamblado</i>	92
Figura 59 <i>Sistema para evaluación del incremento de temperatura</i>	92
Figura 60 <i>Probetas ensayadas para evaluación del incremento de temperatura. a) Aluminio. b) Cobre</i>	93
Figura 61 <i>Sistema para evaluación del voltaje máximo de operación</i>	94
Figura 62 <i>Sistema para evaluación de voltaje máximo operación. a) Fuente de alimentación DC. b) Teostato de derivación. c) Multímetro. d) Computadora. e) Arduino Mega. f) Termistor NTC. g) Probeta de cobre</i>	95
Figura 63 <i>Implementación de sistema electrónico flexible en una taconera inteligente</i>	96

Figura 64 <i>Diseño y Fabricación de la taconera. a) Ubicación de soportes en Preform. b) Impresión 3D.</i>	97
Figura 65 <i>Caja de control. a) Modelo CAD. b) Ubicación de soportes en Preform.</i>	97
Figura 66 <i>Adhesión de la caja de control al zapato. a) Zapatilla con velcro. b) Caja de control montada en la zapatilla.</i>	98
Figura 67 <i>Esquema de conexión – Taconera inteligente.</i>	99
Figura 68 <i>Trazas conductora.</i>	99
Figura 69 <i>Prototipo ensamblado. a) Vista lateral. b) Vista superior.</i>	100
Figura 70 <i>Gráfica de intervalos de Resistencia última a la tracción vs Orientación</i>	103
Figura 71 <i>Gráfica de intervalos de Porcentaje de alargamiento a la rotura vs Orientación.</i>	104
Figura 72 <i>Gráfica de intervalos de Resistencia al corte vs Orientación</i>	105
Figura 73 <i>Gráfica de intervalos de Deformación por cortante vs Orientación.</i>	106
Figura 74 <i>Resina Elástica 50A Formlabs. a) Esfuerzo vs Deformación unitaria. b) Esfuerzo cortante vs Deformación por cortante.</i>	107
Figura 75 <i>Regiones de interés – Cinta de aluminio</i>	108
Figura 76 <i>Microestructura cinta de aluminio</i>	109
Figura 77 <i>Cinta de aluminio comercial. a) Esfuerzo vs Deformación unitaria. b) Esfuerzo cortante vs Deformación por cortante.</i>	110
Figura 78 <i>Regiones de interés – Cinta de cobre.</i>	111

Figura 79 <i>Microestructura cinta de cobre.</i>	111
Figura 80 <i>Cinta de cobre comercial. a) Esfuerzo vs Deformación unitaria. b) Esfuerzo cortante vs Deformación por cortante.</i>	112
Figura 81 <i>Cinta de poliimida. a) Esfuerzo vs Deformación unitaria. b) Esfuerzo cortante vs Deformación por cortante.</i>	113
Figura 82 <i>Esfuerzo vs Deformación unitaria. Primer fallo eléctrico del sistema. a) Cobre Curvo. b) Cobre Lineal. c) Aluminio Curvo. d) Aluminio Lineal</i>	114
Figura 83 <i>Esfuerzo vs Deformación unitaria. Primer fallo mecánico del sistema. a) Cobre Curvo. b) Cobre Lineal. c) Aluminio Curvo. d) Aluminio Lineal</i>	115
Figura 84 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Resistencia última a la tracción.</i> 117	
Figura 85 <i>Gráficas de residuos - Resistencia última a la tracción.</i>	117
Figura 86 <i>Resistencia última a la tracción. a) Grafica de efectos principales. b) Gráfica de interacción.</i>	118
Figura 87 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Porcentaje de alargamiento a la rotura</i>	119
Figura 88 <i>Gráficas de residuos - Porcentaje de alargamiento a la rotura</i>	120
Figura 89 <i>Porcentaje de alargamiento a la rotura. a) Grafica de efectos principales. b) Gráfica de interacción.</i>	121
Figura 90 <i>Esfuerzo cortante vs Deformación por cortante. Primer fallo eléctrico del sistema. a) Cobre Curvo. b) Cobre Lineal. c) Aluminio Curvo. d) Aluminio Lineal</i>	122

Figura 91 <i>Esfuerzo cortante vs Deformación por cortante. Primer fallo mecánico del sistema. a) Cobre Curvo. b) Cobre Lineal. c) Aluminio Curvo. d) Aluminio Lineal</i>	123
Figura 92 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Resistencia al corte</i>	124
Figura 93 <i>Gráficas de residuos - Resistencia al corte</i>	125
Figura 94 <i>Resistencia al corte. a) Gráfica de efectos principales. b) Gráfica de interacción...</i>	126
Figura 95 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Deformación por cortante</i>	127
Figura 96 <i>Grafica de residuos - Deformación por cortante.....</i>	127
Figura 97 <i>Deformación por cortante. a) Gráfica de efectos principales. b) Gráfica de interacción.....</i>	128
Figura 98 <i>Temperatura vs Tiempo. Incremento de temperatura en funcionamiento normal. a) Aluminio. b) Cobre</i>	130
Figura 99 <i>Temperatura vs Tiempo. Incremento de temperatura con voltaje máximo de operación. a) Aluminio. b) Cobre.....</i>	131
Figura 100 <i>Taconera inteligente. Fuerza vs Tiempo.....</i>	132
Figura 101 <i>Taconera inteligente después de la prueba.....</i>	132
Figura 102 <i>Taconera inteligente fallo</i>	133

Resumen

La electrónica flexible usando impresión 3D brinda la oportunidad de generar sistemas conductores con geometrías complejas de forma sencilla, rápida y accesible. Se adaptan a las necesidades específicas del usuario y tienen la capacidad de funcionar en ambientes de trabajo difíciles y no planares. El presente trabajo desarrolló una prueba de conceptos de un sistema electrónico flexible usando impresión 3D. El sistema se conformó por un sustrato impreso, una cinta conductora y un cobertor de cinta de poliimida.

La plataforma de diseño para estructuras flexible generó el prototipo a partir de los requerimientos dimensionales iniciales y reportó información referente al volumen ocupado por el sustrato y las medidas del material base del conductor.

La maximización de las propiedades mecánicas se logró planteando un diseño de experimentos factorial completo de dos factores y dos niveles, material (cinta de aluminio / cinta de cobre) y patrón geométrico (lineal / curvo). La combinación que maximizó las propiedades mecánicas de: resistencia última a la tracción, porcentaje de alargamiento a la rotura, resistencia de corte y deformación por cortante, fue el material cobre con el patrón geométrico curvo. La caracterización eléctrica y electrónica del sistema reportó que no existe atenuación, y las probetas de cobre presentaron un mayor aumento de temperatura frente a las de aluminio.

La validación del sistema consistió en implementar una taconera inteligente, recopiló datos durante 6,33 minutos y luego, falló en una zona crítica, la unión del conductor con el sensor a través de los terminales de presión.

Palabras clave: Prueba de concepto, estereolitografía, caracterización, anisotropía, electrónica flexible.

Abstract

Flexible electronics using 3D printing provide the opportunity to generate conductive systems with complex geometries in a simple, fast and affordable way. They are adaptable to specific user needs and have the ability to operate in difficult and non-planar working environments. The present work developed a proof of concept of a flexible electronic system using 3D printing. The system consisted of a printed substrate, a conductive tape and a polyimide tape cover.

The design platform for flexible structures generated the prototype from the initial dimensional requirements and reports information of the volume occupied by the substrate and the measurements of the base material of the conductor.

The maximization of the mechanical properties was achieved raising a full factorial design of experiments of two factors and two levels, material (aluminum tape / copper tape) and geometric pattern (linear / curved). The combination that maximized the mechanical properties of ultimate tensile strength, percentage elongation at break, shear strength and shear deformation was the copper material with the curved geometric pattern.

The electrical and electronic characterization of the system reported that there is no attenuation, and copper specimens presented a higher temperature rise compared to aluminum specimens.

The validation of the system consisted of implementing an intelligent heel cushion, it collected data for 6.33 minutes and then it failed in a critical zone, the junction of the conductor with the sensor through the pressure terminals.

Keywords: Proof of concept, stereolithography, characterization, anisotropy, flexible electronics

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

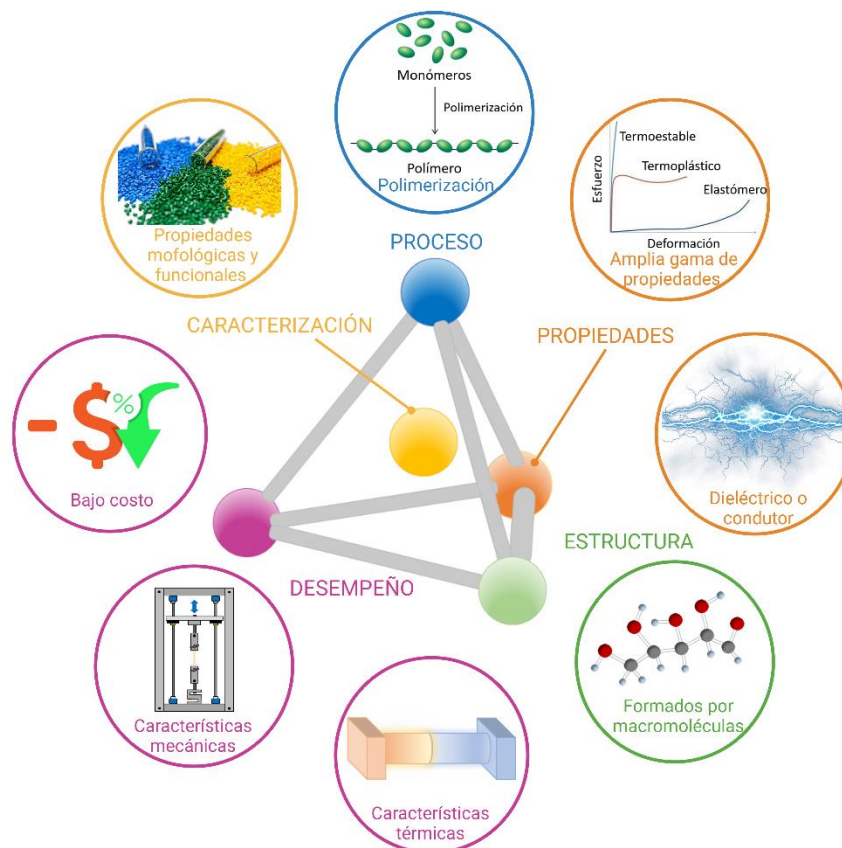
Tetraedro de la ciencia de materiales para aplicaciones de manufactura aditiva

La manufactura aditiva (conocida popularmente como impresión 3D) es un proceso de fabricación de piezas personalizadas y complejas a partir de modelos digitales. Las empresas utilizan impresión 3D para reducir costos de fabricación y mejorar la calidad del producto. Los polímeros son materiales atractivos debido a su bajo costo, su amplia gama de propiedades y su capacidad de ser usados en muchas tecnologías de fabricación de baja energía. Las aplicaciones de los polímeros en el sector industrial son: dispositivos aeroespaciales, de defensa, automotrices, deportivos, de telecomunicaciones y médicos. Además, los polímeros son la materia prima más común utilizada en impresoras 3D.

Si bien el uso de manufactura aditiva ha ido en aumento, numerosos desafíos impiden su adopción y comercialización más generalizada. El tetraedro de materiales para aplicaciones de manufactura aditiva está en desarrollo (Figura 1) y, por lo tanto, tiene desafíos que deben solventarse mediante la investigación, en muchos casos, se necesitan nuevos métodos de medición, estándares, modelos, datos, etc.

Figura 1

Tetraedro de la ciencia de materiales para aplicaciones de manufactura aditiva



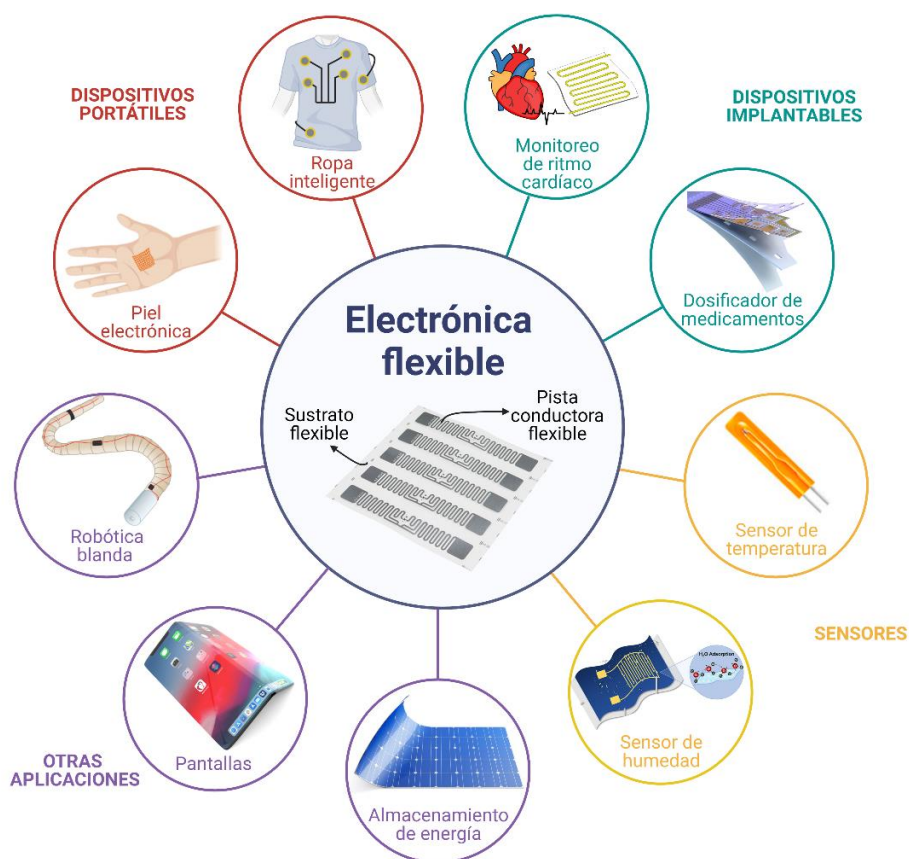
Electrónica Flexible usando impresión 3D

La combinación de la impresión 3D con la electrónica flexible tiene un impacto revolucionario en diversos campos, tales como la ciencia, tecnología, industria y sociedad. Esta técnica permite la creación de objetos complejos y personalizados mediante la impresión 3D, combinada con la habilidad de la electrónica flexible para adaptarse a superficies dinámicas y no planas. Esta sinergia cambiaría rápidamente la forma en que se llevan a cabo numerosos procesos (Ren & Dong, 2021; Shin et al., 2016).

La electrónica flexible tiene aplicaciones en diferentes áreas como: dispositivos portátiles, dispositivos implantables, robótica blanda, sensores, etc. En la Figura 2, se muestra un esquema referente a la electrónica flexible y sus aplicaciones.

Figura 2

Esquema de la electrónica flexible y sus aplicaciones



Existen barreras que impiden un progreso mayor en esta área y radica en la vulnerabilidad de los circuitos y en la escasez de conductores capaces de tener un desempeño eléctrico confiable bajo diversas condiciones de carga y deformación, motivo por el cual, la mayor parte de estudios referentes al tópico se centran en la investigación y desarrollo de nuevos materiales y sus tecnologías de manufactura (Shin et al., 2016).

La finalidad de este trabajo es desarrollar una prueba de concepto para un sistema de electrónica flexible usando impresión 3D aplicado a la industria; el sistema está conformado por 5 capas: sustrato dieléctrico, adhesivo, conductor eléctrico, adhesivo y cobertor. El sustrato dieléctrico se lo fabricará mediante estereolitografía (SLA) con la resina elástica 50A de Formlabs (Hoja técnica, Apéndice A), los conductores eléctricos se realizarán mediante cinta de papel aluminio y cinta de cobre, el cobertor estará conformado por cinta de poliimida y el adhesivo será propio de la cinta de los conductores y poliimida.

Justificación

La impresión 3D es una de las tecnologías protagonistas de la industria 4.0 y se espera que, en un futuro cercano, se consolide como líder en múltiples sectores. Inicialmente la impresión 3D solo podía fabricar piezas rígidas y quebradizas, razón por la cual, tenía limitaciones para adaptarse a entornos y necesidades donde se requiere versatilidad. Actualmente se han desarrollado resinas flexibles/elásticas para impresión 3D, que combinadas con la tecnología de electrónica flexible, podrían mejorar considerablemente el desarrollo de sistemas portátiles, robótica blanda, sensores flexibles y ropa inteligente (3DNatives, 2021; C. Liu et al., 2018; S. Liu et al., 2018).

La electrónica flexible usando impresión 3D tiene un futuro prometedor, debido a que, a través del uso de esta tecnología se tiene la capacidad de diseñar, fabricar y probar sistemas personalizados en un tiempo muy corto, adaptándose a los entornos que requiere el usuario y sin necesidad de equipos sofisticados. Partiendo de ello, surge un aumento en el número de técnicas y materiales, junto a una gran cantidad de investigaciones científicas y el interés de empresas privadas (3DNatives, 2021; L. Wang & Liu, 2014).

Importancia

En la actualidad, existen muy pocos estudios accesibles a la comunidad científica, referentes a la evaluación de propiedades mecánicas, eléctricas y electrónicas de sistemas flexibles usando impresión 3D. Por este motivo, este trabajo contribuye en la generación de información, el desarrollo de una plataforma de diseño para estructuras flexibles, el planteamiento de una metodología de investigación que puede ser utilizada como base para futuros estudios, la caracterización mecánica y eléctrica del sistema flexible en estudio y su implementación en una aplicación enfocada a la industria.

Las investigaciones referentes a sistemas electrónicos flexibles son de gran relevancia en el contexto de la mecatrónica, pues permiten ampliar su campo de aplicación ya que involucran el desarrollo en áreas referentes a dispositivos portátiles e implantables, sensores, robótica blanda, almacenamiento de energía, pantallas, etc.

Alcance del proyecto

La Figura 3, muestra un esquema del alcance del proyecto. Este trabajo se centra en desarrollar una prueba de concepto para un sistema de electrónica flexible usando impresión 3D. Para lo cual se realizan las siguientes actividades:

- a) Desarrollo de plataforma de diseño de estructuras flexibles mediante la herramienta “tablas de diseño” del software SolidWorks (SolidWorks, V2020), cuyos parámetros de entrada son: forma, largo, ancho y espesor del sustrato, y forma, ancho y radio interno de la traza conductora; los parámetros de salida son: área, largo y ancho del rectángulo circunscrito de la traza conductora, y volumen del sustrato (Figura 3a).

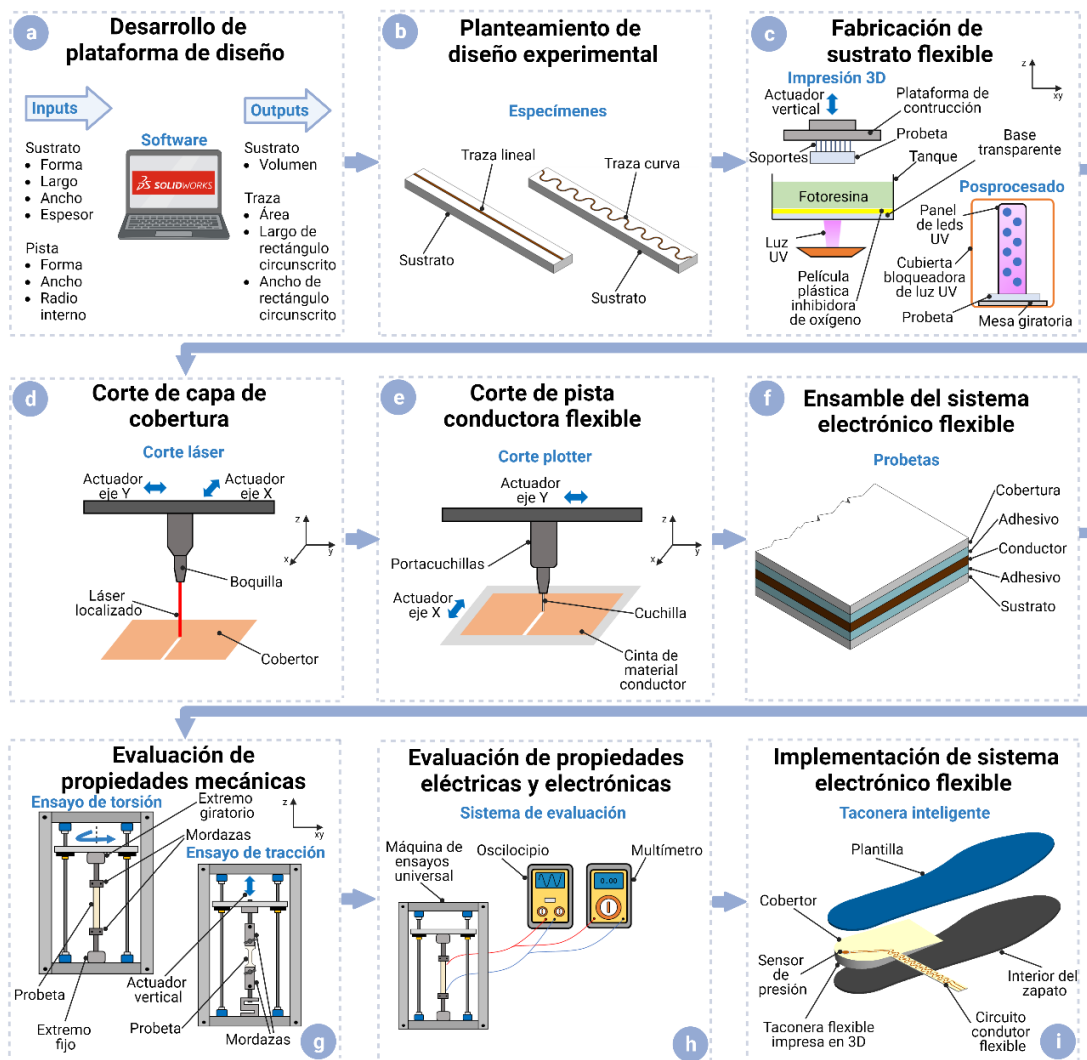
- b) Planteamiento de diseño experimental para maximizar las propiedades mecánicas y eléctricas del sistema electrónico flexible (Figura 3b).
- c) Fabricación del sustrato flexible a partir de impresión 3D por estereolitografía (Figura 3c).
- d) Corte del cobertor mediante corte láser (Figura 3d)
- e) Corte de traza conductora flexible a través de corte plotter (Figura 3e).
- f) Ensamble del sistema electrónico flexible por medio del adhesivo de la cinta del material conductor y del cobertor (Figura 3f).
- g) Evaluación de propiedades mecánicas a partir de ensayos de microtracción y torsión, los resultados obtenidos son: resistencia última a la tracción, porcentaje de alargamiento a la rotura, resistencia al corte y deformación por cortante (Figura 3g).
- h) En cuando a las propiedades eléctricas y electrónicas se usará el sistema propuesto en la Figura 7f, para evaluar: propiedades mecánicas hasta el punto de discontinuidad del conductor o al presentarse el primer fallo mecánico, además se evalúa la atenuación. También, se ensaya el incremento de temperatura del sistema en funcionamiento normal y el voltaje máximo de operación (Figura 3h).
- i) Implementación de una taconera inteligente (Figura 3i) capaz de recopilar datos mediante IoT de la fuerza que ejerce una zona del pie.

Con estas actividades se resuelven los siguientes aspectos acorde a los desafíos para la fabricación aditiva basada en polímeros:

- Caracterización de materiales: Se realizará la caracterización de la resina elástica 50A de Formlabs mediante un ensayo de microtracción y torsión.
- Desempeño: La manufactura aditiva da lugar a piezas anisotrópicas, es por ello que se determinará la mejor orientación de impresión a partir de ensayos de microtracción y torsión.

Figura 3

Alcance del proyecto



Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una prueba de concepto para sistemas de electrónica flexible usando impresión 3D.

Objetivos Específicos

- Desarrollar una plataforma de diseño para estructuras flexibles.
- Evaluar las propiedades mecánicas asociadas al estiramiento y doblado.
- Evaluar las propiedades eléctricas y electrónicas del sistema.
- Implementar el sistema electrónico flexible en una aplicación industrial.

Capítulo II

Revisión de la literatura

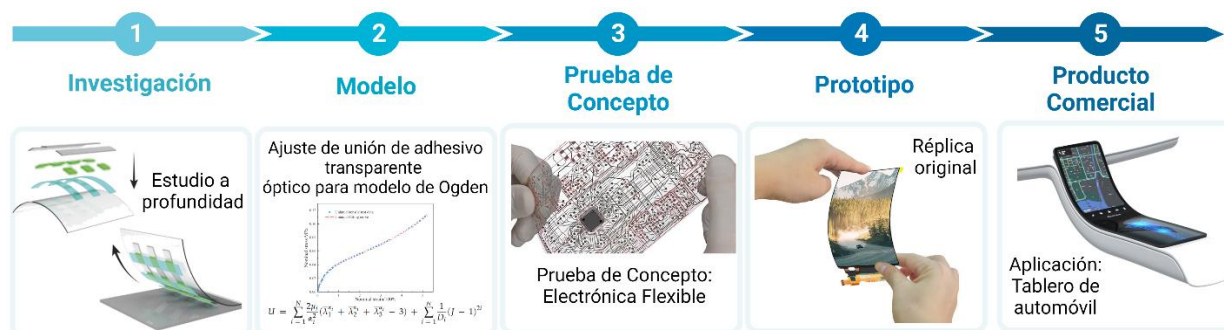
Prueba de concepto

Para comprender la definición de prueba de concepto, es fundamental establecer su diferencia respecto a prototipo y modelo. Un prototipo es una réplica original a gran escala y funcional de un nuevo tipo de construcción, se prueban en entornos operativos donde se espera que funcionen como los productos finales, por ejemplo, son aplicados por las compañías aeronáuticas (Dym, 2013).

Un modelo es una réplica en escala reducida y son usados para representar comportamientos o fenómenos cuando se trata de verificar la validez de una teoría. Son más pequeños y están hechos de materiales diferentes a los dispositivos originales, son probados en laboratorios y en ambientes controlados (Dym, 2013).

Figura 4

Desarrollo de tablero con pantalla flexible de automóvil



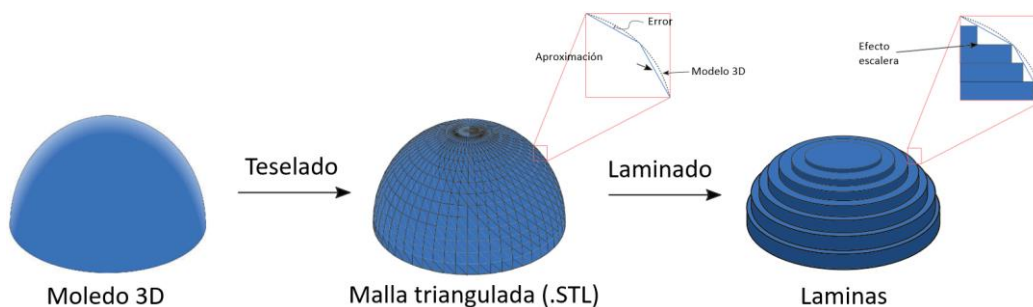
La prueba de concepto se refiere a un modelo de alguna parte de un diseño, y son usados para probar si un concepto en particular realmente funciona como se espera. Se hacen experimentos controlados para probar o refutar el concepto (Figura 4) (Dym, 2013).

Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva (MA) es una tecnología de fabricación por adición, con la capacidad de crear prototipos físicos geoméricamente complejos superponiendo múltiples capas de un material en la dirección X-Y y generando una dimensión en Z. Según la Figura 5, las piezas parten de un modelo CAD, luego se lo representa mediante mallas trianguladas exportándolo a formato STL. Se deben ubicar los soportes y se divide el modelo en capas para ser procesadas por la impresora 3D (Bose, 2015; Gibson et al., 2015). Posteriormente, se definen los parámetros operativos de la impresión (Ej. Grosor de capa) y se manufacturan las piezas, una vez finalizado el proceso de manufactura aditiva, se inclina el componente permitiendo su drenaje, después de retirar los soportes, la pieza es lavada con alcohol isopropílico y poscurada mediante luz ultravioleta. Finalmente, se retiran los soportes y se evalúa el acabado superficial. (Jacobs, 1992)

Figura 5

Pasos para generar un modelo de impresión 3D



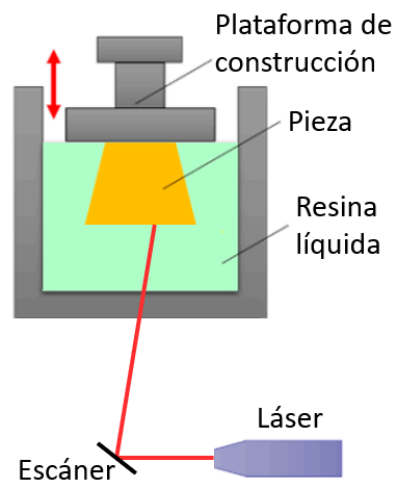
Nota. Adaptado de (Nisja et al., 2021)

Estereolitografía

La estereolitografía (SLA) pertenece a las tecnologías de fabricación aditiva de base líquida por fotopolimerización. Usa una fuente de luz ultravioleta (UV) para solidificar resina líquida capa por capa, y transformarla en un fotopolímero endurecido (Figura 6). SLA permite obtener piezas de mayor resolución y precisión, con detalles nítidos y acabado superficial liso (Newworld, 2018).

Figura 6

Funcionamiento de impresión 3D por SLA



Nota. Adaptado de (C. Liu et al., 2018)

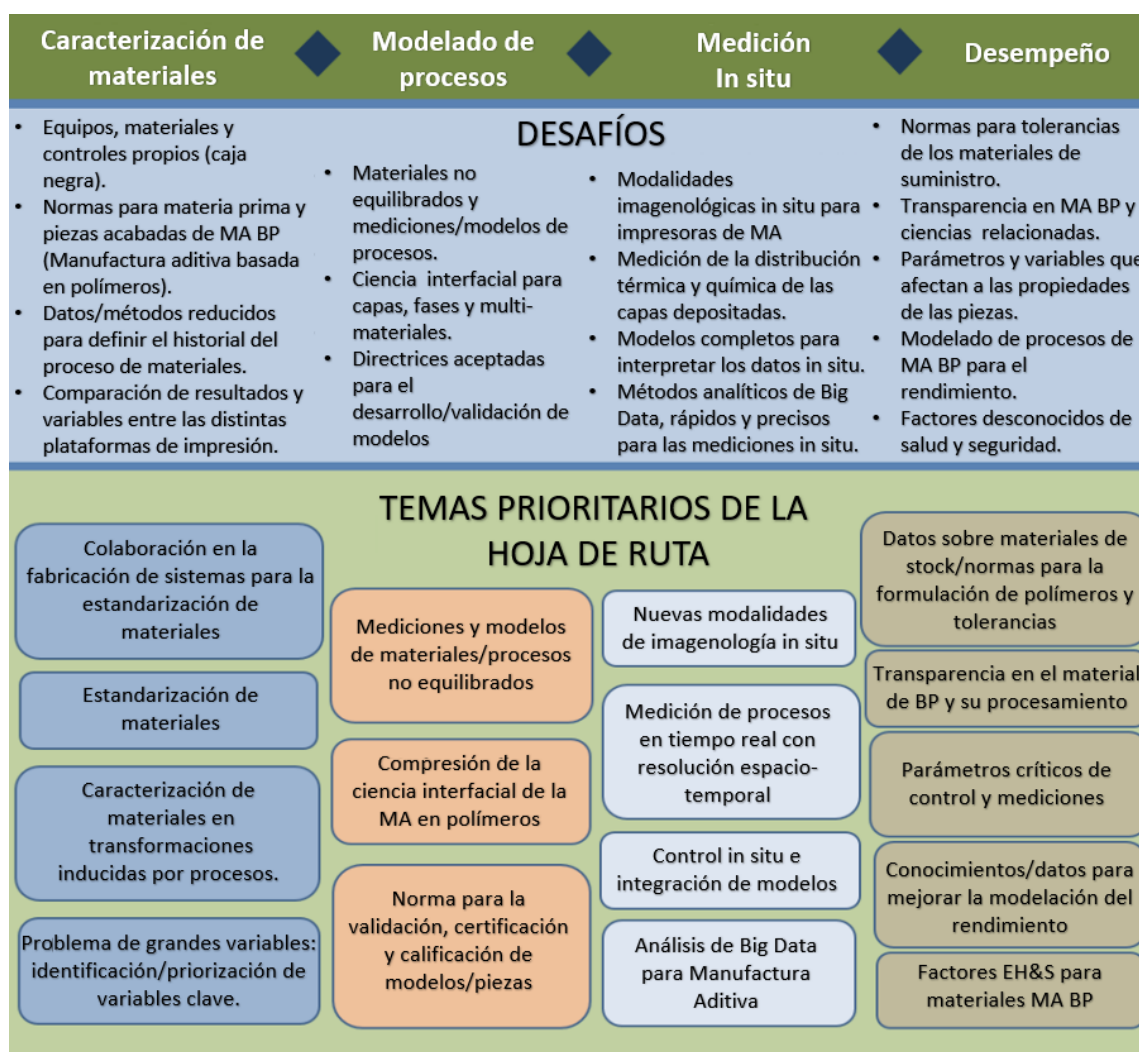
Relaciones de procesamiento-estructura-propiedades en manufactura aditiva de polímeros

En (Pellegrino et al., 2016) se indica que la manufactura aditiva tiene un potencial muy grande para producir piezas personalizadas y complejas. Los polímeros son la materia prima más utilizada en este tipo de manufactura, pese a ello, hasta la fecha, estos materiales no han sido estudiados lo suficiente y la información disponible al respecto es escasa, por lo tanto, la

existencia de incertidumbres en los materiales y equipos usados pueden tener un impacto directo en el rendimiento de las piezas finales. Los desafíos de la manufactura aditiva basada en polímeros pretenden mejorar su relación de procesamiento-estructura-propiedades (Figura 7).

Figura 7

Desafíos de la manufactura aditiva basada en polímeros

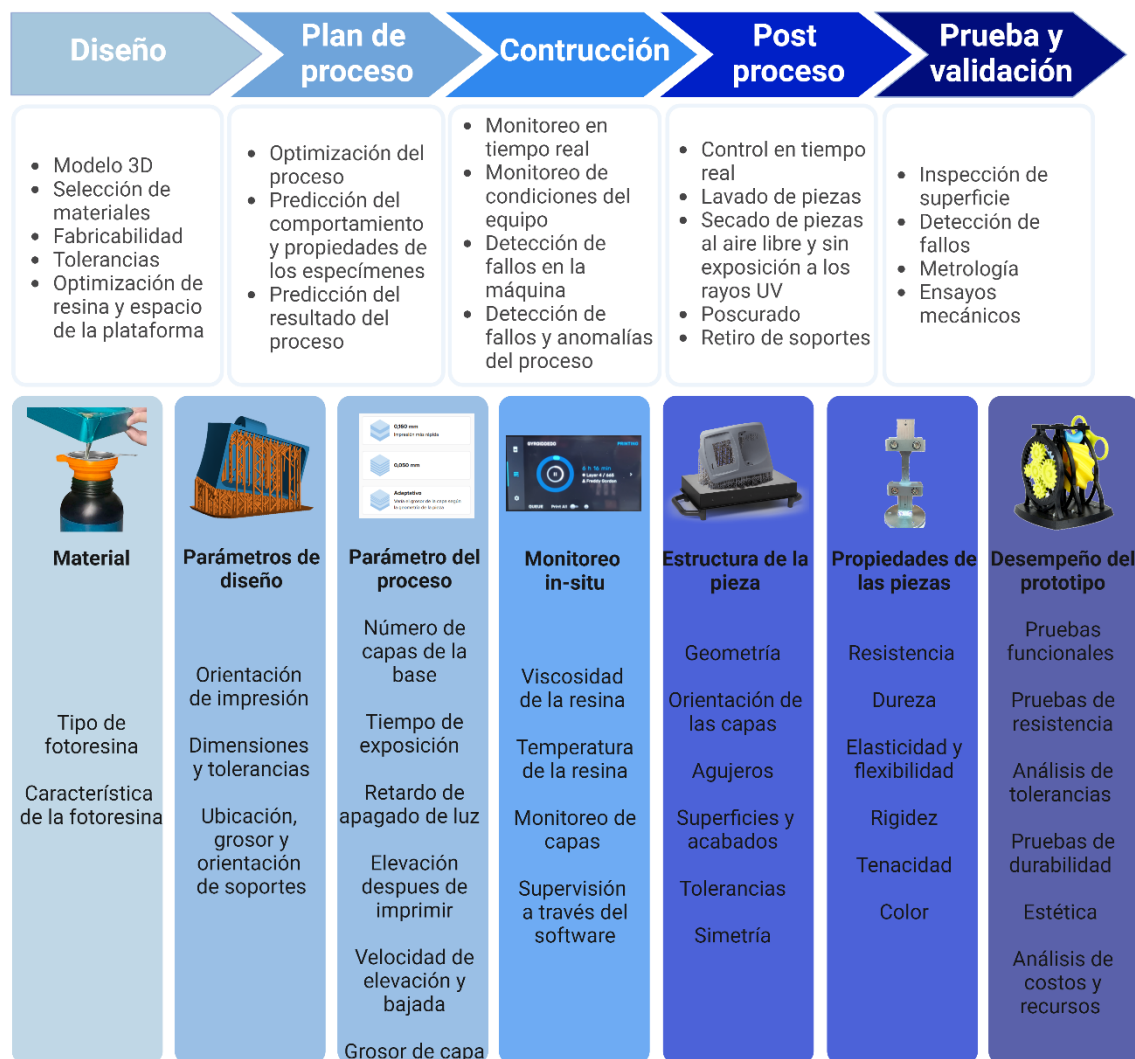


Nota. Adaptado de (Pellegrino et al., 2016)

En la Figura 8, se observa un diagrama de una hoja de ruta de manufactura aditiva con fotopolímeros.

Figura 8

Hoja de ruta de manufactura aditiva con fotopolímeros



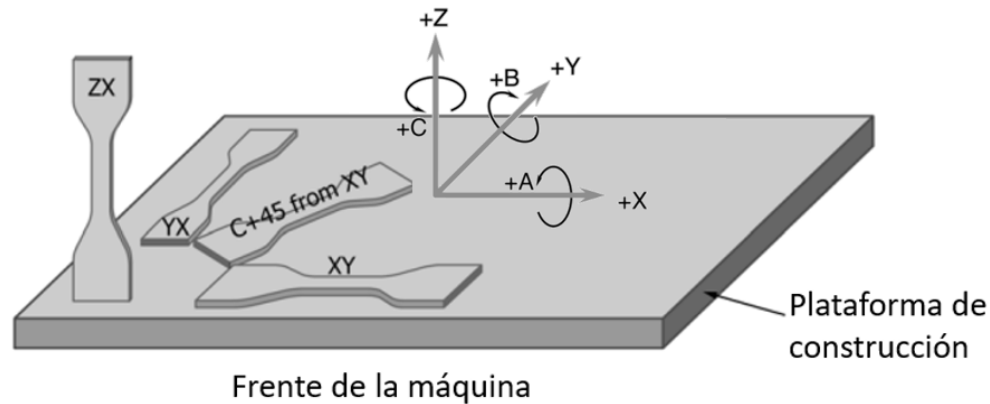
Sistema de coordenadas para manufactura aditiva

La norma ASTM F2971-13 (Notificación de datos sobre muestras de ensayo preparadas mediante manufactura aditiva) mediante la Figura 9, describe las orientaciones y

configuraciones de los especímenes impresos en 3D. Para definir la nomenclatura se consideran los ejes paralelos a la dimensión más larga, seguido de la segunda más larga.

Figura 9

Orientaciones y configuración de especímenes impresos en 3D



Nota. Adaptado de ASTM F2971-13

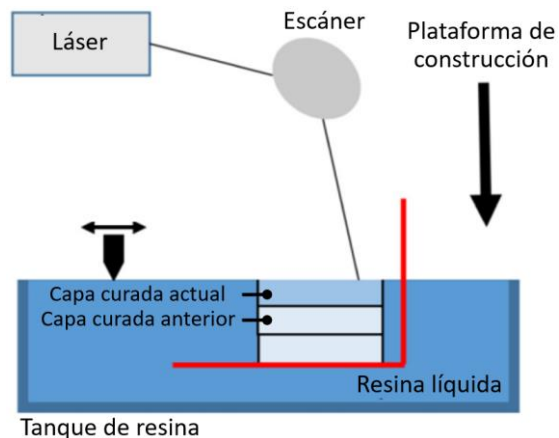
Anisotropía

La anisotropía es la característica de un material de presentar variaciones en sus propiedades en dependencia de dirección en que se evalúen. La manufactura aditiva genera productos anisotrópicos, pues se trata de un proceso que superpone material capa por capa (Figura 10). Para mejorar el rendimiento de las piezas impresas se debe prestar atención a la sección transversal crítica en su entorno de funcionamiento, y considerar la orientación de

impresión que maximice las propiedades mecánicas en esa sección (Chen et al., 2022; Somireddy & Czekanski, 2020) .

Figura 10

Anisotropía en piezas impresas obtenidas por fotopolimerización

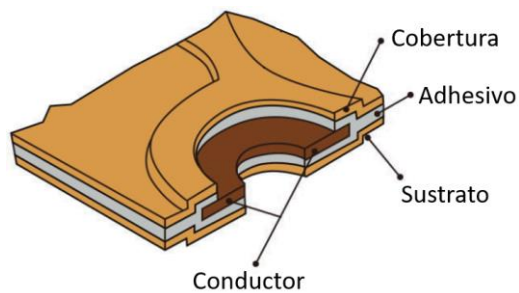


Nota. Tomado de (Medellin et al., 2019)

Electrónica flexible

Figura 11

Estructura de un sistema electrónico flexible



Nota. Adaptado de IPC 2223

Son dispositivos electrónicos que hasta cierto punto pueden estirarse, flexionarse, plegarse o enrollarse para adaptarse a las condiciones de trabajo de su aplicación, se caracterizan por tener sustratos hechos de materiales estirables y generalmente delgados. Cuentan con al menos cuatro partes: sustrato flexible, trazas conductoras, componentes

electrónicos y capas protectoras; las partes se unen mediante capas de adhesivos. En la Figura 11, se observa la estructura de un sistema electrónico flexible (Espera et al., 2022; Z. Wang et al., 2021).

Caracterización mecánica

La caracterización mecánica es un conjunto de pruebas que someten a los componentes o materiales a diferentes tipos de esfuerzos permitiendo determinar sus propiedades mecánicas. En (Pellegrino et al., 2016) se menciona que para producir piezas con propiedades consistentes, repetibles y predecibles se deben conocer las características de los materiales usados para la producción.

Ensayo de tracción

En el ensayo de tracción una probeta con sección transversal conocida se sujeta de sus extremos y se somete a una fuerza axial hasta el punto de rotura (Figura 12).

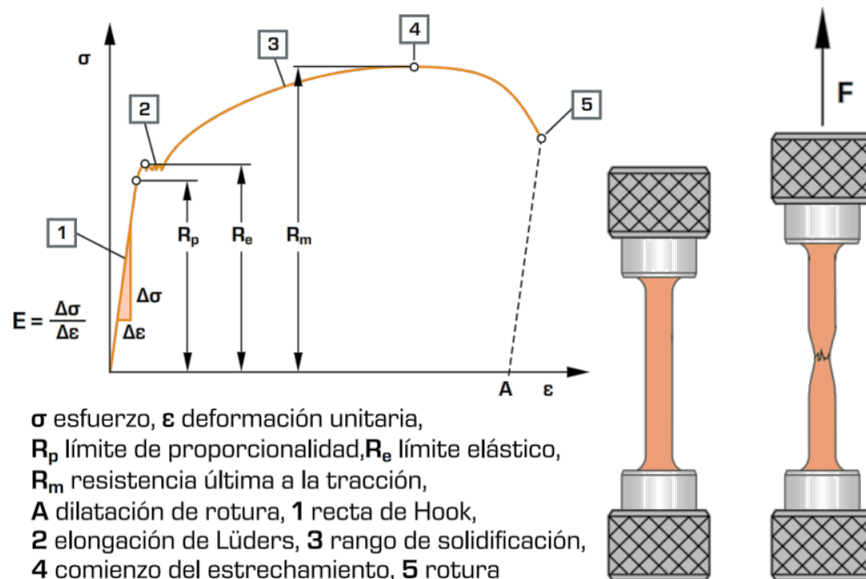
La norma ASTM D1708-18 (Propiedades de tracción de los plásticos mediante el uso de probetas de microtracción), se emplea para evaluar las propiedades de tracción de los plásticos mediante microprobetas, es especialmente útil cuando se dispone de una limitada cantidad del material.

La norma ASTM E8/E8M-13A (Ensayos de tracción de materiales metálicos), propone una metodología para la determinación de las propiedades de tracción de materiales metálicos de cualquier tipo de forma.

Los métodos que proponen ambas normas proporcionan la propiedad de resistencia a la tracción y alargamiento.

Figura 12

Ensayo de tracción



Nota. Adaptado de (Hamburg, s. f.)

Ensayo de torsión

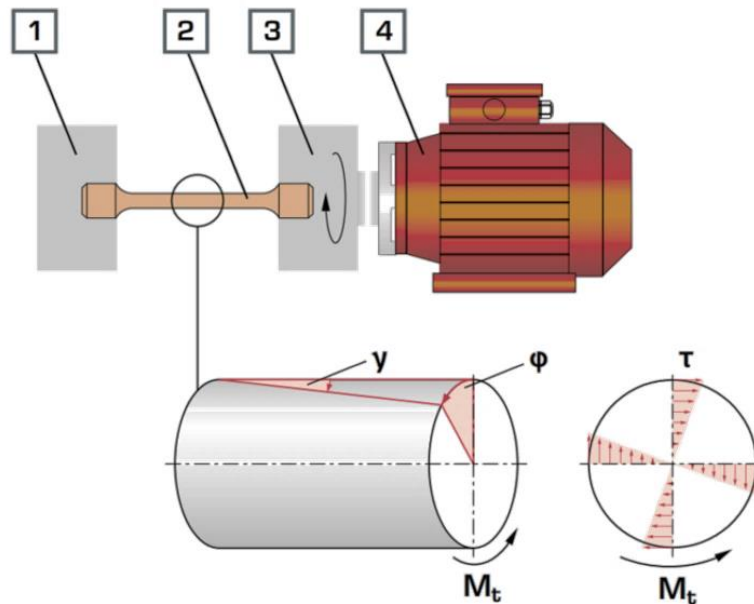
En este ensayo una probeta se sujeta por uno de sus extremos, mientras que, la otra gira al aplicarle un par torsor hasta su rotura Figura 13.

Debido a que los polímeros son materiales que aún se encuentran en estudio, para determinar el esfuerzo cortante por torsión y la deformación por cortante en condiciones de temperatura ambiente, no se cuenta con una norma específica. La norma ASTM D1043-02 (Propiedades de rigidez de los plásticos en función de la temperatura mediante ensayo de torsión), ASTM D5279-21 (Plásticos - propiedades mecánicas dinámicas: en torsión) e ISO 6721-2 (Plásticos - Determinación de las propiedades mecánicas dinámicas - Parte 2: Método del péndulo de torsión), evalúan el comportamiento mecánico de plásticos/polímeros bajo fuerzas de torsión en función de la temperatura. Por otra parte, en (Diani et al., 2011) se

propone un ensayo de torsión para estudiar la recuperación de deformación de polímeros con memoria de forma.

Figura 13

Ensayo de torsión



1 sujeción fija, 2 probeta, 3 sujeción giratoria, 4 accionamiento;
 M_t momento de torsión, γ ángulo de corte, ϕ ángulo de torsión,
 τ esfuerzo cortante por torsión

Nota. Adaptado de (Hamburg, s. f.)

Conductores eléctricos

Un conductor es un material que permite el flujo de electricidad a través de él, es decir, posibilita la transferencia de energía eléctrica. Tienen una amplia gama de aplicaciones como líneas de transmisión de energía, instalaciones eléctricas residenciales y aparatos eléctricos. Los materiales más comunes son el aluminio y el cobre, el cobre tiene una mayor conductividad eléctrica y es más dúctil; por lo tanto, su manipulación y desempeño en ambientes de flexión, tracción o torsión será mayor. Además, es menos propenso a la corrosión y oxidación, factores

que generan puntos calientes capaces de derretir el material aislante. Por otro lado, el aluminio es menos denso y costoso que el cobre (Tehrani, 2021).

Caracterización eléctrica y electrónica

Esta caracterización permite conocer cómo se comporta un material o sistema, eléctrica y electrónicamente bajo diferentes condiciones de funcionamiento, posibilitando evaluar su calidad y fiabilidad.

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica describe en qué medida un material permite el flujo de electricidad, se simboliza con σ y sus unidades están dadas en siemens por metro [$S \cdot m^{-1}$] (Heaney, 1999).

Incremento de temperatura

El incremento de temperatura en un conductor debido al paso de corriente eléctrica se conoce como ley de Joule, y se da debido al choque de los electrones contra el material, transformando energía cinética en térmica. La Ecuación 1, muestra su formulación (SEAS, 2022).

Ecuación 1

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t$$

Q : Calor desprendido [J]

R : Resistencia eléctrica del conductor [Ω]

I : Corriente eléctrica que fluye por el conductor [A]

t : Tiempo durante el cual ocurre el flujo [s]

Tensión máxima de operación

Es el voltaje máximo que puede soportar un sistema o dispositivo sin afectar a su funcionamiento o producir daños.

Atenuación

Se define como la disminución de la amplitud en una onda a medida que se propaga a través de un medio (Gray, 2019) .

Plantillas Inteligentes

La marcha de una persona es muy importante, pues refleja anomalías en los pies, desequilibrios posturales, problemas odontológicos y permite predecir posibles lesiones, por lo tanto, proporciona información referente al uso de plantillas ortopédicas, rehabilitación o entrenamiento requerido por un usuario. Tradicionalmente el análisis de la pisada lo hace un profesional en un laboratorio, implicando un costo elevado, poca accesibilidad a toda la población y disminución de la precisión al no tratarse de una marcha natural. Las plantillas inteligentes posibilitan hacer un estudio, cómodo, fácil, accesible y en tiempo real, tendrían un uso potencial en deportistas, pacientes vulnerables como adultos mayores, pacientes en proceso de recuperación y personas interesadas en mejorar su bienestar (podoactiva, 2019; Xu et al., 2012).

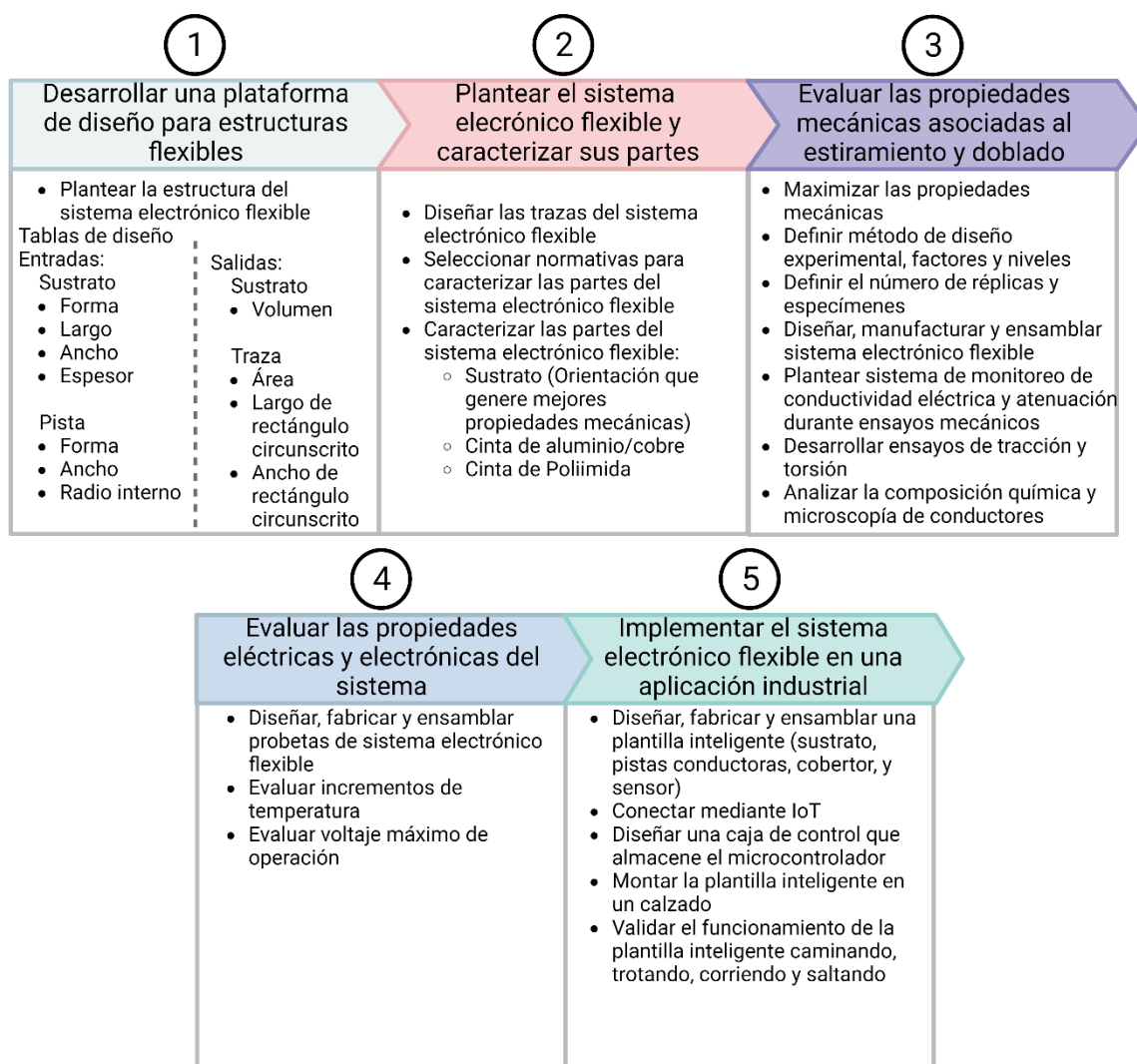
Capítulo III

Metodología

Metodología enfocada al desarrollo de una prueba de concepto para sistemas de electrónica flexible usando impresión 3D

Figura 14

Diagrama de flujo - prueba de concepto para sistema electrónico flexible usando impresión 3D.



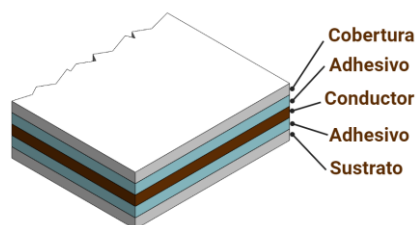
Desarrollo de plataforma de diseño para estructura flexibles

Dentro de la ingeniería los prototipos tienen gran relevancia, posibilitan validar conceptos, detectar errores, mejorar diseños y evaluar la funcionalidad de un producto, con el fin de obtener los resultados deseados. En el proceso de diseño de prototipos, una fase crucial es el diseño paramétrico, el cual se ve significativamente facilitado mediante el uso de plataformas de diseño, permitiendo generar de forma automática sistemas o estructuras a partir de parámetros y relaciones entre los parámetros. (Liou, 2007)

Previo al desarrollo de la plataforma de diseño para estructuras flexibles se abordó el diseño conceptual de dichas estructuras, se contó con 5 capas conformadas por: sustrato, adhesivo, conductor, adhesivo y cobertura (Figura 15), además, los materiales usados se seleccionaron considerando la interacción material, función, forma y proceso (Ashby, 2005).

Figura 15

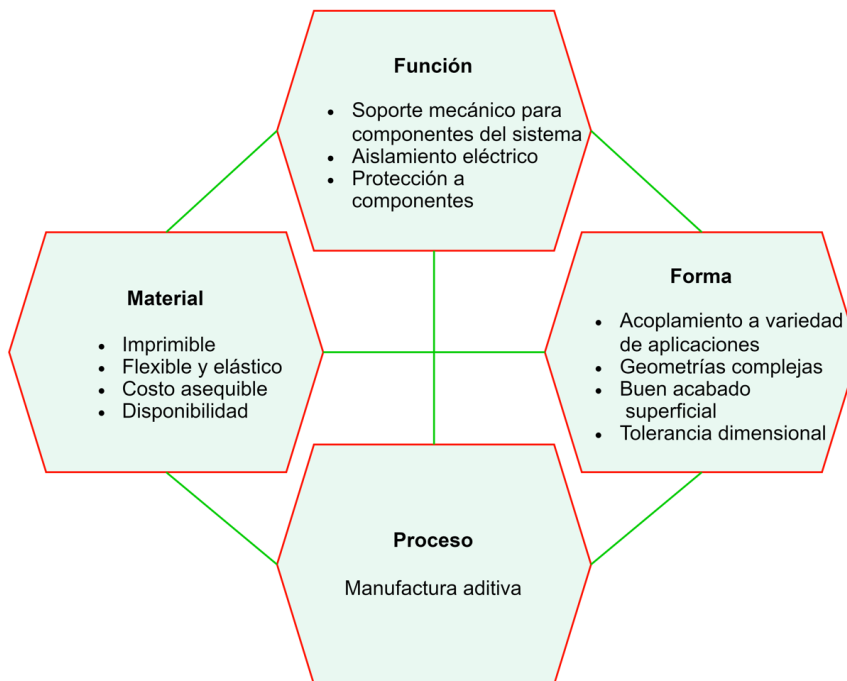
Estructura del sistema electrónico flexible



Se buscó que el sustrato del sistema flexible sea funcional al adoptar geometrías complejas y personalizadas para satisfacer los requerimientos específicos de aplicaciones, por lo tanto, el sustrato se manufacturó mediante impresión 3D debido a la versatilidad que ofrece el proceso. En la Figura 16, se describen detalladamente los requerimientos del sustrato. El acabado superficial es un factor a considerarse ya que se busca facilitar una buena adhesión entre las capas del sistema.

Figura 16

Interacción material – función – proceso y forma. Sustrato



La estereolitografía fue la tecnología de manufactura aditiva usada debido al impacto que la investigación busca, a diferencia de las tecnologías más comunes y de fácil acceso como FDM, la información e investigaciones de SLA es escasa. Asimismo, la tolerancia dimensional es una característica relevante dentro de un proceso de manufactura, determina la variación de las medidas de la pieza producida respecto a la diseñada, e influye directamente sobre la funcionalidad y calidad del componente, la tolerancia de impresoras típicas del proceso SLA es de 0.1 mm, mientras que de FDM es de 0.5 mm (Formlabs, 2017). Se emplearon equipos de la marca Formlabs, que cuenta con dos resinas con las características buscadas: resina elástica 50A (Hoja técnica, Apéndice A) y resina flexible 80A (Hoja técnica, Apéndice B). Según su hoja técnica la primera tiene un porcentaje de alargamiento a la rotura de 160% y la segunda de 120%; el diseño sistema electrónico flexible buscó maximizar las propiedades de

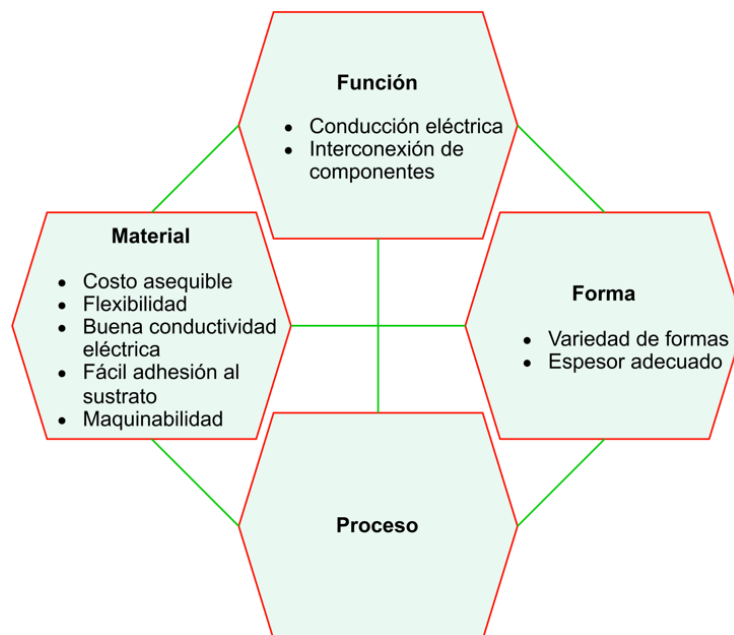
flexibilidad y elongación, es por ello se seleccionó la resina elástica 50A (Hoja técnica, Apéndice A) para la fabricación del sustrato.

Para la selección del material de conductor se analizó la interacción función, forma y proceso (Figura 17). Se seleccionaron diferentes opciones en el mercado que tengan la capacidad de satisfacer las necesidades planteadas. Mediante la matriz de selección presentada en la Tabla 1 se buscó analizar y decidir en referencia a los criterios propuestos la mejor opción. El peso señala de forma porcentual la importancia del criterio, “E” es la columna de evaluación (valor de 1 – 5, siendo 1 el menos satisfactorio) y producto de ambas da como resultado la columna “Ep”, evaluación ponderada. El proceso se definió después de la selección del material.

En la asignación de pesos, la maquinabilidad de trazas tomó un 30% debido a la importancia de generar probetas reproducibles; a la facilidad de adhesión se le asignó un 30% porque se busca formar un sistema flexible compacto. La flexibilidad toma un 30%, pues este es el requerimiento principal de la aplicación. Finalmente, al costo se le asignó un peso del 10%. La Tabla 1, reporta a la cinta de aluminio y cobre como las mejores opciones. El proceso que permitió manufacturar las cintas de aluminio y cobre es el corte plotter.

Figura 17

Interacción material – función – proceso y forma. Conductor

**Tabla 1**

Matriz de selección. Conductor

Criterios	Peso %	Alternativas											
		Hilo conductor		Bolígrafo de tinta conductiva		Película ITO-Pet		Pintura conductiva		Cinta de aluminio		Cinta de cobre	
		E	Ep	E	Ep	E	Ep	E	Ep	E	Ep	E	Ep
Costo asequible	10	5	0.5	4	0.4	1	0.1	1	0.1	5	0.5	5	0.5
Flexibilidad	30	5	1.5	4	1.2	5	1.5	4	1.2	3	0.9	3	0.9
Facilidad de adhesión	30	3	0.9	5	1.5	2	0.6	5	1.5	5	1.5	5	1.5
Maquinabilidad de trazas	30	2	0.6	3	0.9	4	1.2	3	0.9	5	1.5	5	1.5
Total	100	3.5		4		3.4		3.7		4.4		4.4	

Al igual que en el caso anterior, para seleccionar el material de la cobertura se realizó un análisis de la interacción material, función, forma y proceso (Figura 18). El proceso no se definió ya que dependía del material escogido posteriormente. Al evaluar en el mercado las

posibles opciones que cumplan con los requerimientos del cobertor se desarrolló la matriz de selección de la Tabla 2. Al tratarse de la cobertura del sistema flexible es de suma relevancia que pueda adherir en un solo conjunto al sistema, y que su aplicación sea reproducible permitiendo generar un diseño experimental, por ese motivo ambas tuvieron un peso de 25%. La flexibilidad al ser la característica buscada en el sistema, se le asignó un 20%. Los circuitos electrónicos tienen componentes que generalmente disipan calor, por ello el cobertor debe ser termorresistente, a esta característica se le dio un peso de 20%. La transparencia permite tener un control del sistema, por ello tuvo un peso del 5% al igual que el costo. El mejor material fue la cinta de poliimida, y su proceso de la manufactura fue el corte láser. En la Figura 19, se presenta la estructura final del sistema electrónico flexible diseñado.

Figura 18

Interacción material – función – proceso y forma. Cobertura

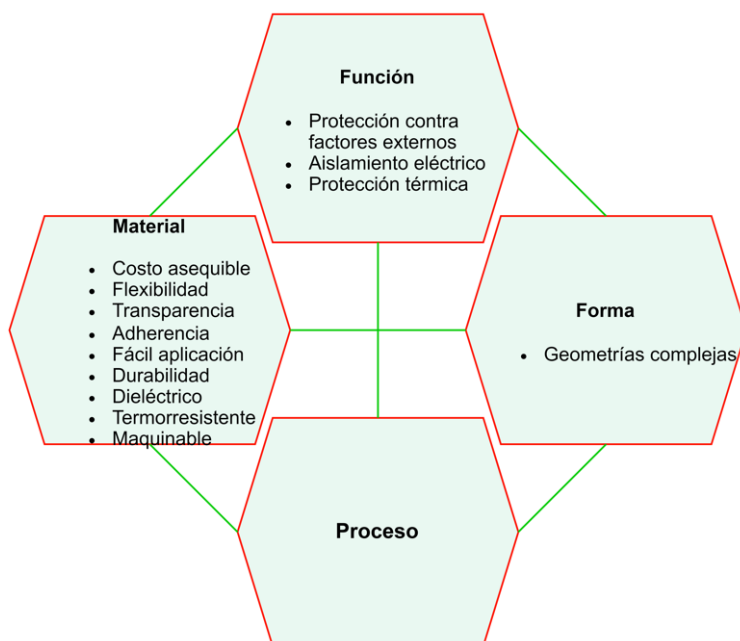
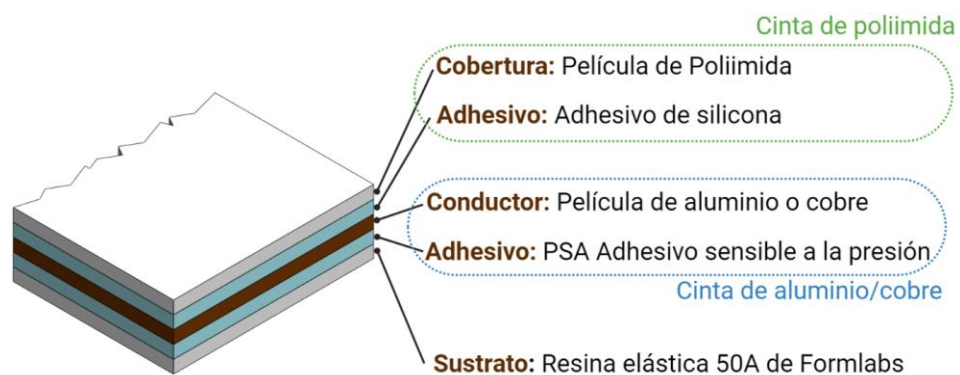


Tabla 2*Matriz de selección. Cobertura*

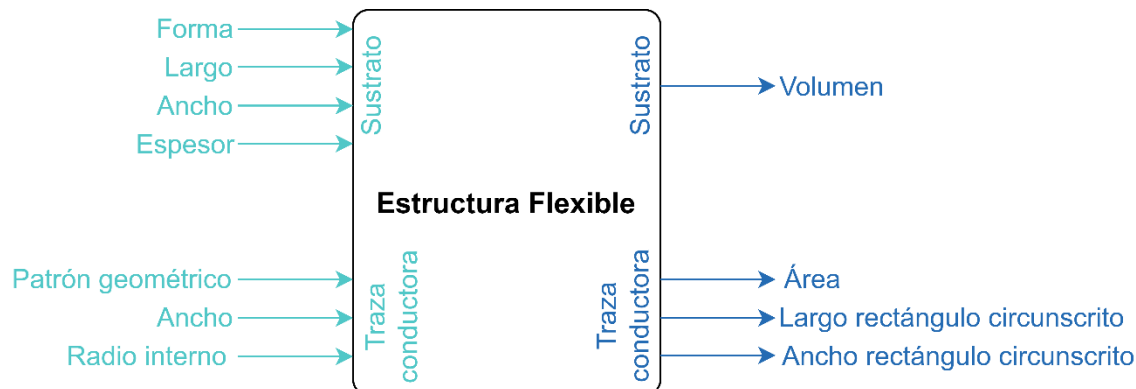
Criterios	Peso %	Alternativas									
		Membrana de PDMS		Cinta de poliimida		Pega T-7000		Resina elástica 50A		Pega epóxica	
		E	Ep	E	Ep	E	Ep	E	Ep	E	Ep
Costo asequible	5	1	0.05	5	0.25	4	0.2	3	0.15	4	0.2
Flexibilidad	20	5	1	4	0.8	2	0.4	4	0.8	2	0.4
Transparencia	5	5	0.25	5	0.25	3	0.15	3	0.15	3	0.15
Adherencia	25	1	0.25	5	1.25	3	0.75	5	1.25	4	1
Fácil aplicación	25	3	0.75	5	1.25	2	0.5	2	0.5	2	0.5
Termorresistente	20	5	1	5	1	4	0.8	4	0.8	4	0.8
Total	100	3.3		4.8		2.8		3.65		3.05	

Figura 19*Estructura del sistema electrónico flexible diseñado*

Para desarrollar la plataforma de diseño de estructuras flexibles se empleó la herramienta de tablas de diseño del software SolidWorks (SolidWorks, V2020), cuyos parámetros de entrada y salida se detallan en la Figura 20.

Figura 20

Parámetros de entrada y salida de plataforma de diseño para estructura flexibles



La plataforma de diseño contó con las posibles configuraciones que se generen a partir de las combinaciones de los parámetros de entrada detallados en la Tabla 3.

Tabla 3

Parámetros de entrada de la plataforma de diseño

Parámetro	Opción				
	1	2	3	4	
Sustrato	Forma	Rectangular	Ovalada	Pentagonal irregular	Hexagonal irregular
	Largo	60	80	100	-
	Ancho	6	12	-	-
	Espesor	0.5	1	-	-
Traza	Patrón geométrico	Curvo	Lineal	-	-
	Radio	2	3	-	-
	Ancho	0.42	1.09	2.85	-

Nota. Medidas en milímetros.

Al hablar de los parámetros de entrada, la forma del sustrato generalmente utilizada es rectangular y en menor medida ovalada, hexagonal irregular y pentagonal irregular (Ej. sensores), por lo tanto, se utilizaron estos 4 tipos de formas (Figura 21). Los parámetros

dimensionales del sustrato y la traza se describen en la Figura 22. El largo de sustrato propuesto es de 60, 80 y 100 mm, se tomaron las dimensiones más pequeñas de la norma IPC-2221 (Diseño de placas de circuito impreso), que define las medidas de las baquelitas, con valores en un rango de 60 a 350 mm de longitud. El ancho del sustrato tiene valores de 6 y 12 mm debido a que la plataforma presentará una sola traza, se procuró que tanto patrón geométrico lineal y curvo en sus diferentes configuraciones tengan el espacio suficiente. Al realizar pruebas de imprimibilidad se determinó que el espesor mínimo de sustrato que se puede obtener es de 0.5 mm y el espesor más adecuado es de 1 mm, por ello se tomaron ambos extremos. El patrón geométrico de la traza puede ser curvo o lineal, el patrón curvo es generalmente utilizado en electrónica flexible por sus características de deformación, y el patrón lineal es usado de forma tradicional (Figura 21). Se asignaron valores de 2 y 3 mm de radio interno en las trazas conductoras con un patrón curvo, garantizando la distancia mínima entre trazas y evitando posibles inconvenientes en el proceso de manufactura y ensamble del sistema. El ancho de la traza es de 0.42, 1.09 y 2.85 mm que tomando como referencia las trazas de cobre, reportan una corriente normal de 0.5, 1 y 2 amperios respectivamente.

Figura 21

Forma del sustrato. a) Rectangular. b) Ovalada. c) Pentagonal Irregular. d) Hexagonal irregular

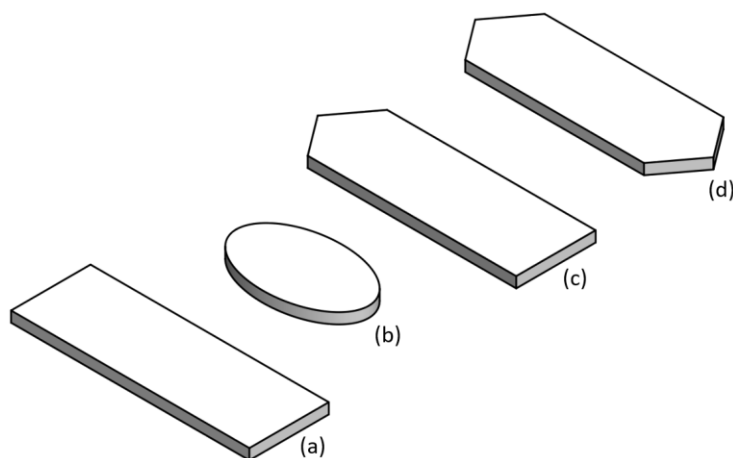
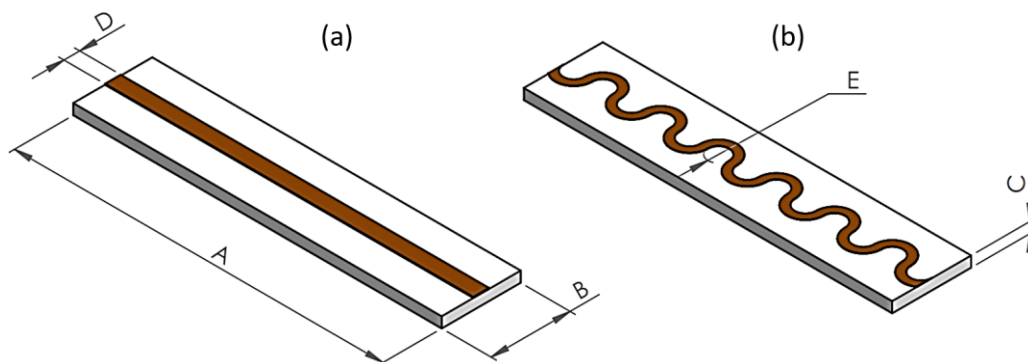


Figura 22

Patrones geométricos de traza. a) Lineal. b) Curvo



Nota. A: Largo sustrato. B: Ancho sustrato. C: Espesor sustrato. D: Ancho pista. E: Radio interno pista.

Al referirse a los parámetros de salida, para el sustrato se consideró el volumen, y para la traza el área y, largo y ancho de su rectángulo circunscrito, pues indican las dimensiones iniciales requeridas del material para la manufactura de la traza. Todas las ecuaciones referentes a los parámetros de la salida (Tabla 4) tienen la siguiente nomenclatura:

A: Largo sustrato [mm]

B: Ancho sustrato [mm]

C: Espesor sustrato [mm]

D: Ancho traza [mm]

E: Radio interno traza [mm]

W: Volumen sustrato [mm³]

X: Área traza [mm²]

Y: Largo rectángulo circunscrito traza [mm]

Z: Ancho rectángulo circunscrito traza [mm]

Tabla 4

Ecuaciones de parámetros de salida

Parámetro	Variable	Ecuación
Volumen del sustrato	Rectangular	Ecuación 2
	Ovalada	Ecuación 3
	Pentagonal	Ecuación 4
	Hexagonal	Ecuación 5
Área traza	Lineal	Ecuación 6
	Curva rectangular/ovalada	Ecuación 7
	Curva pentagonal	Ecuación 8
	Curva hexagonal	Ecuación 9
Largo rectángulo circunscrito traza	-	Ecuación 10
Ancho rectángulo circunscrito traza	Lineal	Ecuación 11
	Curvo	Ecuación 12

Ecuación 2

$$W = ABC$$

Ecuación 3

$$W = \frac{\pi ABC}{4}$$

Ecuación 4

$$W = \frac{15}{16} ABC$$

Ecuación 5

$$W = \frac{7}{8}ABC$$

Ecuación 6

$$X = AD$$

Ecuación 7

$$X \approx \frac{\pi A(D^2 + 2ED)}{2(2E + D)}$$

Ecuación 8

$$X \approx \frac{\pi \left(\frac{9A}{10} + D \right) (D^2 + 2DE)}{2(2E + D)} + \left(\frac{A}{10} - D \right) (D)$$

Ecuación 9

$$X \approx \frac{\pi \left(\frac{3A}{4} \right) (D^2 + 2DE)}{2(2E + D)} + \frac{4}{D}$$

Ecuación 10

$$Y = A$$

Ecuación 11

$$Z = D$$

Ecuación 12

$$Z = 2D + 2E$$

Sistema electrónico flexible y caracterización de sus partes***Diseño del sistema electrónico flexible***

La estructura del sistema electrónico flexible se integró por los elementos de la Figura 19. El diseño de las trazas del sistema parte de la corriente nominal, el sistema de aluminio y de cobre se diseñaron para funcionar con un 1 [A]. Siguiendo las fórmulas de la norma IPC-2221 (Ecuación 13 y Ecuación 14), y recomendaciones de la norma IPC-2223 (Diseño para placas de circuito impreso flexible/rígido-flexible), se obtuvieron los resultados de la Tabla 5. Se carece de información referente al ajuste de curvas de trazas de aluminio, por lo cual se partió de la relación de la resistividad eléctrica [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$] entre ambos materiales para estimar su ancho.

Ecuación 13

$$A = \left(\frac{I}{k \cdot \Delta T^b} \right)^{\frac{1}{c}}$$

$$k = \begin{cases} 0.024 & \text{pista interna} \\ 0.048 & \text{pista externa} \end{cases}$$

$$b = 0.44$$

$$c = 0.725$$

A: Sección transversal [mils^2]

I: Corriente máxima [A]

ΔT : Máximo aumento de temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

k : Constante de ajuste de curva de IPC2221 para cobre

$b = 0.44$: Constante de ajuste de curva de IPC2221 para cobre

$c = 0.725$: Constante de ajuste de curva de IPC2221 para cobre

Ecuación 14

$$W = \frac{A}{t \cdot 1.378}$$

A : Sección transversal [mils^2]

t : Espesor de la traza [oz/ft^2]

W : Ancho de la traza [mils]

Tabla 5

Parámetro de traza conductoras de cobre y aluminio

Material	Parámetro	Valor	Unidad
Cobre	Corriente máxima	1	A
	Espesor de la traza	0.025	mm
	Máximo aumento de temperatura	10	$^{\circ}\text{C}$
	Ancho de traza	1.09	mm
Aluminio	Corriente máxima	1	A
	Espesor de la traza	0.041	mm
	Máximo aumento de temperatura	10	$^{\circ}\text{C}$
	Ancho de traza	1.11	mm

Sustrato

El sustrato del sistema electrónico flexible se lo desarrolló a partir de resina elástica 50A Formlabs (Hoja técnica, Apéndice A) mediante un proceso de impresión 3D por estereolitografía. Con referencia al capítulo II, el sustrato resultante tuvo características anisotrópicas; con el fin de maximizar sus propiedades mecánicas en tracción y torsión se determinó la mejor orientación de impresión (Figura 23) mediante un análisis de varianza ANOVA para cada caso, de un factor, tres niveles y cinco réplicas (Tabla 6).

Figura 23

Orientaciones de impresión

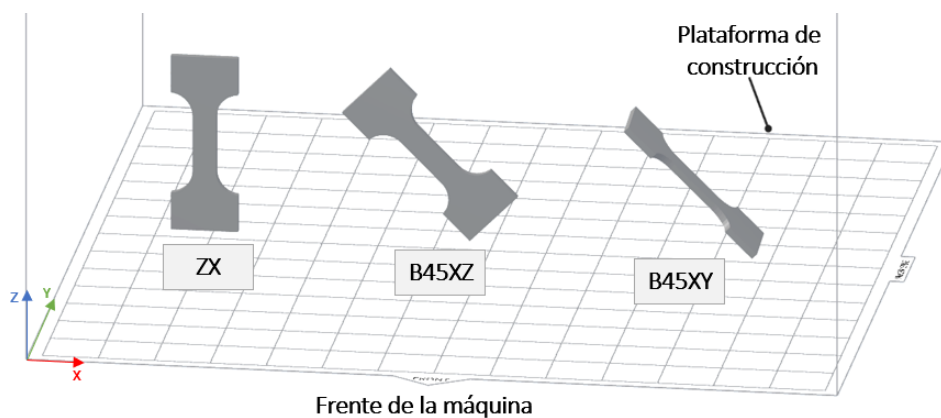


Tabla 6

ANOVA para maximización de propiedades mecánicas del sustrato

Factor	Niveles		
	1	2	3
Orientación	ZX	B45XZ	B45XY

La hipótesis para el método estadístico se aprecia en la Figura 24.

Figura 24

Hipótesis para análisis 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.

Si $p < \alpha$, rechazar hipótesis nula H_0 y aceptar hipótesis alterna H_1

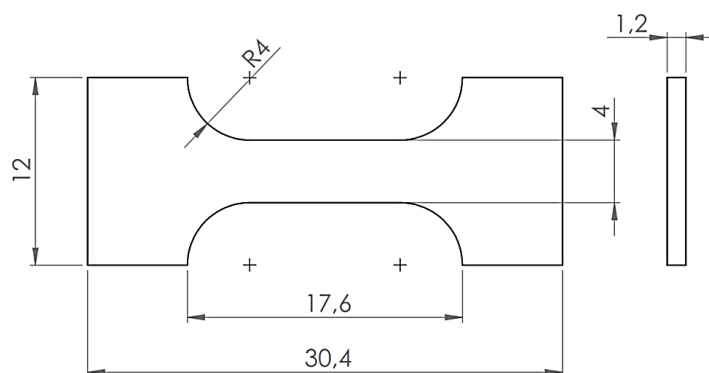
Si $p > \alpha$, no rechazar hipótesis nula H_0 y aceptarla

Diseño y fabricación de probetas.

Diseño CAD. Las probetas se diseñaron en el software CAD SolidWorks (SolidWorks, V2020); con referencia al capítulo II, para el ensayo de tracción se tomaron las dimensiones del espécimen de la norma ASTM D1708-18 y para el ensayo de torsión se planteó una metodología, véase la Figura 25.

Figura 25

Dimensiones de espécimen de resina elástica 50A para ensayos de tracción y torsión



Nota. Escalado 20% de ASTM D1708-18, medidas en milímetros

Materiales y equipos.

Tabla 7

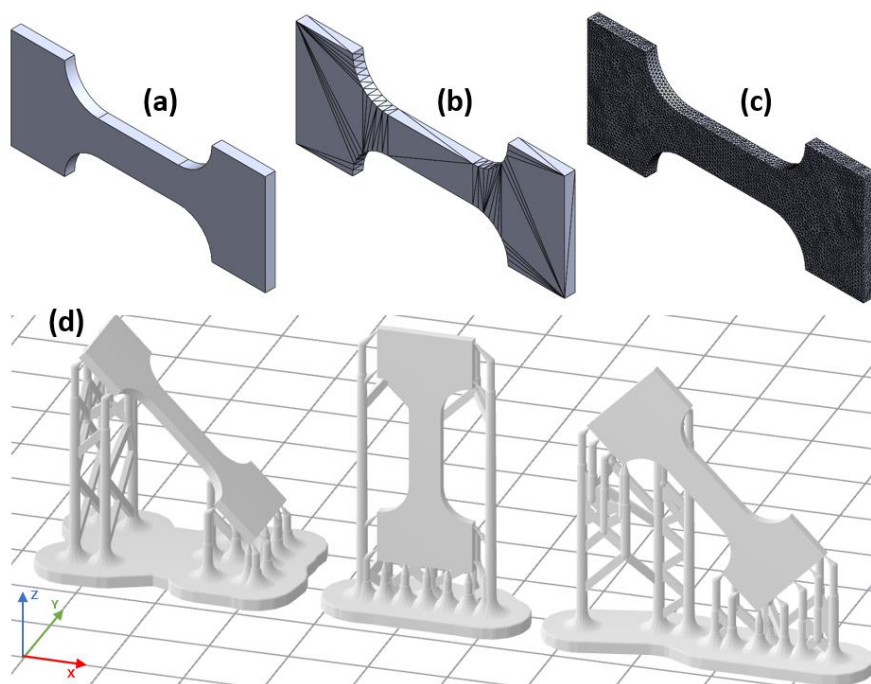
Materiales y equipos para impresión 3D por estereolitografía

	Nombre	Fabricante	Hoja técnica
Materiales	Resina elástica 50	Formlabs	Apéndice A
	Alcohol isopropílico al 97%	-	-
	Espátula de remoción de piezas	Formlabs	-
	Pinzas para remoción de soportes	Formlabs	-
	Guantes de nitrilo	-	-
	Atomizador plástico para alcohol	-	-
	Marcado permanente punta fina	-	-
	Cajas Petri	-	-
Equipos	Impresora Form 3+	Formlabs	Apéndice C
	Máquina de lavado y curado 3D UW-01	Creality	Apéndice D
	Microscopio digital USB	Plugable	Apéndice E
	Calibrador digital modelo estándar	Insize	Apéndice F

Preprocesado. El modelo CAD se exportó a formato STL y se mejoró su mallado mediante el software MeshLab (ISTI, V2022.02) usando el filtro de reajuste isótropo explícito dos veces. Posteriormente se importó al programa Preform y se ubicaron sus respectivos soportes en las diferentes orientaciones. Mírese la Figura 26.

Figura 26

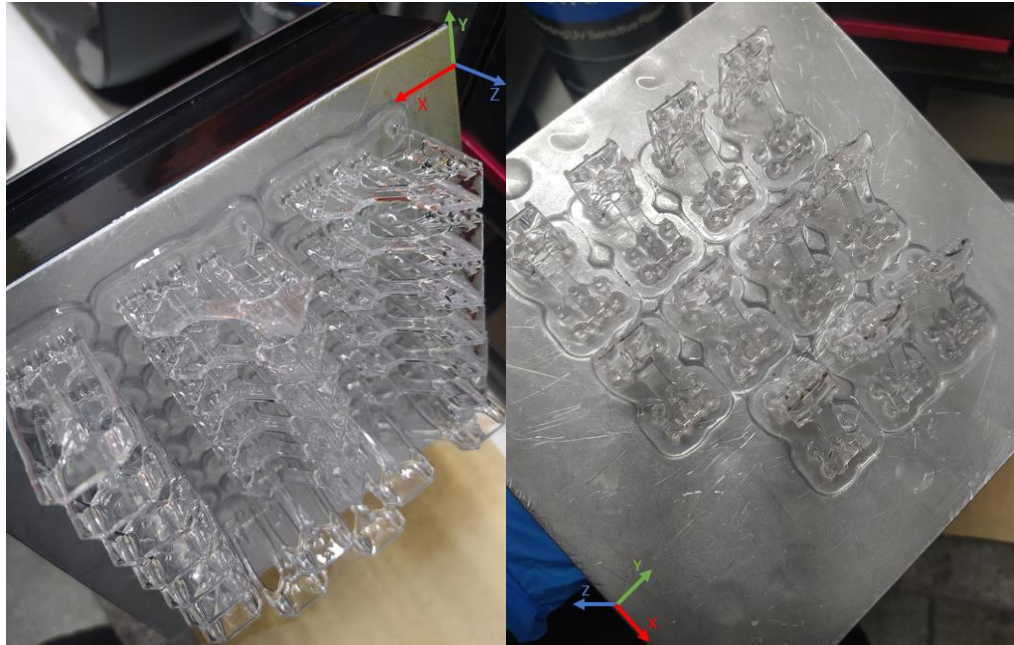
Preprocesado. a) Modelo CAD. b) Modelo en formato STL. c) Mejorado del mallado. d) Ubicación de soportes



Impresión 3D por estereolitografía de probetas. Se imprimieron las probetas en la impresora Form 3+ (Hoja técnica, Apéndice C) con 0.1 [mm] de grosor de capa, única configuración admisible para la resina elástica 50A (Hoja técnica, Apéndice A), véase la Figura 27.

Figura 27

Impresión 3D de probetas para análisis de orientaciones



Posprocesado. El posprocesado se describe en la Figura 28, para el lavado se usó la Lavadora/Curadora 3D UW-01 a una velocidad “Quick”, el retiro de probetas se realizó con ayuda de la espátula y el retiro de soportes con las pinzas. El postcurado se hizo en la máquina UW-01 con una velocidad de giro “Slow” (Figura 29). El rotulado se realizó con un marcado permanente mientras se guardaron en cajas Petri. Se debe dejar reposar las probetas por al menos dos días para que recuperen su tamaño original ya que la resina es elástica y por efecto de la gravedad se estira al imprimirse. Se midieron y visualizaron las probetas, Figura 30.

Figura 28

Diagrama de flujo para posprocesado de probetas impresas en 3D por estereolitografía

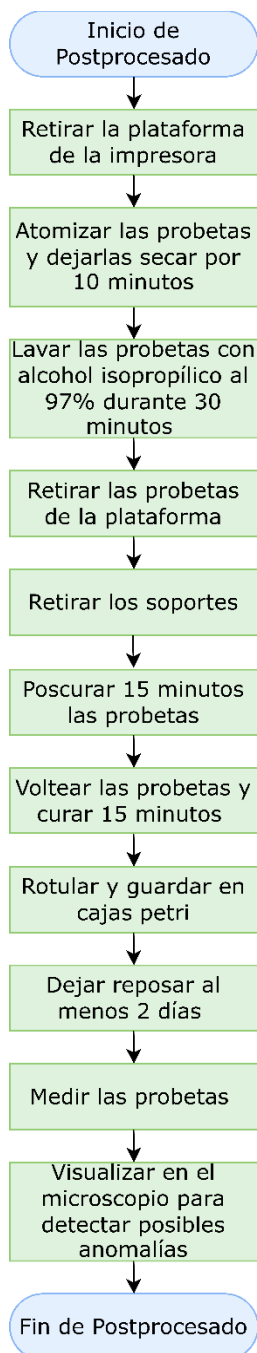
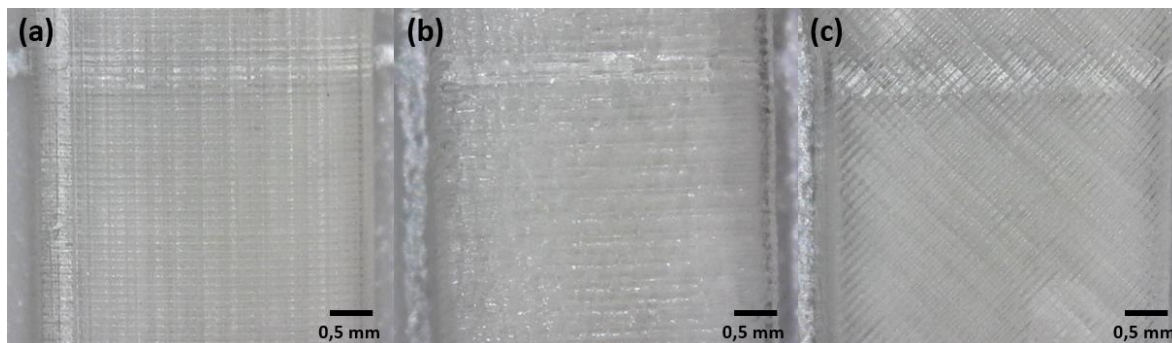


Figura 29

Poscurado de probetas impresas en 3D por estereolitografía

**Figura 30**

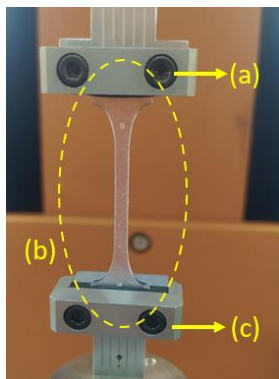
Evaluación visual de las probetas para detección de anomalías. a) Orientación ZX. b) Orientación B45XY. c) Orientación B45XZ

**Ensayos Mecánicos**

Ensayo de tracción. Los ensayos de tracción se realizaron en la máquina DHR 2 – Discovery HR-2 (Hoja técnica, Apéndice G) mostrada Figura 31, bajo los parámetros de ensayos detallados en la Tabla 8. Las probetas ensayadas se registran en la Figura 32. Para los ensayos de tracción se asumió una sección transversal constante.

Figura 31

Ensayos de tracción sustrato. a) Mordaza superior. b) Probeta ZX. c) Mordaza inferior.

**Figura 32**

Probetas ensayadas sustrato tracción. a) Orientación ZX. b) Orientación B45XZ. c) Orientación B45XY

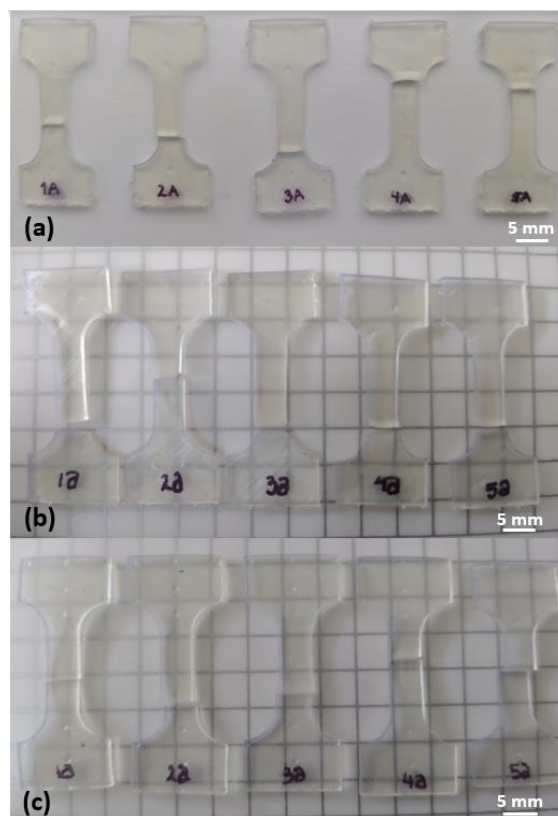


Tabla 8

Parámetros de ensayo de tracción – Orientación de sustratos

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad lineal constante	250	$\mu\text{m/s}$
Torque de ajuste de las mordazas	7.5	cN.m
Mordazas de caucho	No	
Temperatura ambiente	19.8	$^{\circ}\text{C}$

Ensayo de torsión. Los ensayos de torsión se efectuaron en la máquina DHR 2 – Discovery HR-2 (Hoja técnica, Apéndice G) mostrada Figura 33, bajo los parámetros de ensayos detallados en la Tabla 9. Las probetas ensayadas se registran en la Figura 34.

Figura 33

Ensayos de torsión sustrato. a) Extremo giratorio. b) Mordaza superior. c) Probeta B45XZ. d) Mordaza inferior

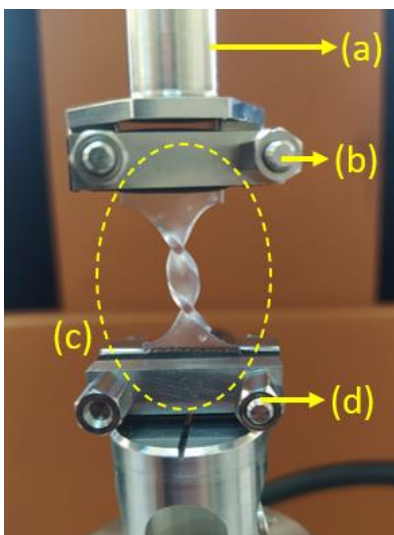
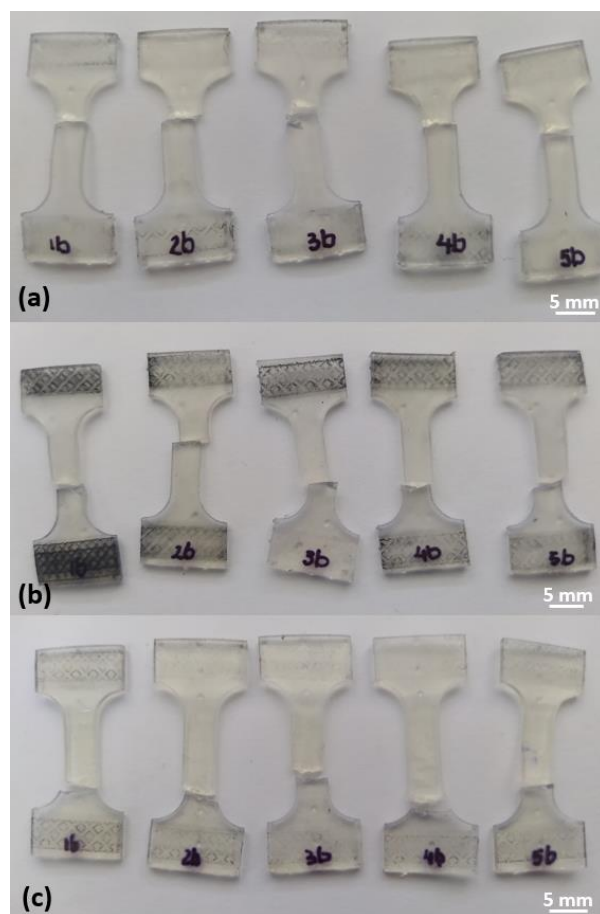


Figura 34

Probetas ensayadas sustrato torsión. a) Orientación ZX. b) Orientación B45XZ. c) Orientación B45XY

**Tabla 9**

Parámetros de ensayo de torsión – Orientación de sustratos

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad angular	0.4	rad/s
Torque de ajuste de las mordazas	5	cN.m
Mordazas de caucho	Si	
Temperatura ambiente	19.8	°C

Cinta de aluminio/Cobre

Dentro de la caracterización de la cinta de aluminio y cobre, se verificó la conductividad eléctrica con una prueba de continuidad audible. Para verificar la conductividad eléctrica teórica se realizó una espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (análisis EDS) para determinar la composición química, se analizó su microestructura y, se evaluaron sus propiedades mecánicas a tracción y torsión.

Espectroscopía de rayos X por dispersión de energía. Se realizó un análisis elemental de las muestras por medio de un detector de energía dispersiva de rayos X incorporando a un microscopio electrónico de barrido (SEM), Figura 35. Se usaron los parámetros descritos en la Tabla 10.

Figura 35

Microscopio electrónico de barrido (Incluye detector EDS)



Nota. Tomado de (AMIKON, s. f.)

Tabla 10

Parámetros de funcionamiento del SEM para análisis EDS.

Parámetros	Material	
	Aluminio	Cobre
Distancia entre detector y muestra (mm)	8.5	8.5
Voltaje de aceleración (kV)	20	25

Análisis microestructural. Para realizar el análisis microestructura se utilizó un microscopio metalúrgico (Hoja técnica, Apéndice H), véase la Figura 36. Tras llevar las cintas a un acabado espejo, se realizó un ataque químico según la norma ASTM E407 (Microataque de metales y aleaciones) con los reactivos indicados en la Tabla 11.

Figura 36

Microscopio metalúrgico

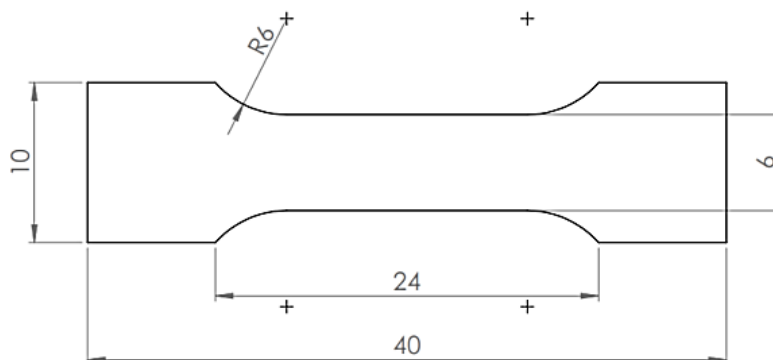


Tabla 11*Reactivos para ataque químico*

Material	No. Reactivo ASTM E407	Composición	Procedimiento
Cobre	40	5 g FeCl ₃ 16 mL HCl 60 mL metanol (95%)	Aplicar de entre unos segundos a unos minutos.
Aluminio	3	2 mL HF 3 mL HCl 5 mL HNO ₃ 190 mL agua (Keller's)	Aplicar de 10 a 20 segundos y lavar en chorro de agua tibia.

Manufactura de probetas para ensayos mecánicos. Para su caracterización se manufacturaron 5 especímenes de cada material, tanto para el ensayo de tracción como de torsión.

Diseño CAD. Las dimensiones de las probetas se cortaron acorde ASTM E8/E8M-13 para tracción, en el caso de torsión se tomaron las mismas medidas (Figura 37).

Figura 37*Dimensiones de espécimen de aluminio/cobre para ensayos de tracción y torsión*

Nota. Con referencia a ASTM E8/E8M-13, medidas en milímetros

Materiales y equipos.

Tabla 12

Materiales y equipos para corte plotter de cinta de aluminio/cobre

	Nombre	Fabricante	Hoja técnica
Materiales	Cinta de aluminio	Impresa	-
	Cinta de cobre	LLP International Group	-
Equipos	Cortadora Plotter CE6000	Graphtec	Apéndice I

Corte plotter de las probetas. La materia prima estuvo constituida por un rollo de cinta de aluminio/cobre de dos pulgadas de ancho con un espesor de 0.041 [mm] y 0.025 [mm] (sin adhesivo) respectivamente. Las probetas se manufacturan mediante corte plotter (Figura 38) con los parámetros descritos en la Tabla 13.

Figura 38

Corte plotter. a) Actuador horizontal. b) Rodillos. c) Cuchilla. d) Cinta de materia prima

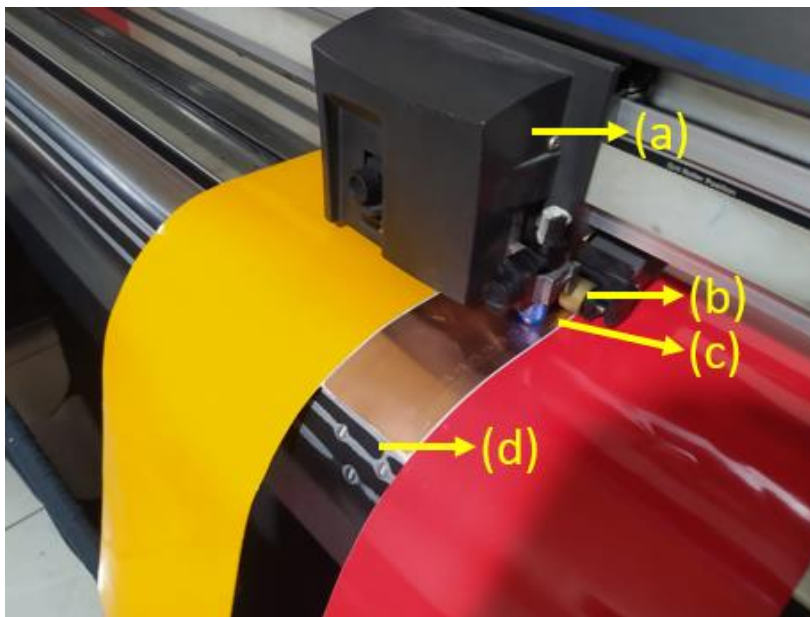


Tabla 13*Parámetros corte plotter aluminio/cobre*

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad de corte aluminio/cobre	3	mm/s
Fuerza de corte aluminio	15	gf
Fuerza de corte cobre	13	gf

Ensayos mecánicos.

Ensayo de tracción. Se uso la máquina DHR 2 – Discovery HR-2 (Hoja técnica, Apéndice G) mostrada en la Figura 39, bajo los parámetros de ensayos detallados en la Tabla 14. Las probetas ensayadas se registran en la Figura 40.

Figura 39

Ensayos de tracción cinta aluminio/cobre. a) Mordaza superior. b) Probeta de aluminio. c) Mordaza inferior.

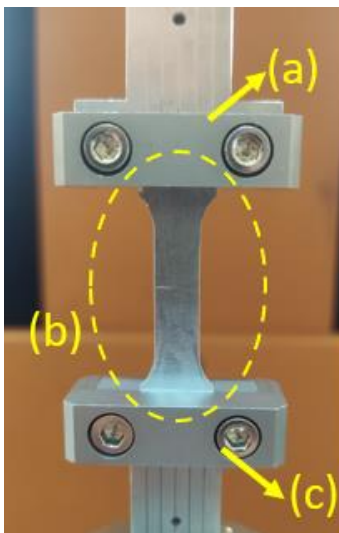


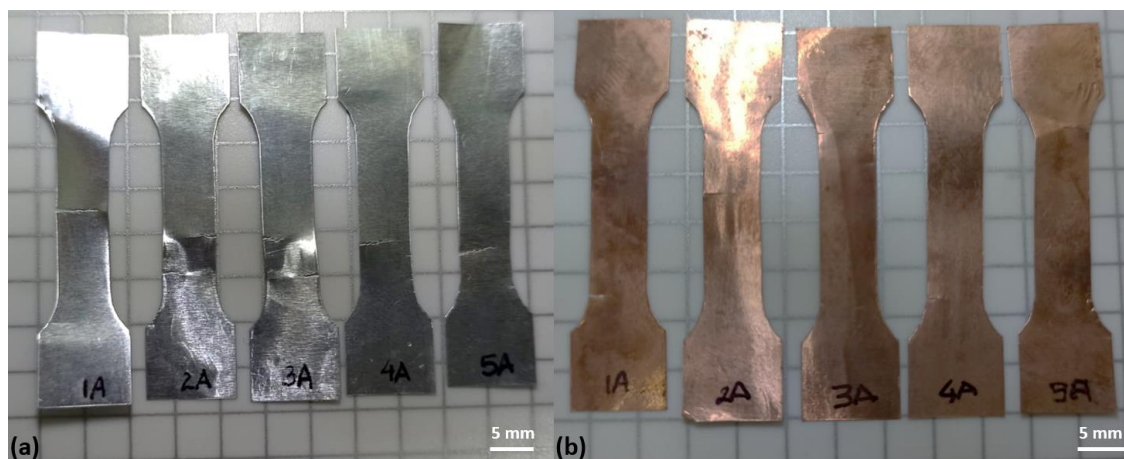
Tabla 14

Parámetros de ensayo de tracción – Cinta de aluminio/cobre

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad lineal constante	5	$\mu\text{m/s}$
Torque de ajuste de las mordazas	15	cN.m
Temperatura ambiente	20.1	$^{\circ}\text{C}$

Figura 40

Probetas ensayadas tracción. a) Aluminio. b) Cobre.



Ensayo de torsión. La Figura 41, muestra el ensayo de una probeta montada en la máquina DHR 2 – Discovery HR-2 (Hoja técnica, Apéndice G) bajo los parámetros de la Tabla 15. Las probetas ensayadas se registran en la Figura 42.

Tabla 15

Parámetros de ensayo de torsión – Aluminio/Cobre

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad angular	0.03	rad/s
Torque de ajuste de las mordazas	20	cN.m
Temperatura ambiente	19.8	$^{\circ}\text{C}$

Figura 41

Ensayos de torsión aluminio/cobre. a) Extremo giratorio. b) Mordaza superior. c) Probeta aluminio. d) Mordaza inferior

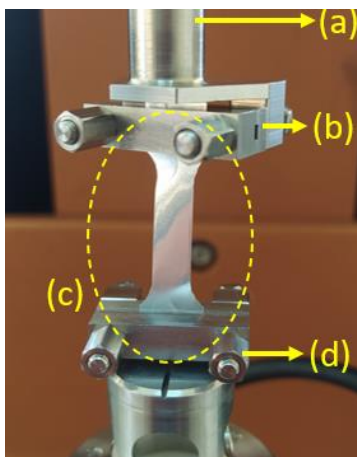
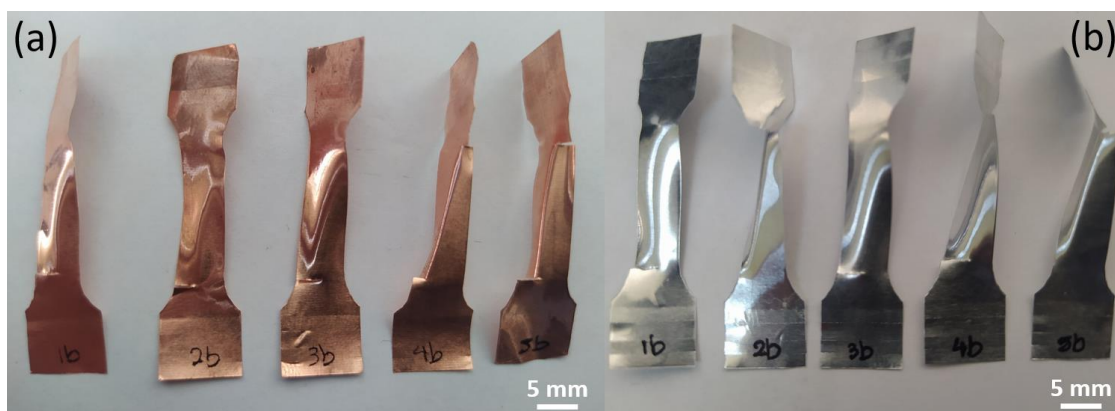


Figura 42

Probetas ensayadas torsión. a) Aluminio. b) Cobre.



Cinta de poliimida

Para desarrollo de la caracterización de la cinta de poliimida se manufacturaron 5 especímenes para cada ensayo.

Manufactura de probetas.

Diseño CAD. Se tomaron las dimensiones del espécimen de la Figura 25.

Materiales y equipos.

Tabla 16

Materiales y equipos para corte láser de poliimida

	Nombre	Fabricante	Hoja técnica
Materiales	Cinta de poliimida de alta temperatura	Advanced Polymer Tape	-
	Juego de bisturíes	Pretul	-
Equipos	Máquina de corte láser CO2 CM Serie	HAN'S YUEMING LASER	Apéndice J

Corte láser de las probetas. Se usó un rollo de poliimida de dos pulgadas de ancho con un espesor de 0.034 [mm]. Las probetas se manufacturaron mediante corte láser (Figura 43) con los parámetros descritos en la Tabla 17. Para retirarlas se aplicó una leve fuerza y se hizo uso de los bisturíes.

Figura 43

Probetas manufacturadas por corte láser

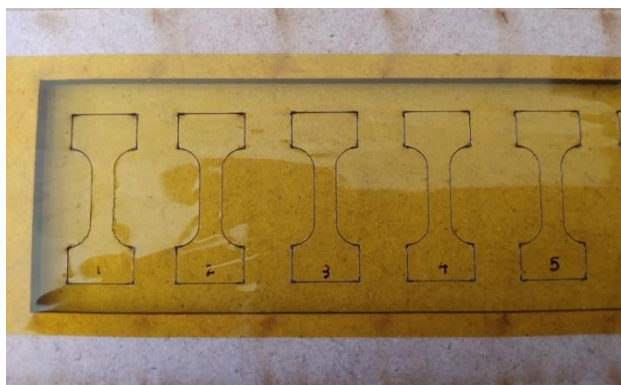


Tabla 17*Parámetros corte láser poliimida*

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad de corte	180	mm/s
Potencia	33	W

Ensayos mecánicos.

Ensayo de tracción. Se uso la máquina DHR 2 – Discovery HR-2 (Hoja técnica, Apéndice G) mostrada en la Figura 44, bajo los parámetros detallados en la Tabla 18. Las probetas ensayadas se registran en la Figura 45.

Tabla 18*Parámetros de ensayo de tracción – Cinta de poliimida*

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad lineal constante	25	$\mu\text{m/s}$
Torque de ajuste de las mordazas	25	cN.m
Temperatura ambiente	19.7	$^{\circ}\text{C}$

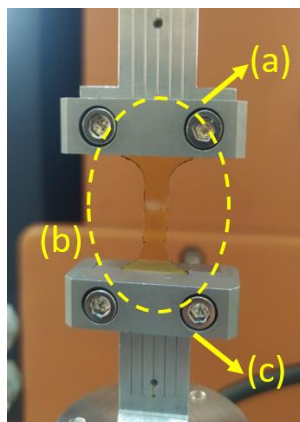
Figura 44*Ensayos de tracción poliimida. a) Mordaza superior. b) Probeta. c) Mordaza inferior.*

Figura 45

Probetas ensayadas por tracción de poliimida



Ensayo de torsión. Los parámetros del ensayo se aprecian en la Tabla 19. Las probetas ensayadas se registran en la Figura 46.

Tabla 19

Parámetros de ensayo de torsión – Poliimida

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad angular	0.3	rad/s
Torque de ajuste de las mordazas	30	cN.m
Temperatura ambiente	19.8	°C

Figura 46

Probetas ensayadas por torsión de poliimida



Evaluación de propiedades mecánicas asociada al doblado y estiramiento

Diseño experimental

En este diseño experimental se planeó obtener el sistema electrónico flexible con las mejores características mecánicas a partir de las posibles opciones descritas en el planteamiento del sistema.

Definición de meta. El objetivo del diseño experimental fue maximizar las propiedades mecánicas de tracción y torsión del sistema evaluando la resistencia última a la tracción, el porcentaje de alargamiento a la rotura, la resistencia al corte y la deformación por cortante mediante el monitoreo de la continuidad eléctrica y estado físico del sistema.

Factores y niveles. El patrón geométrico de la traza conductora fue considerado como un factor de dos niveles: lineal y curvo (Tabla 20), se hizo esta consideración debido a la gran influencia del factor dentro de las propiedades mecánicas en aplicaciones de electrónica flexible. (Vaithilingam et al., 2020)

Tabla 20

Factores y niveles de diseño experimental

Factor	Niveles	
	1	2
Patrón geométrico	Lineal	Curva
Material de traza conductora	Cinta de aluminio	Cinta de cobre

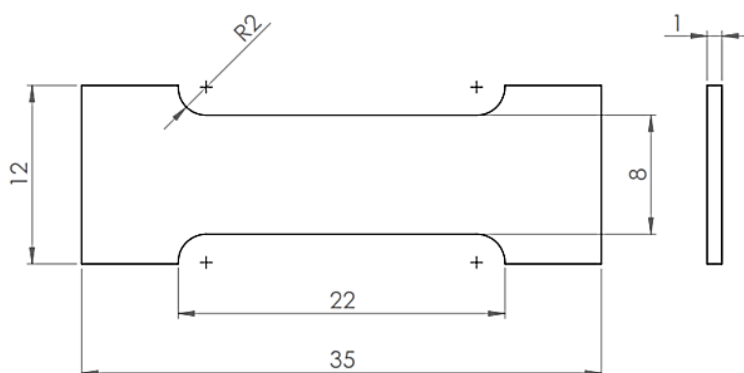
Método de diseño experimental. Se aplicó un diseño experimental factorial completo de 2 factores, 2 niveles y 5 réplicas, es decir, 4 combinaciones y 20 corridas.

Diseño y Fabricación de probetas

Diseño CAD. Las probetas se diseñaron acorde a las capacidades de la máquina DHR 2 – Discovery HR-2 (Hoja técnica, Apéndice G). El sustrato se imprimió con las medidas de la Figura 47 en la orientación que maximice las propiedades mecánicas en torsión y tracción, dato obtenido de la caracterización del sustrato.

Figura 47

Dimensiones del sustrato del sistema electrónico flexible

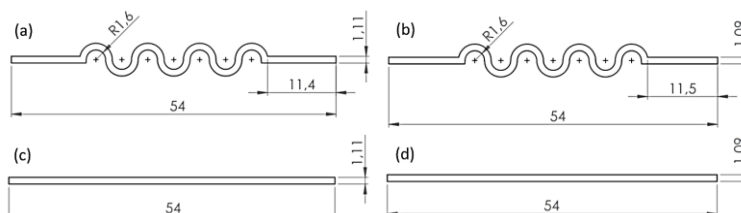


Nota. Medidas en milímetros

Las trazas se cortaron acorde a las medidas y patrón geométrico de la Figura 48. La poliimida tuvo las mismas medidas que el sustrato correspondiente a la Figura 47.

Figura 48

Dimensiones de las trazas del sistema electrónico flexible. a) Aluminio Curvo. b) Aluminio Lineal. c) Cobre Curvo. d) Cobre Lineal.



Nota. Medidas en milímetros

Manufactura de las partes del sistema electrónico flexible y ensamble. La

manufactura del sustrato, traza conductora y cobertor siguió la misma metodología que en la caracterización de cada componente. Para el ensamble se trabajó en base a la Figura 49, el resultado se observa en la Figura 50.

Figura 49

Ensamble del sistema electrónico flexible

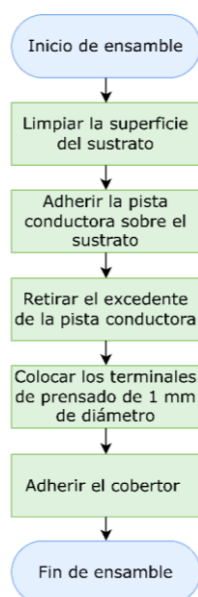
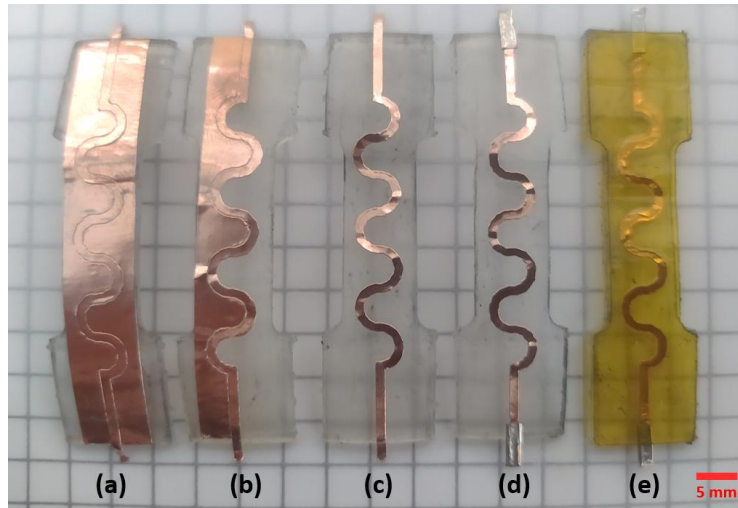


Figura 50

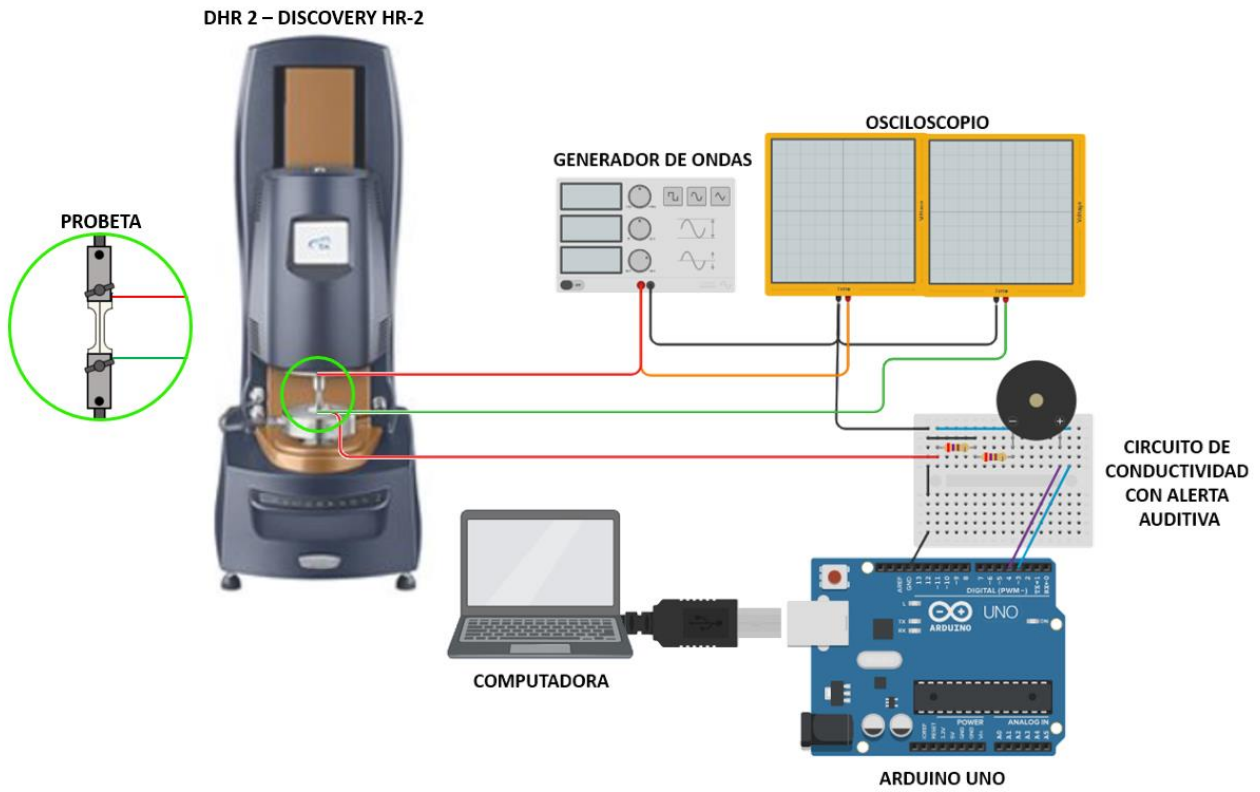
Ensamble del sistema electrónico flexible. a) Adhesión de la traza conductora en sustrato. b) Retiro de excedentes de traza conductora. c) Traza conductora colocada. d) Prensado de terminales. e) Sistema ensamblado

***Monitoreo de conductividad eléctrica y atenuación durante los ensayos***

Para realizar la evaluación de la conductividad eléctrica y atenuación durante los ensayos mecánicos se armó el sistema presentado en la Figura 51.

Figura 51

Sistema para evaluación de conductividad eléctrica y atenuación



Ensayos mecánicos

Materiales y equipos. Antes de realizar el montaje de las probetas en la máquina de ensayo se soldó sus pines a los cables del sistema de evaluación de conductividad eléctrica y atenuación.

Tabla 21

Materiales y equipos para ensayos mecánicos de sistema electrónico flexible

	Nombre	Fabricante	Hoja técnica
Materiales	Módulo generador de señal AD9850	Reland Sung	Apéndice K
	Arduino Uno	Arduino	Apéndice L
	Bocina	-	-
	Puntas de osciloscopio	-	-
	Cautín	Truper	-
	Estaño	-	-
	Pasta de soldadura	-	-
Equipos	DHR 2 – Discovery HR-2	TA Instruments	Apéndice G
	Computadora	Asus	-
	Osciloscopio DSO5072P	Hantek	Apéndice M

Ensayo de tracción. La Tabla 22 muestra los parámetros del ensayo de tracción del sistema. La Figura 52 muestra los ensayos de tracción del del sistema y la Figura 53 las probetas ensayadas.

Figura 52

Ensayos de tracción sistema electrónico flexible. a) Cables del sistema de evaluación de conductividad eléctrica y atenuación. b) Mordaza superior. c) Probeta curva de cobre. d) Mordaza inferior.

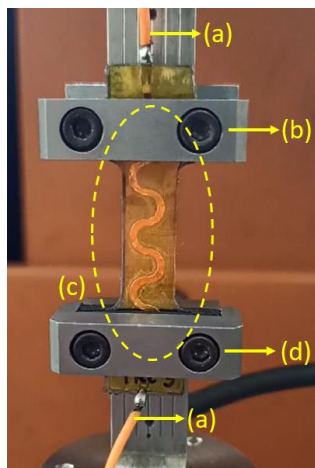
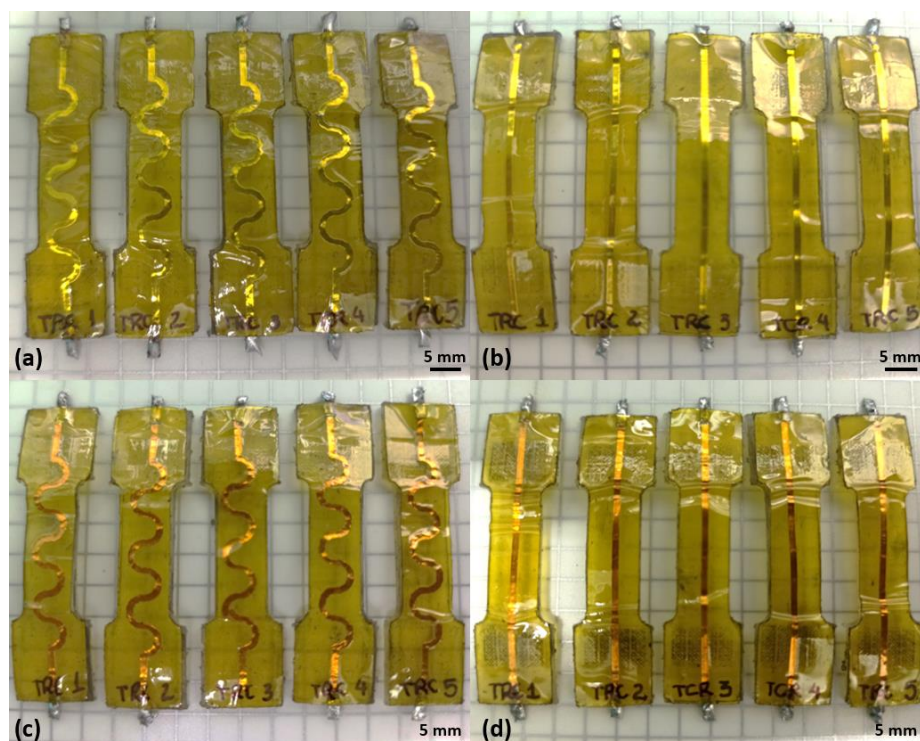


Figura 53

Probetas ensayadas tracción del sistema electrónico flexible. a) Curvo Aluminio. b) Lineal Aluminio. c) Curvo cobre. d) Lineal Cobre.

**Tabla 22**

Parámetros de ensayo de tracción – Sistema electrónico flexible

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad lineal constante	30	$\mu\text{m/s}$
Torque de ajuste de las mordazas	10	cN.m
Mordazas de caucho	Si	
Temperatura ambiente	20.5	$^{\circ}\text{C}$

Ensayo de torsión. La Tabla 23 presentó los parámetros de configuración del equipo para los ensayos de torsión (Figura 54). En la Figura 55, se evidencian las probetas ensayadas.

Figura 54

Ensayos de torsión sistema electrónico flexible. a) Extremo giratorio. b) Cables del sistema de evaluación de conductividad eléctrica y atenuación. c) Mordaza superior. d) Probeta curva aluminio. e) Mordaza inferior

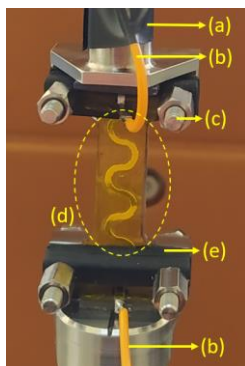


Figura 55

Probetas ensayadas torsión del sistema electrónico flexible. a) Curvo Aluminio. b) Lineal Aluminio. c) Curvo cobre. d) Lineal Cobre.

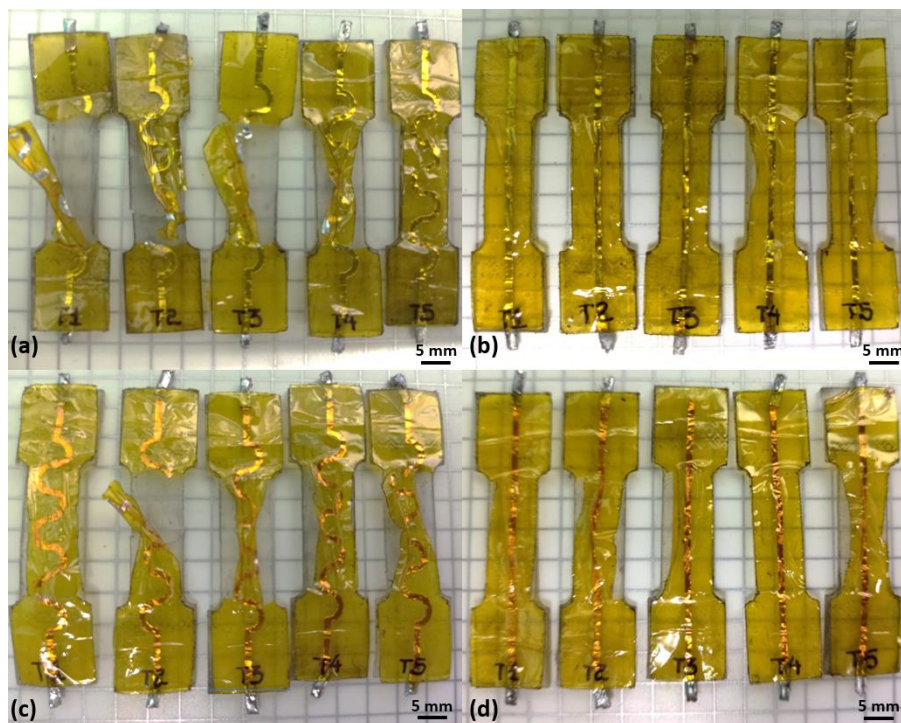


Tabla 23*Parámetros de ensayo de torsión – Sistema electrónico flexible*

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad angular	0.25	rad/s
Torque de ajuste de las mordazas	10	cN.m
Mordazas de caucho		Si
Temperatura ambiente	19.8	°C

Ley de mezclas

Con el fin de verificar la validez de los ensayos mecánicos y tener una idea previa al funcionamiento del sistema electrónico flexible, se obtuvo su resistencia última a la tracción aplicando la ley de mezclas para un material compuesto de fibra continua y alineada (Ecuación 15). La matriz es aquella que engloba a la fibra. La fibra es la que aporta alguna propiedad a la matriz.

Ecuación 15

$$\sigma_{max,c} = \sigma_{max,f} \cdot V_f + \sigma_{max,m}^* \cdot V_m$$

$$\sigma_{max,m}^* = \sigma_{max,f} \cdot \frac{E_m}{E_f}$$

σ_{max} : Resistencia máxima [MPa]

c : Compuesto

f : Fibra

m : Matriz

V : Fracción volumétrica

E : Módulo de elasticidad [GPa]

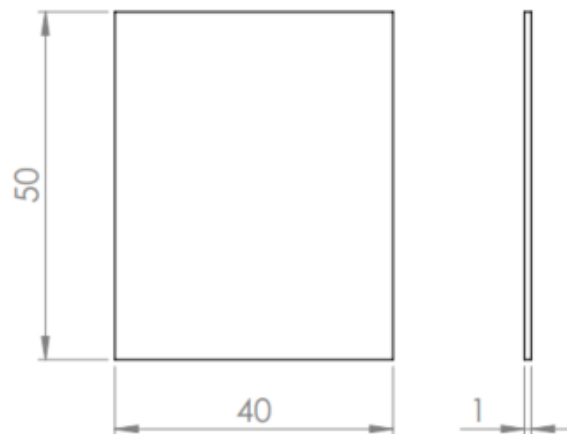
Evaluación de las propiedades eléctricas y electrónicas del sistema

Diseño y Fabricación de probetas

Diseño CAD. Para la evaluación del incremento de temperatura y el voltaje máximo de operación se procuró tener un conductor más largo, por ello se diseñó un sistema con un conductor de 373 mm de longitud (Figura 56 y Figura 57).

Figura 56

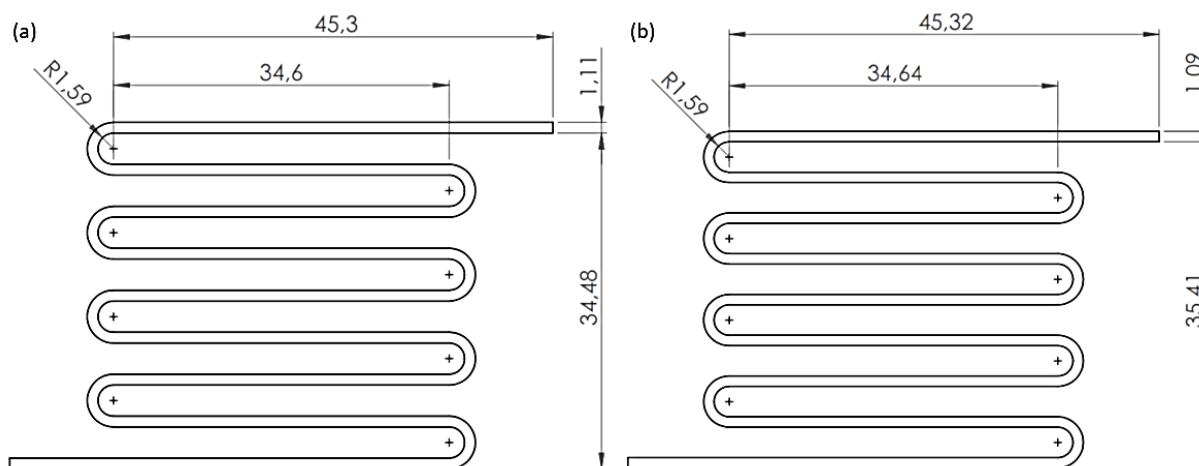
Dimensiones de la probeta del sistema electrónico flexible para evaluación de propiedades eléctricas y electrónicas



Nota. Medidas en milímetros

Figura 57

Dimensiones de las trazas conductoras del sistema. a) Traza para incremento de temperatura y voltaje máximo de operación de aluminio. b) Traza para incremento de temperatura y voltaje máximo de operación de cobre.



Nota. Medidas en milímetros

Materiales y equipos.

Tabla 24

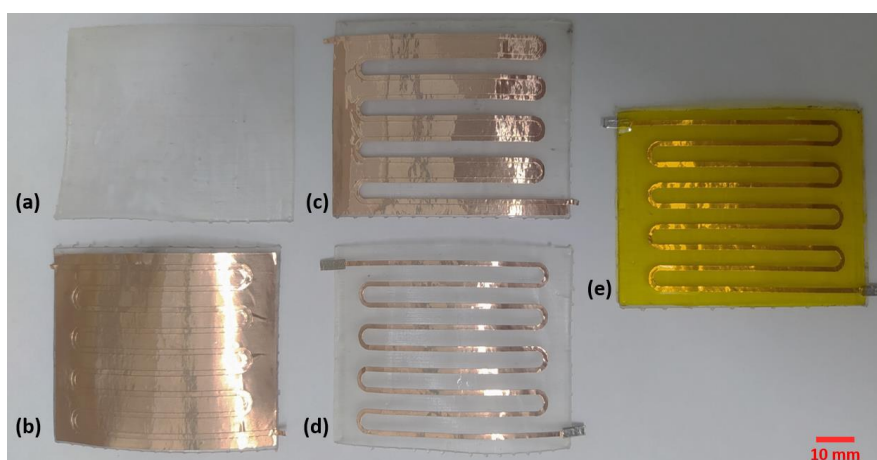
Materiales y equipos para evaluación de propiedades eléctricas y electrónicas

	Nombre	Fabricante	Hoja técnica
Materiales	Termistor NTC SCK 10 Series	TKS	Apéndice N
	Arduino Uno	Arduino	Apéndice L
Equipos	Fuente de alimentación DC GPC-3030D	Instek	Apéndice O
	Teostato de derivación	Terco	Apéndice P
	Multímetro	Truper	Apéndice Q
	Computador	Asus	-

Manufactura de las partes del sistema electrónico flexible y ensamble. El ensamble del sistema electrónico flexible se dio siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 49. La Figura 58, responde la secuencia del ensamble del sistema.

Figura 58

Ensamble del sistema electrónico flexible. a) Sustrato. b) Adhesión de la traza conductora en sustrato. c) Retiro de excedentes de traza conductora. d) Traza conductora colocada y prensado de terminales. e) Sistema ensamblado



Incremento de temperatura

Para evaluar el incremento de temperatura se manufacturaron 5 probetas de aluminio y 5 de cobre. Las probetas fueron ensayadas en el circuito presentado en la Figura 59, durante 8 minutos, cuenta con una fuente de alimentación DC Gw Lintek y de un teostato de derivación. La resistencia del teostato fue de 11.77Ω , generando un diferencial de potencial de $12.01 [V]$ y un amperaje de $1.02 [A]$. Las probetas ensayadas se ilustran en la Figura 60. La adquisición de datos se la realizó en una hoja de cálculo con un tiempo de muestreo de 500 (ms).

Figura 59

Sistema para evaluación del incremento de temperatura.

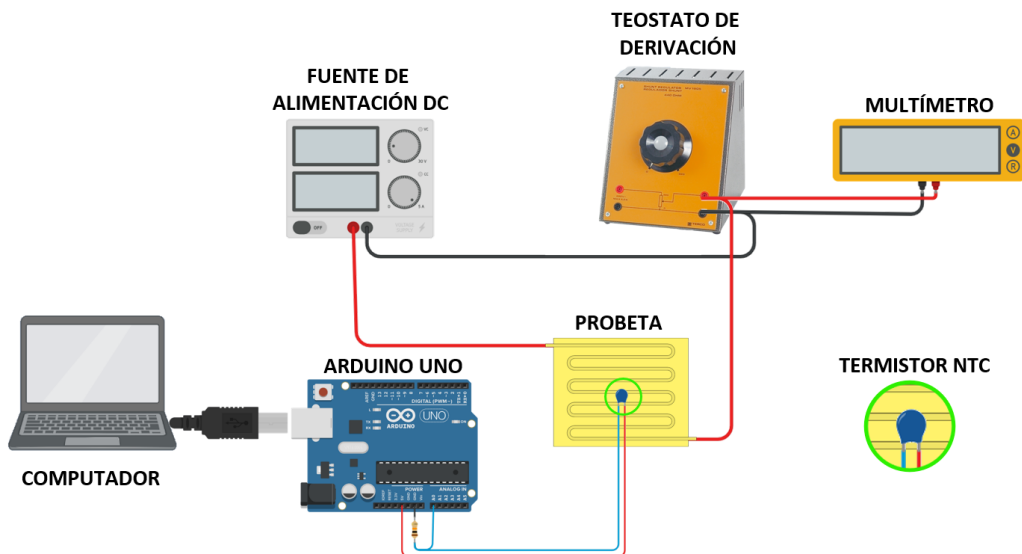
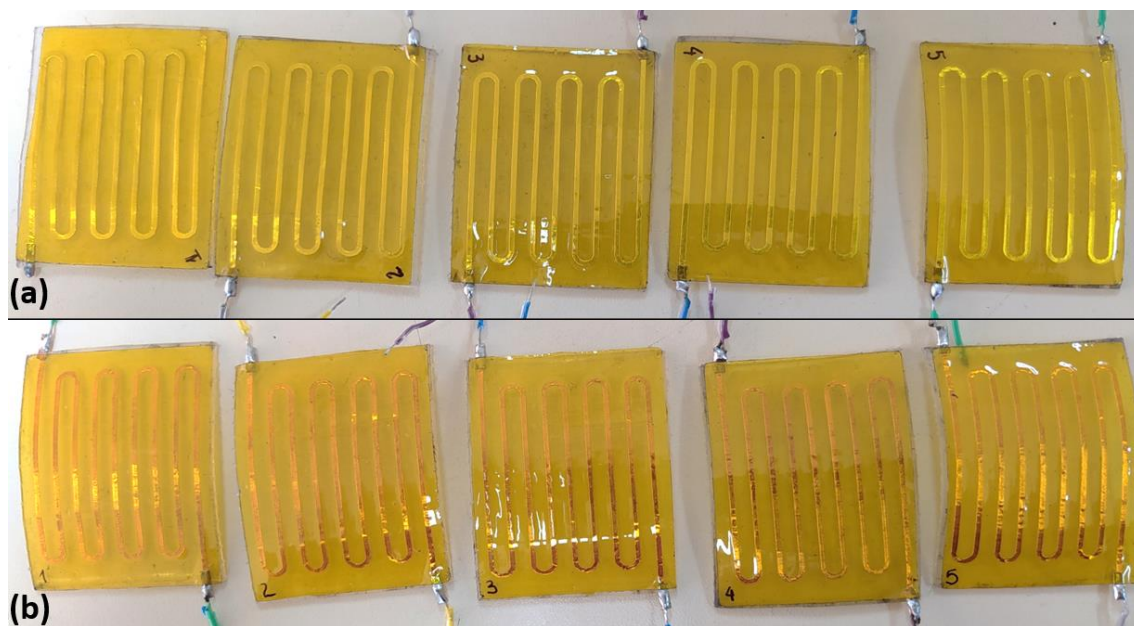


Figura 60

Probetas ensayadas para evaluación del incremento de temperatura. a) Aluminio. b) Cobre.



Voltaje máximo de operación

La evaluación del voltaje máximo de operación se dio a partir del circuito de la Figura 61, cuyo montaje se ve en la Figura 62. El voltaje en corriente continua máximo al que se

sometió el sistema durante 8 minutos y medio fue de 220 [V] y 1.05 [A] y se consiguió conectando en serie 4 fuentes de alimentación DC Gw Lintek. Debido al calentamiento que presentó el teostato de derivación se optó por realizar el ensayo con 3 probetas de aluminio y 3 de cobre. La adquisición de datos se la realizó en una hoja de cálculo con un tiempo de muestreo de 500 (ms).

Figura 61

Sistema para evaluación del voltaje máximo de operación

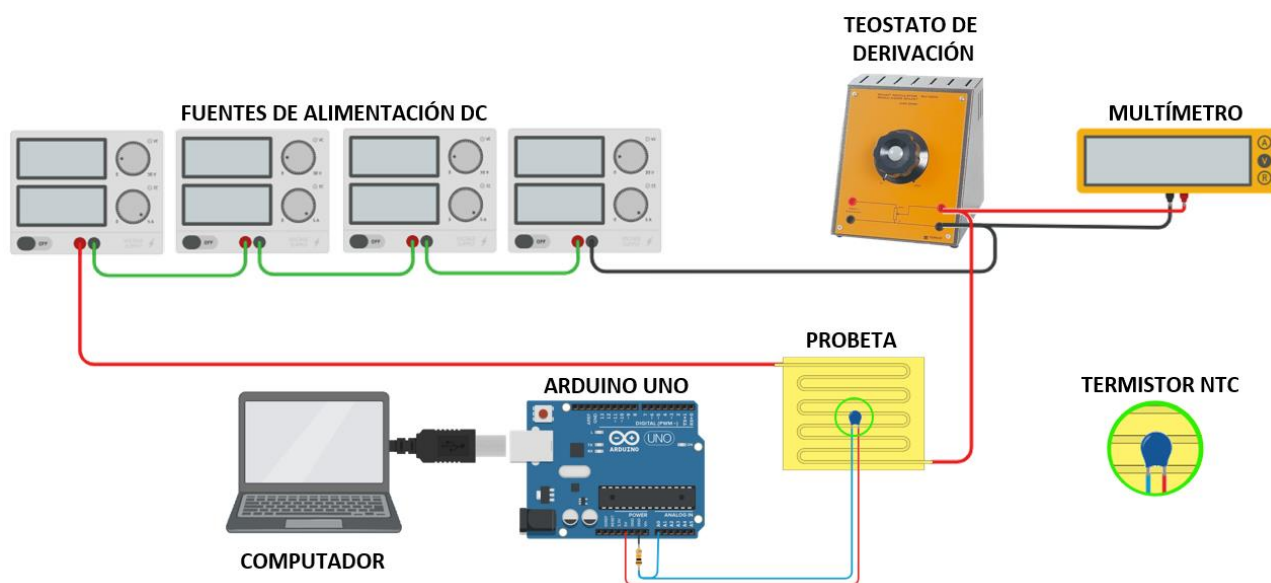
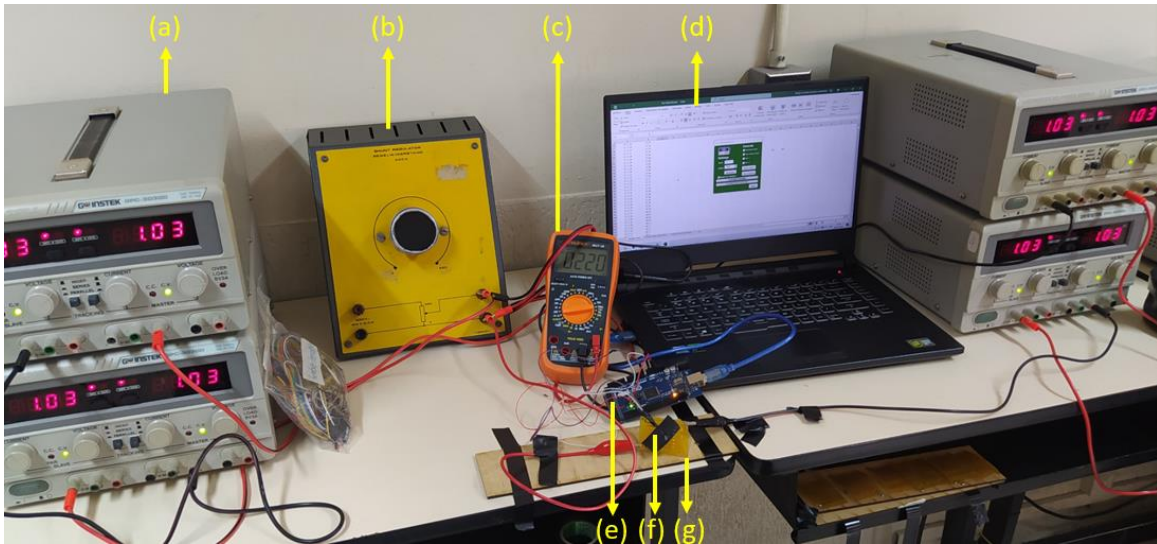


Figura 62

Sistema para evaluación de voltaje máximo operación. a) Fuente de alimentación DC. b) Teostato de derivación. c) Multímetro. d) Computadora. e) Arduino Mega. f) Termistor NTC. g) Probeta de cobre

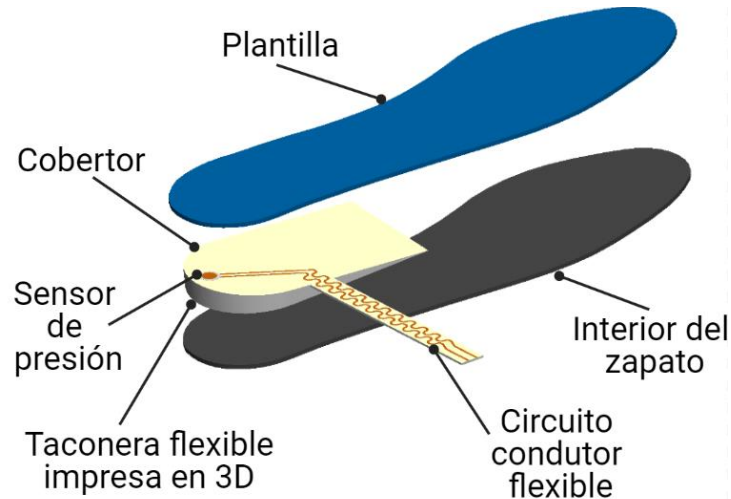


Implementación de un sistema electrónico flexible en una aplicación industrial

La importancia de las plantillas flexibles se resalta en el capítulo II. Dentro de este apartado, se realizó la implementación de un sistema electrónico flexible en una taconera de zapatos inteligente capaz de captar la fuerza que ejerce una persona en su marcha sobre un punto del talón y enviar los datos obtenidos a una hoja de cálculo mediante IoT. La taconera se colocó en el interior del zapato seguida de una plantilla convencional como se muestra en la Figura 63.

Figura 63

Implementación de sistema electrónico flexible en una taconera inteligente.

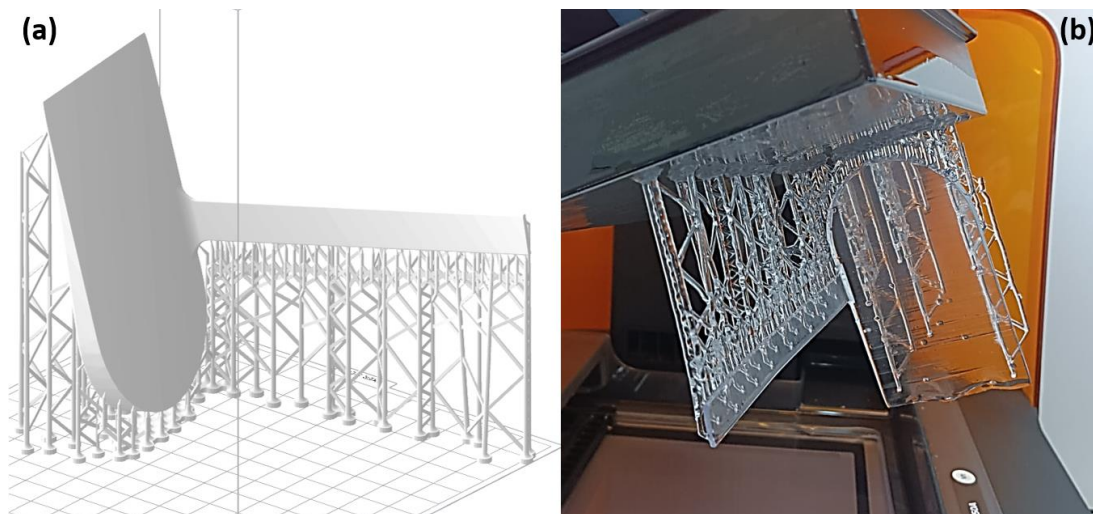


Sistema mecánico

El diseño de la taconera se lo hizo para un zapato talla 38 de horma femenina en el programa de diseño CAD Solidworks (Figura 64), para establecer una conexión entre el sensor y el microcontrolador, el circuito sale por el lado derecho del zapato hacia una caja de control (Figura 65). La caja de control contó con una tapa superior y una frontal para facilitar las conexiones y tuvo orificios para colocar 3 pedazos de velcro logrando una mejor adhesión al zapato y, por lo tanto, más estabilidad (Figura 66).

Figura 64

Diseño y Fabricación de la taconera. a) Ubicación de soportes en Preform. b) Impresión 3D.

**Figura 65**

Caja de control. a) Modelo CAD. b) Ubicación de soportes en Preform.

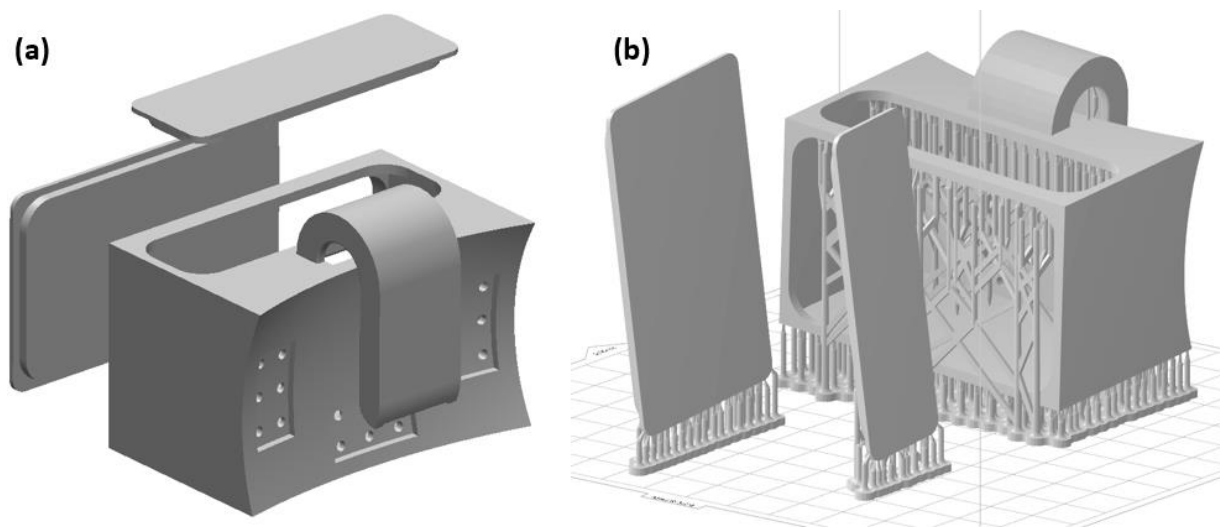
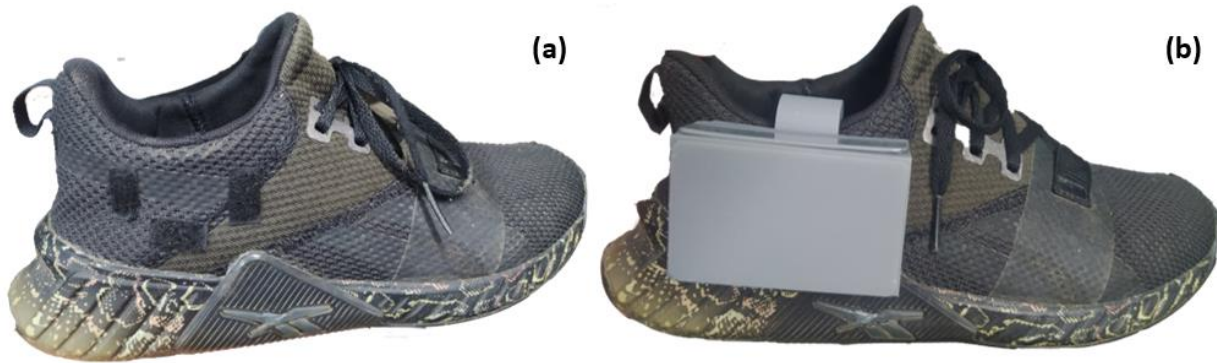


Figura 66

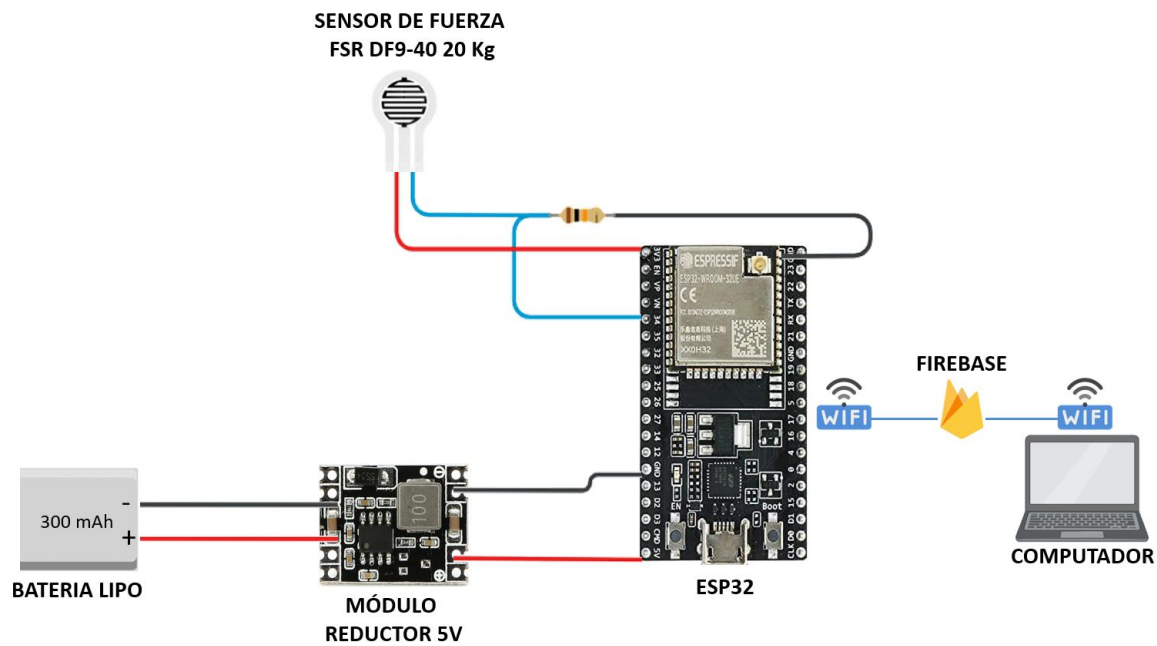
Adhesión de la caja de control al zapato. a) Zapatilla con velcro. b) Caja de control montada en la zapatilla

**Sistema eléctrico**

Para censar la fuerza que ejerce el usuario sobre un punto en su talón se utilizó un sensor de fuerza FSR DF9-40 de 20 Kg, el procesado de los datos y establecimiento de una conexión WIFI lo realizó el microcontrolador ESP32 (Tabla 25). El microcontrolador se alimentó con un rango de voltaje de 3 a 5 [V], por lo cual se conectó un módulo reductor de 5 [V] entre su entrada y la batería lipo de 7 V y 300 [mAh]. Los datos procesados por la ESP32 se enviaron a la base de datos de Firebase y se recolectaron en una hoja de cálculo para que sean visibles por usuario (Figura 67), el tiempo de muestreo usado es de 500 (ms). Las trazas del circuito conductor se diseñaron acorde a las dimensiones de la plantilla y el zapato (Figura 68).

Figura 67

Esquema de conexión – Taconera inteligente

**Figura 68**

Trazas conductora.

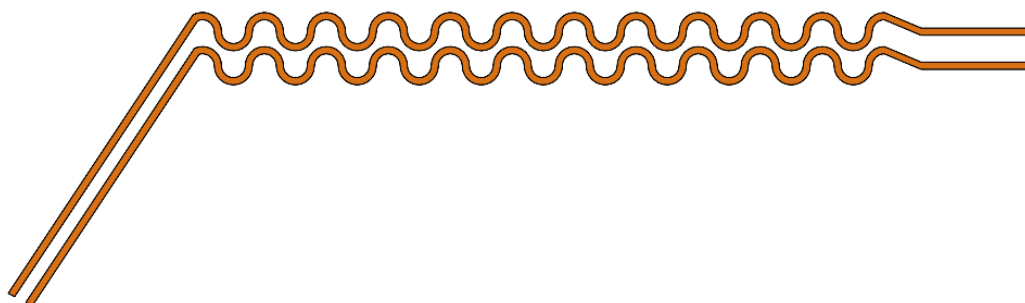


Tabla 25

Materiales y equipos para la implementación de taconera inteligente

	Nombre	Fabricante	Hoja técnica
Materiales	Módulo reductor 5V	Aideepen	Apéndice R
	ESP32	HiLetgo	Apéndice S
	Sensor FSR DF9-40 20 kg	FTVOGUE	Apéndice T
	Batería Lipo 300mA 7.4V	Rhino	-
Equipos	Computador	ASUS	-

Ensamble del prototipo

El prototipo ensamblado se muestra en la Figura 69.

Figura 69

Prototipo ensamblado. a) Vista lateral. b) Vista superior.



Capítulo IV

Análisis y discusión de resultados

Resultado de desarrollo de una plataforma de diseño para estructura flexibles

Los resultados del desarrollo de la plataforma de diseño de estructuras flexibles se describen en la Tabla 26.

Tabla 26

Plataforma de diseño

Apéndice	Descripción
U	Sustrato: Rectangular Traza: Lineal
V	Sustrato: Rectangular Traza: Curva
W	Sustrato: Ovalado Traza: Lineal
X	Sustrato: Ovalado Traza: Curva
Y	Sustrato: Pentagonal Traza: Lineal
Z	Sustrato: Pentagonal Traza: Curva
AA	Sustrato: Hexagonal Traza: Lineal
AB	Sustrato: Hexagonal Traza: Curva

Resultados de caracterización del sistema

Sustrato

Ensayo de tracción. Para el ensayo de tracción se reportaron los resultados de la resistencia última a la tracción y el porcentaje de alargamiento a la rotura.

Resistencia última a la tracción. En la Tabla 27 se muestran los resultados del análisis de varianza para la resistencia última a la tracción según las diferentes orientaciones de impresión.

Tabla 27

Análisis de varianza para resistencia última a la tracción según diferentes orientaciones de impresión

Fuentes	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Orientación	2	0.2864	0.14318	2.12	0.163
Error	12	0.8104	0.06754		
Total	14	1.0968			

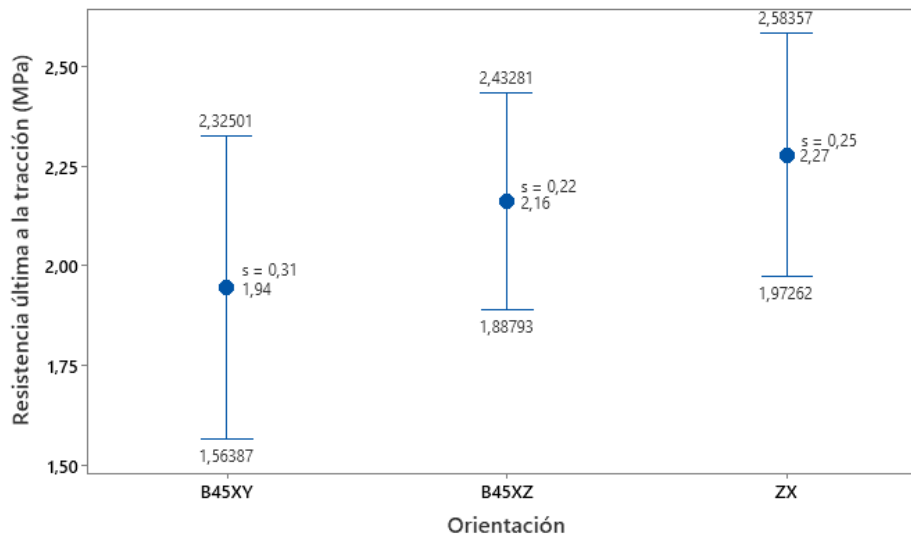
En base a la hipótesis de análisis ANOVA de la Figura 24, como:

$$p (0.163) > \alpha (0.05)$$

Se acepta H_0 , todas las medias son iguales. No existe diferencia significativa de la resistencia última a la tracción entre las diferentes orientaciones de impresión. Sin embargo, se evidencia en la Figura 70 que el mayor valor medio de resistencia última a la tracción 2.27 (MPa) se lo obtuvo con la orientación ZX. Pese a que no existe diferencia significativa entre las medias se observa que la desviación estándar de la orientación B45XY es mayor que la de la orientación de B45XZ y ZX.

Figura 70

Gráfica de intervalos de Resistencia última a la tracción vs Orientación



Porcentaje de alargamiento a la rotura. La Tabla 28 refleja el análisis de la varianza para el porcentaje de alargamiento a la rotura, según la Figura 71, como:

$$p (0.305) > \alpha (0,05)$$

Se acepta H_0 , por tanto, todas las medias son iguales. No existe diferencia significativa de porcentaje de alargamiento a la rotura entre las diferentes orientaciones de impresión. La Figura 71 muestra que, pese a no existir una diferencia significativa, la orientación ZX generará un mayor porcentaje de alargamiento 112.31 (%), además, los resultados de la orientación B45XY son considerablemente más dispersos que en la orientación B45XZ y ZX, la desviación estándar es de 14.68 (%) en comparación a 6.71 (%) y 8 (%) respectivamente.

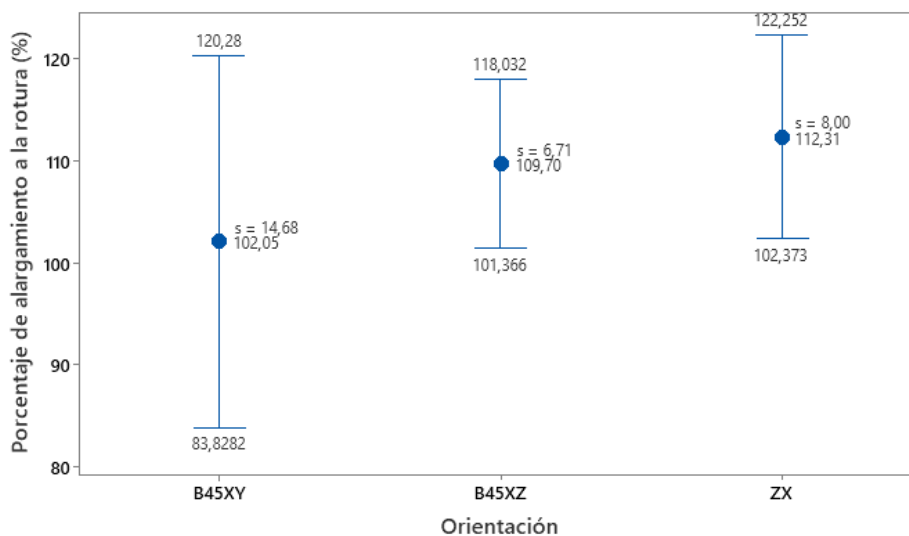
Tabla 28

Análisis de varianza para porcentaje de alargamiento a la rotura según diferentes orientaciones de impresión

Fuentes	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Orientación	2	284.1	142.1	1.31	0.305
Error	12	1298.3	108.2		
Total	14	1582.5			

Figura 71

Gráfica de intervalos de Porcentaje de alargamiento a la rotura vs Orientación



Ensayos de torsión. Para el ensayo de torsión se reportaron los resultados de la resistencia al corte y la deformación por cortante.

Resistencia al corte. El valor de p de la Tabla 29 es de 0.144, entonces como:

$$p(0.144) > \alpha(0.05)$$

Se acepta H_0 indicando que todas las medias son iguales, es decir, no existe diferencia significativa de la resistencia al corte entre los diferentes niveles de orientación. Se registró un

valor de 2.80 (MPa) de resistencia al corte en la orientación ZX, que, pese a no ser significativo, es superior al que se generó en la orientación B45XY y B45XZ, además, esta orientación tuvo una desviación estándar muy pequeña en comparación a la orientación B45XY, con una diferencia de 0.26 (MPa), véase la Figura 72.

Figura 72

Gráfica de intervalos de Resistencia al corte vs Orientación

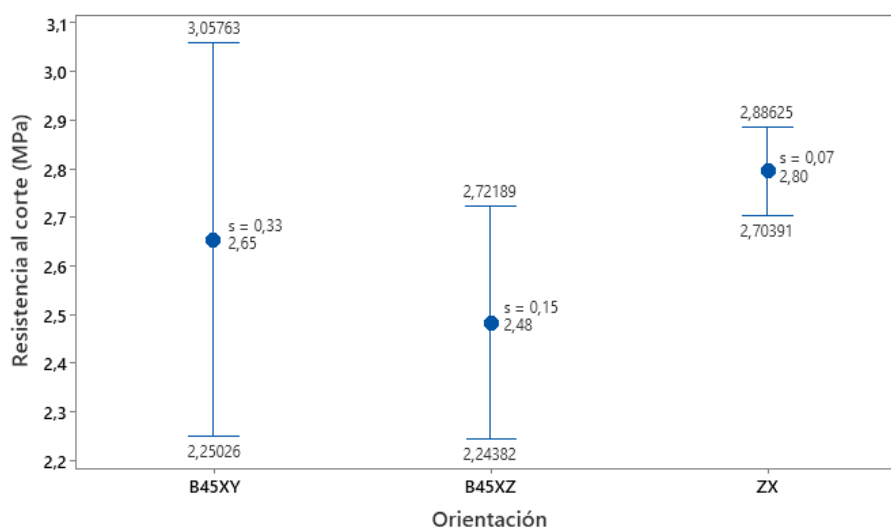


Tabla 29

Análisis de varianza para resistencia al corte según diferentes niveles de orientación

Fuentes	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Orientación	2	0.2167	0.10833	2.33	0.144
Error	11	0.5121	0.04655		
Total	13	0.7287			

Deformación por cortante. Al analizar la varianza de la deformación por cortante en los diferentes niveles de orientación (Tabla 30), se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alterna H_1 , pues el valor de p es menor al nivel de significancia:

$$p(0.014) < \alpha(0.05)$$

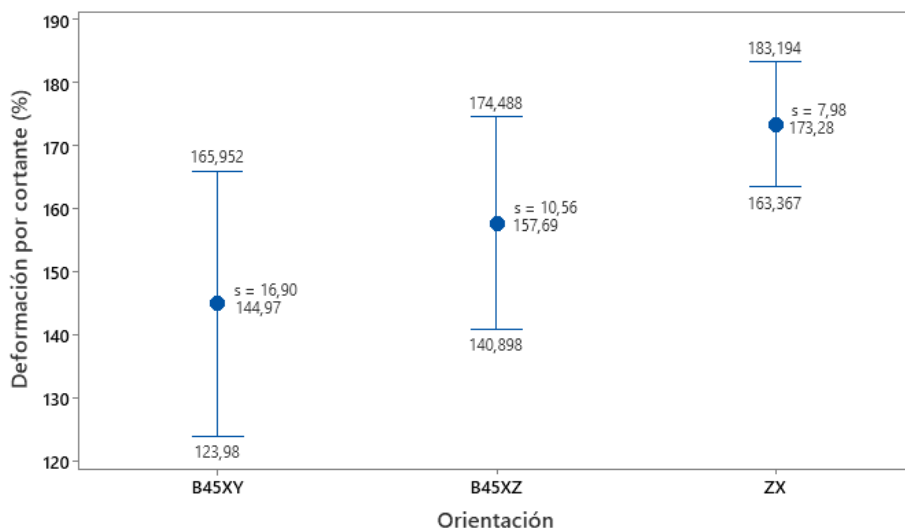
Tabla 30

Análisis de varianza para deformación por cortante según diferentes niveles de orientación

Fuentes	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Orientación	2	2010	1005.1	6.38	0.014
Error	11	1732	157.4		
Total	13	3742			

Figura 73

Gráfica de intervalos de Deformación por cortante vs Orientación



La hipótesis alterna indica que no todas las medias son iguales, es decir, existe diferencia significativa de la deformación por cortante entre los diferentes niveles de orientación. El mayor valor reportado de deformación por cortante es 173.28 (%) y corresponde a la orientación ZX. Además, cabe recalcar que en esta configuración la desviación estándar es la menor reportada (Figura 73).

Caracterización. La orientación ZX al ser la que generó una maximización de las propiedades mecánicas, se la considera para la caracterización de la resina elástica 50A de Formlabs (Hoja técnica, Apéndice A), véase la Tabla 31, además, en esta orientación la

ubicación de soportes es más sencilla, y utiliza menos resina. La Figura 74 muestra un comportamiento oscilatorio en el ensayo de torsión.

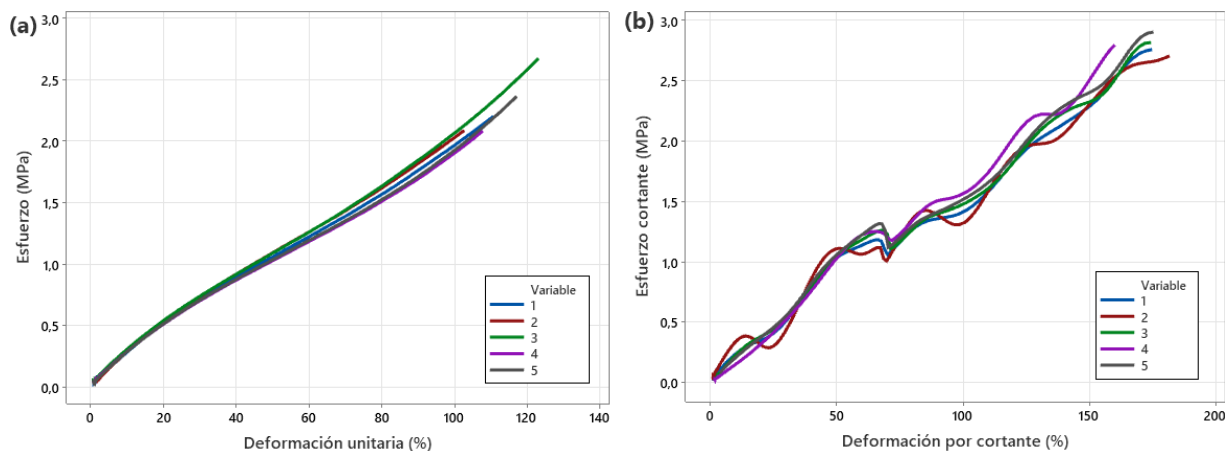
Tabla 31

Caracterización resina elástica 50A

Ensayo	Propiedad	Valor
Tracción	Resistencia última a la tracción [MPa]	2.27 ± 0.25
	Porcentaje de alargamiento a la rotura [%]	112.31 ± 8.00
Torsión	Resistencia al corte [MPa]	2.80 ± 0.07
	Deformación por cortante [%]	173.28 ± 7.93

Figura 74

Resina Elástica 50A Formlabs. a) Esfuerzo vs Deformación unitaria. b) Esfuerzo cortante vs Deformación por cortante.



Cinta de aluminio comercial

Espectroscopía de rayos X por dispersión de energía. Las regiones de interés se muestran en la Figura 75 y los resultados obtenidos en la Tabla 32. En la región de interés 12 se observa que el material tiene un alto grado de pureza, mientras que, en la región 11 se reporta la presencia de oxígeno, hierro y silicio.

Figura 75

Regiones de interés – Cinta de aluminio

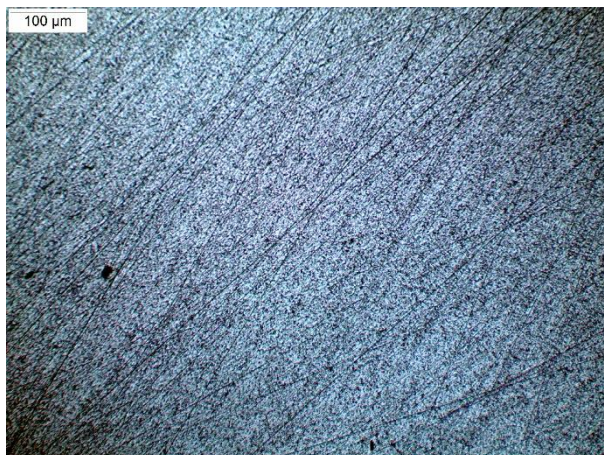


Tabla 32

Composición química – Cinta de aluminio

Elemento	Porcentaje (%)	
	Espectro 11	Espectro 12
Aluminio	92.9	99.1
Oxígeno	4.4	-
Silicio	1.3	-
Hierro	1.4	0.9

Análisis microestructural. Las imágenes obtenidas se reportan en la Figura 76. En la micrografía se observa la presencia de partículas insolubles $FeAl_3$ y $AlSi$ (áreas oscuras) distribuidas en la matriz de aluminio.

Figura 76*Microestructura cinta de aluminio*

Ensayos mecánicos. La caracterización mecánica de la cinta de aluminio comercial se refleja en la Tabla 33 y sus curvas se observan en la Figura 77. Tanto para torsión como para tracción, las probetas cumplen la misma línea de tendencia.

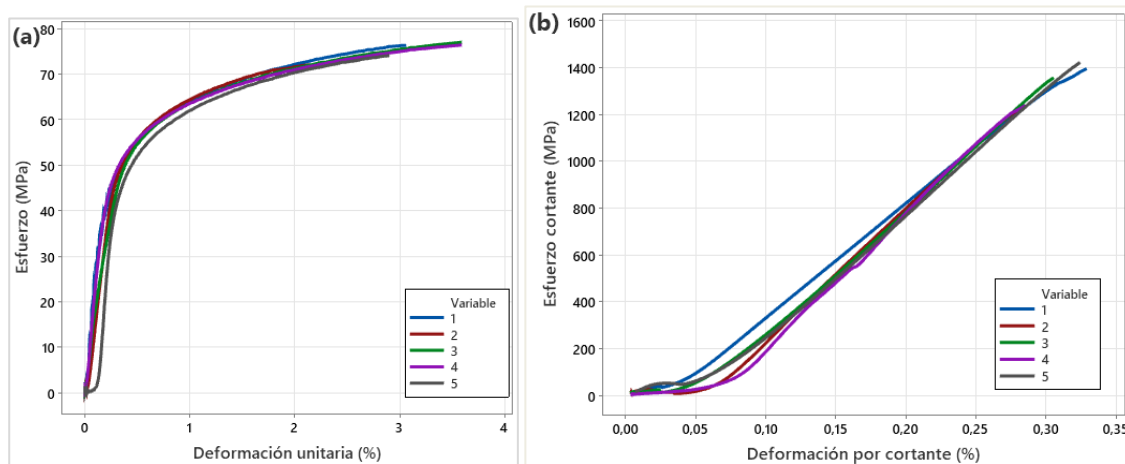
Tabla 33*Caracterización cinta de aluminio comercial*

Ensayo	Propiedad	Valor
Tracción	Resistencia última a la tracción [MPa]	75.08 ± 2.04
	Porcentaje de alargamiento a la rotura [%]	3.07 ± 0.56
Torsión	Resistencia al corte [GPa]	$1.33 \pm 0.86^*$
	Deformación por cortante [%]	0.31 ± 0.02

Nota. * Valor referencial, véase discusión (Cinta de Cobre/Aluminio/Poliimida)

Figura 77

Cinta de aluminio comercial. a) Esfuerzo vs Deformación unitaria. b) Esfuerzo cortante vs Deformación por cortante.



Cinta de cobre comercial

Espectroscopía de rayos X por dispersión de energía. Las regiones de interés se muestran en la Figura 78, y se reportan en la Tabla 34. En la región de interés 3 se observa que el material tiene un alto grado de pureza, mientras que, en la región 4 se reporta la presencia de oxígeno.

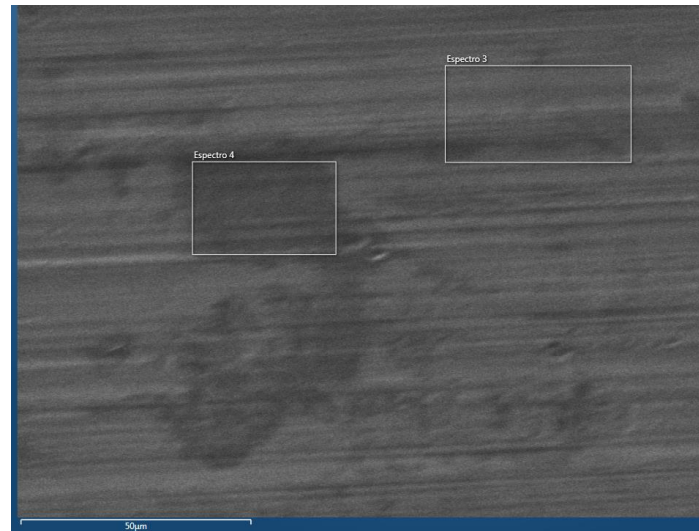
Tabla 34

Composición química – Cinta de cobre

Elemento	Porcentaje (%)	
	Espectro 3	Espectro 4
Cobre	100	94.1
Oxígeno	-	5.9

Figura 78

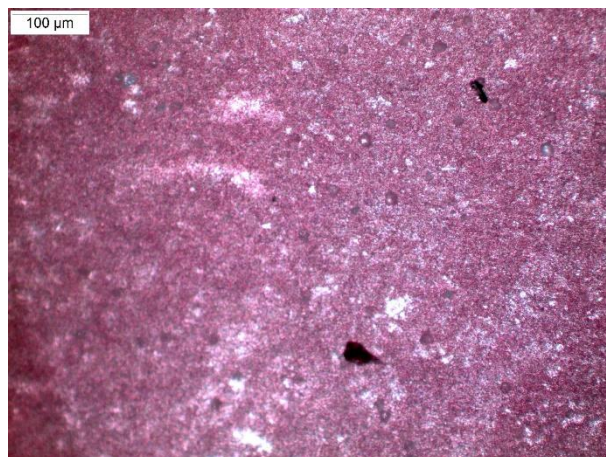
Regiones de interés – Cinta de cobre



Análisis microestructural. Las imágenes obtenidas se reportan en la Figura 79. En la micrografía se observa la presencia de porosidades (áreas oscuras) y la presencia de fase eutéctica (áreas claras) dentro de la matriz de cobre.

Figura 79

Microestructura cinta de cobre.



Ensayos mecánicos. La caracterización mecánica de la cinta de cobre comercial se presenta en la Tabla 35. Las curvas obtenidas se muestran en la Figura 80, donde se observa que la probeta 4 del ensayo de tracción no sigue el patrón del resto de probetas, al igual que la probeta 1 del ensayo de torsión.

Tabla 35

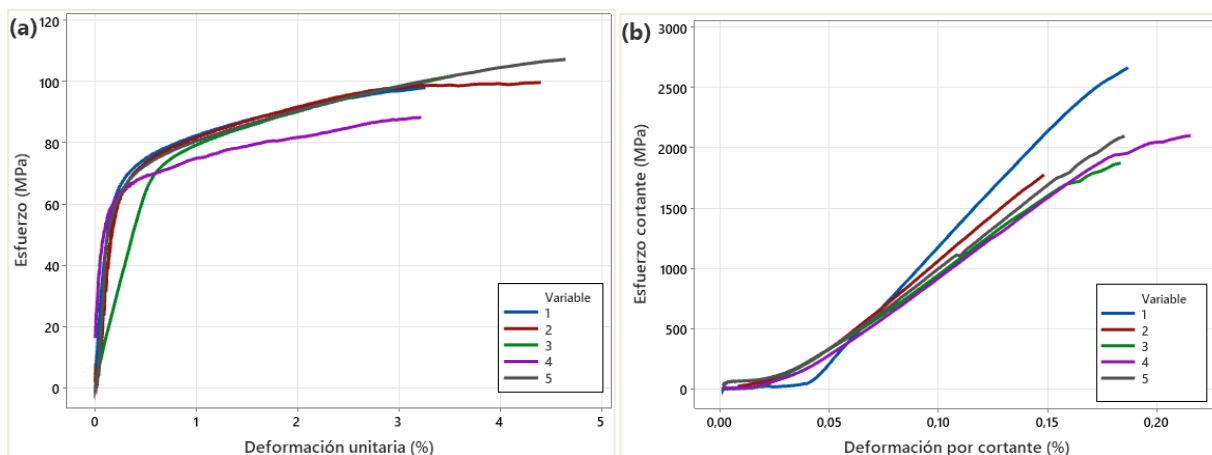
Caracterización cinta de cobre comercial

Ensayo	Propiedad	Valor
Tracción	Resistencia última a la tracción [MPa]	101.48 ± 4.03
	Porcentaje de alargamiento a la rotura [%]	4.03 ± 0.62
Torsión	Resistencia al corte [GPa]	$2.10 \pm 0.34^*$
	Deformación por cortante [%]	0.18 ± 0.02

Nota. * Valor referencial, véase discusión (Cinta de Cobre/Aluminio/Poliimida)

Figura 80

Cinta de cobre comercial. a) Esfuerzo vs Deformación unitaria. b) Esfuerzo cortante vs Deformación por cortante.



Cinta de Poliimida

La poliimida fue caracterizada a partir de la Figura 81 y su resumen se registra en la Tabla 36. En el ensayo de torsión todas las probetas siguen la misma tendencia, y en el ensayo de torsión la probeta 2 tiene una desviación.

Tabla 36

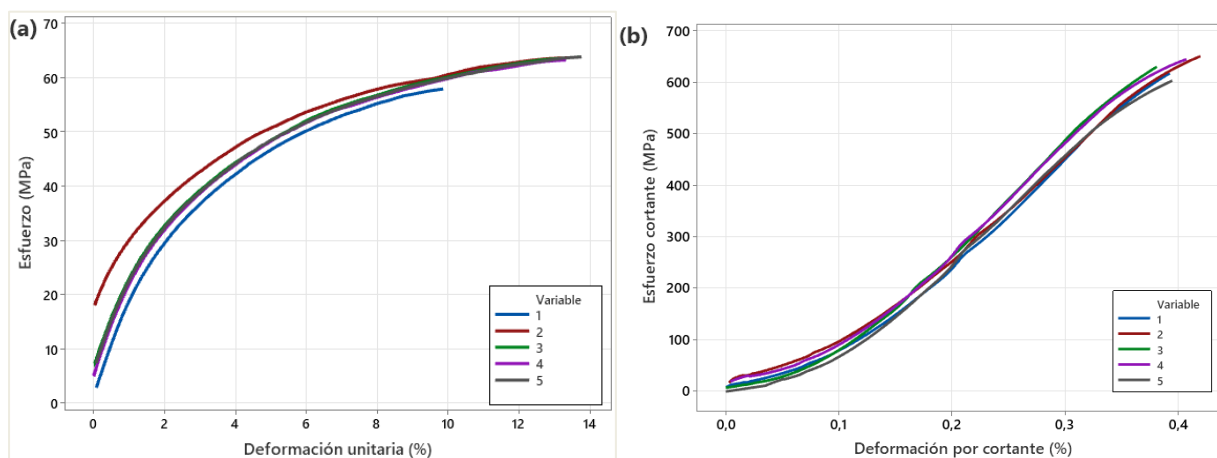
Caracterización cinta de poliimida

Ensayo	Propiedad	Valor
Tracción	Resistencia última a la tracción [MPa]	62.38 ± 2.57
	Porcentaje de alargamiento a la rotura [%]	12.81 ± 1.65
Torsión	Resistencia al corte [MPa]	$618.03 \pm 19.04^*$
	Deformación por cortante [%]	0.40 ± 0.01

Nota. * Valor referencial, véase discusión (Cinta de Cobre/Aluminio/Poliimida)

Figura 81

Cinta de poliimida. a) Esfuerzo vs Deformación unitaria. b) Esfuerzo cortante vs Deformación por cortante.



Resultados de la evaluación de las propiedades mecánicas asociadas al doblado y estiramiento

Ensayo de tracción

Figura 82

Esfuerzo vs Deformación unitaria. Primer fallo eléctrico del sistema. a) Cobre Curvo. b) Cobre Lineal. c) Aluminio Curvo. d) Aluminio Lineal

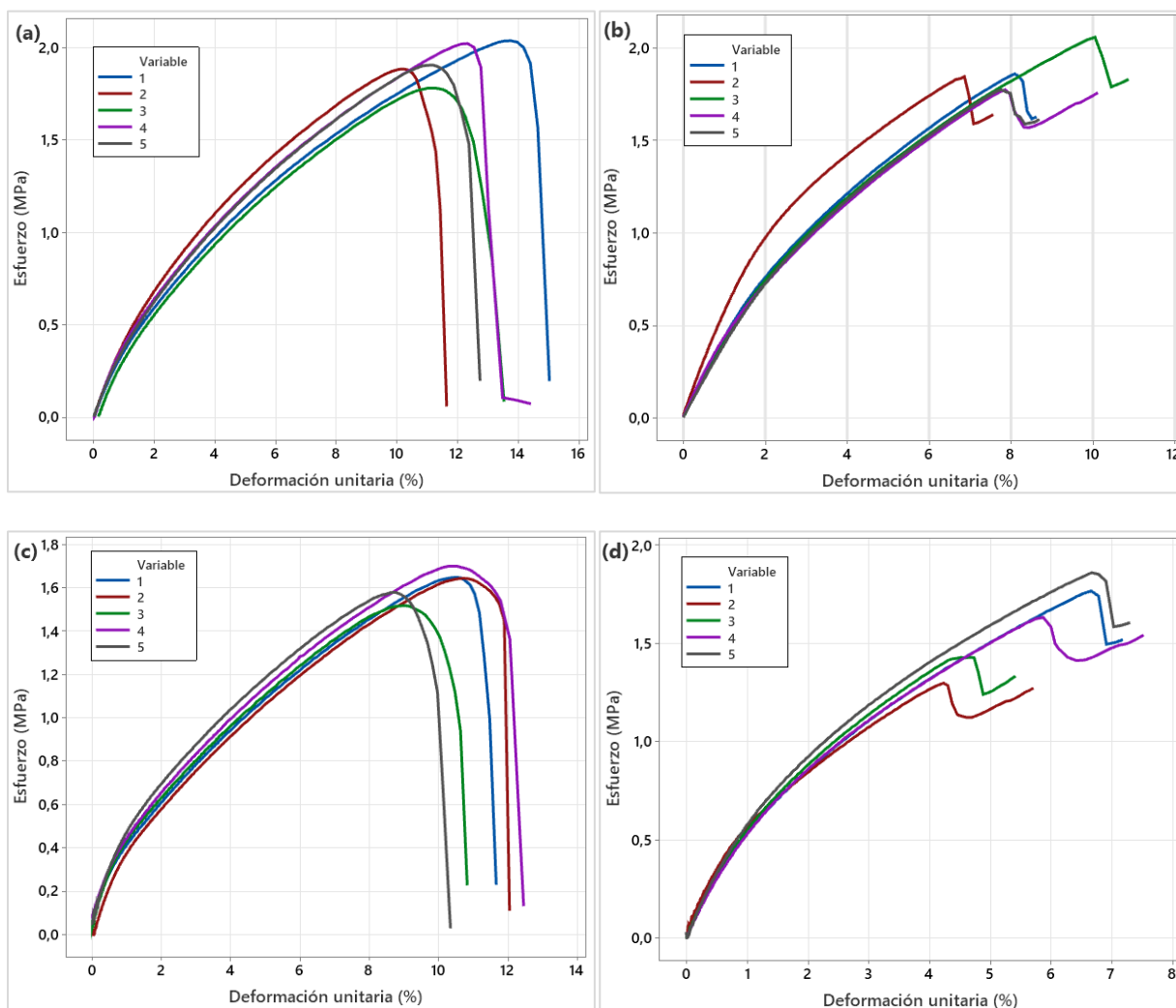
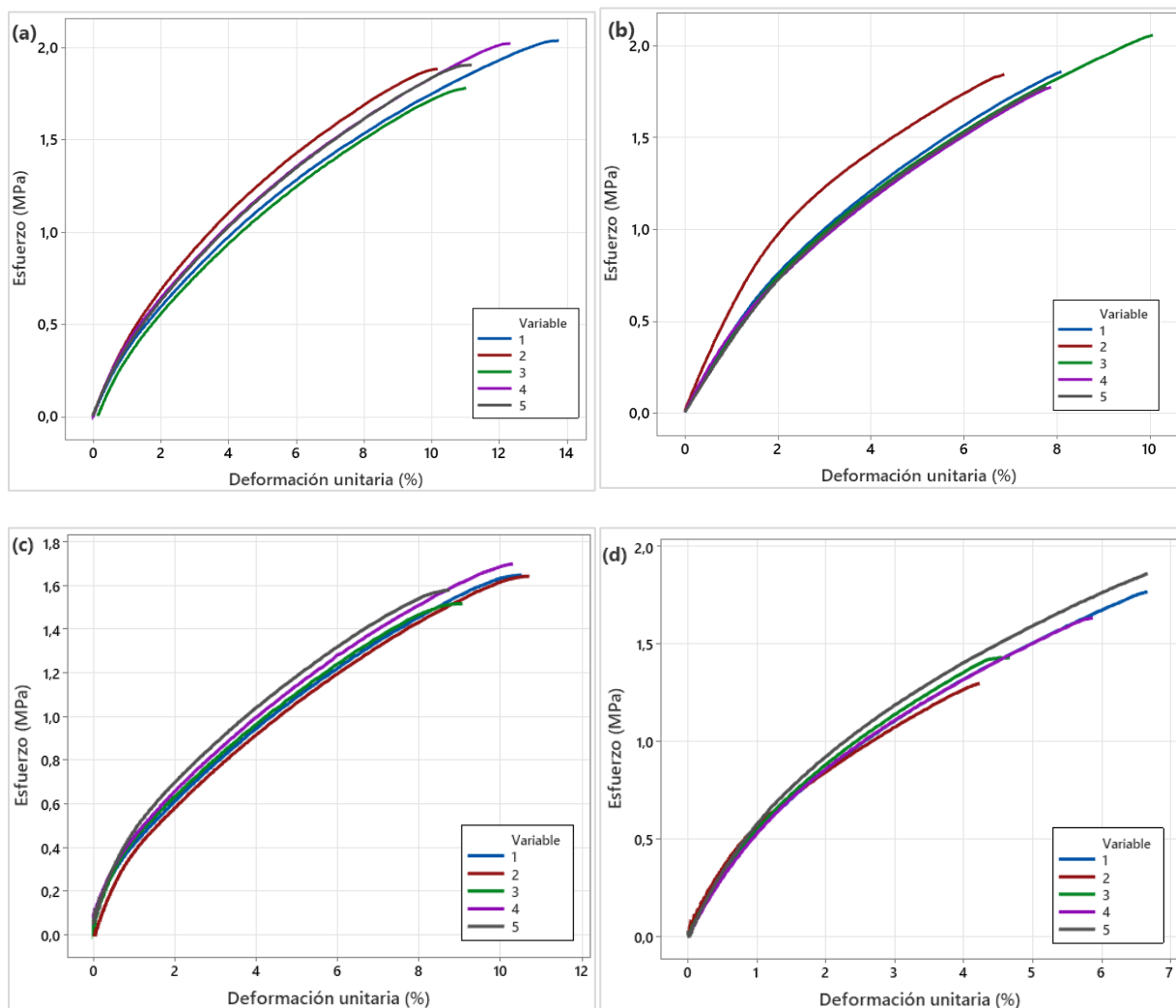


Figura 83

Esfuerzo vs Deformación unitaria. Primer fallo mecánico del sistema. a) Cobre Curvo. b) Cobre Lineal. c) Aluminio Curvo. d) Aluminio Lineal



Al llevar a cabo los ensayos de tracción se evidenciaron dos fallos principales, el primer fallo mecánico del sistema (Figura 83) y el primer fallo eléctrico (Figura 82), el fallo mecánico se da por la rotura de uno de los componentes de la probeta, y el eléctrico se evidencia a causa de la interrupción en la continuidad. El sistema falla primero de forma mecánica, entonces, para el análisis del diseño de experimentos se procesaron los datos correspondientes a este caso de

fallo. La Figura 82 reporta que el sistema sigue conduciendo posterior a presentar el primer fallo mecánico, las probetas curvas son las que más se tardan en sufrir un fallo eléctrico. En la Figura 83 se observa la mismas pendiente y el mismo patrón en las diferentes probetas, a excepción de la probeta 2 de sistema lineal de cobre, pues, presenta un desfase inicial.

Resistencia última a la tracción. La Tabla 37 presenta el análisis de varianza de la regresión factorial de resistencia última a la tracción vs patrón geométrico, se observa que el término lineal Patrón Geométrico no es significativo porque su valor p (0.537) es menor al nivel de significancia (0.05), en cambio el término lineal Material al tener un valor de (0) si es significativo. La interacción Patrón geométrico *Material no es significativa ($p = 0.747$). La significancia del Material se corrobora según el diagrama de Pareto de la Figura 84..

Tabla 37

Análisis de varianza – Resistencia última a la tracción

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	0.419769	0.139923	6.67	0.004
Lineal	2	0.417518	0.208759	9.96	0.002
Patrón geométrico	1	0.008335	0.008335	0.4	0.537
Material	1	0.409183	0.409183	19.52	0
Interacciones de 2 términos	1	0.002251	0.002251	0.11	0.747
Patrón geométrico *Material	1	0.002251	0.002251	0.11	0.747
Error	16	0.33541	0.020963		
Total	19	0.755179			

Figura 84

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Resistencia última a la tracción

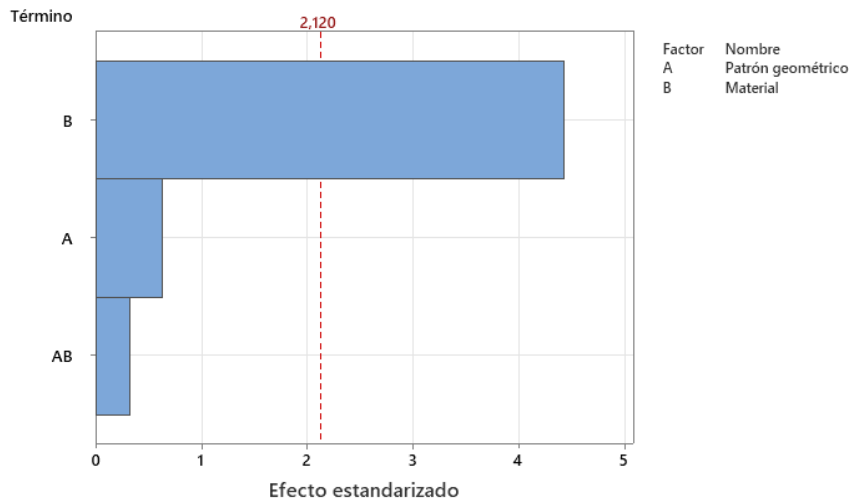
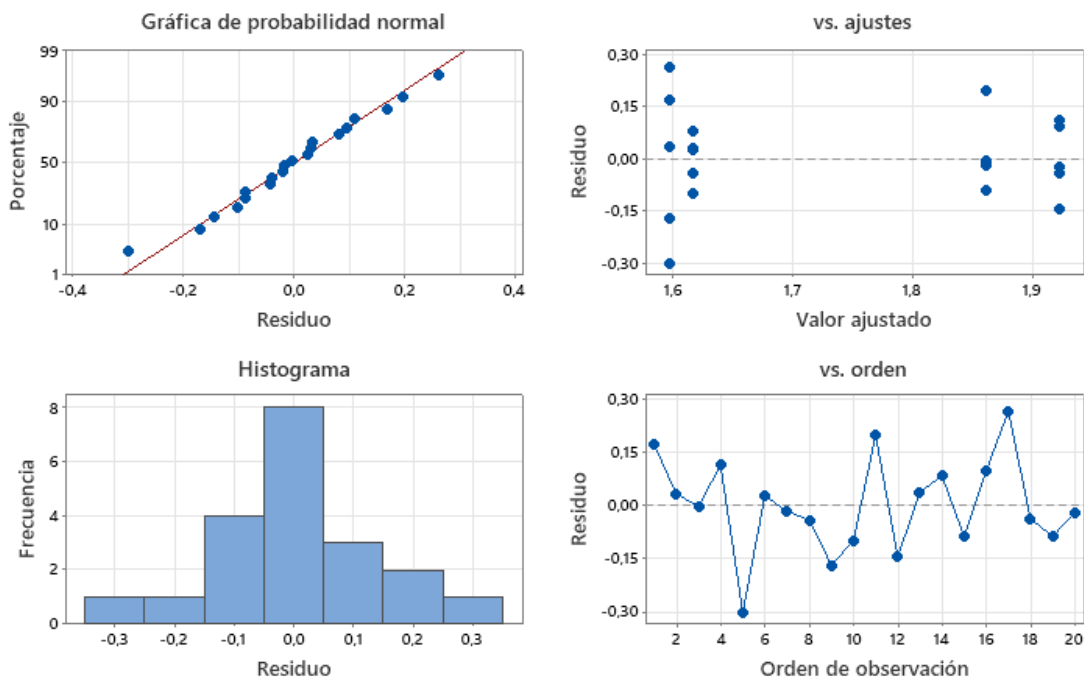


Figura 85

Gráficas de residuos - Resistencia última a la tracción



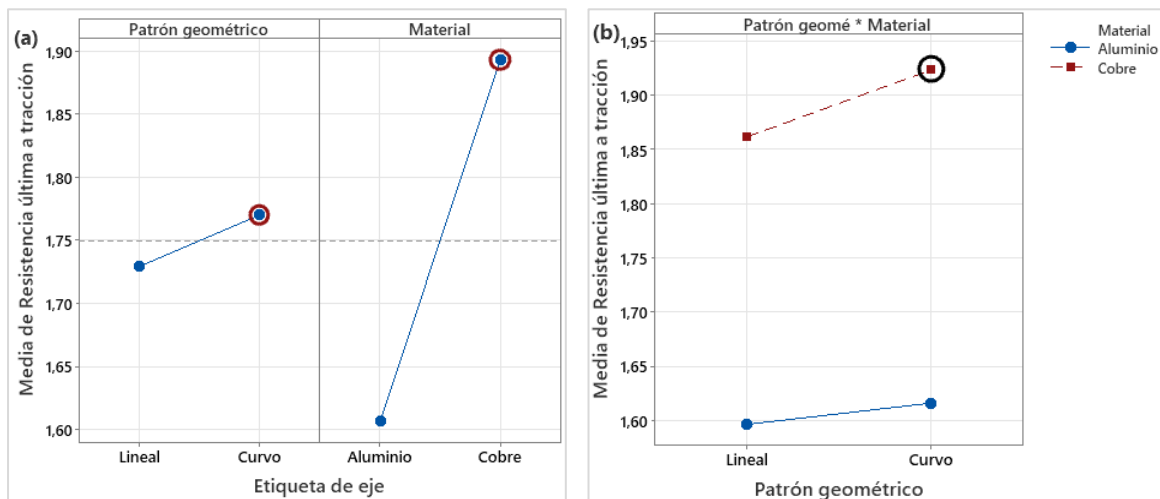
En base a la Figura 85, la gráfica de probabilidad normal muestra una distribución normal de los residuos, pues, sigue una línea recta. En la gráfica de residuos vs ajuste los

datos parecen tener una distribución aleatoria alrededor de cero, indicando que la varianza es constante y que no existen valores atípicos. La gráfica de residuos vs orden evidencia que no hay tendencias a formar patrones, por lo tanto, los residuos si son independientes. El histograma tiene una distribución normal, en consecuencia, no se evidencian valores atípicos.

La gráfica de efectos principales de la Figura 86 reporta un amplio rango en el eje Y para el material, demostrando nuevamente su significancia sobre la resistencia última a la tracción. El patrón geométrico no es significativo, pese a ello se determinó que el material cobre (significativo), para maximizar la resistencia última a la tracción debe tener un patrón geométrico curvo (no significativo).

Figura 86

Resistencia última a la tracción. a) Gráfica de efectos principales. b) Gráfica de interacción.



Porcentaje de alargamiento a la rotura. Los términos lineales Patrón geométrico y Material son significativos, según la Tabla 38 ambos tienen un valor p igual a cero, pues, son menores al nivel de significancia $\alpha = 0.05$. La interacción Patrón geométrico*Material, no es significativa, p tiene un valor de 0.392. La Figura 87 del diagrama de Pareto, muestra que

efectivamente los dos términos lineales son significativos sobre el porcentaje de alargamiento de la rotura.

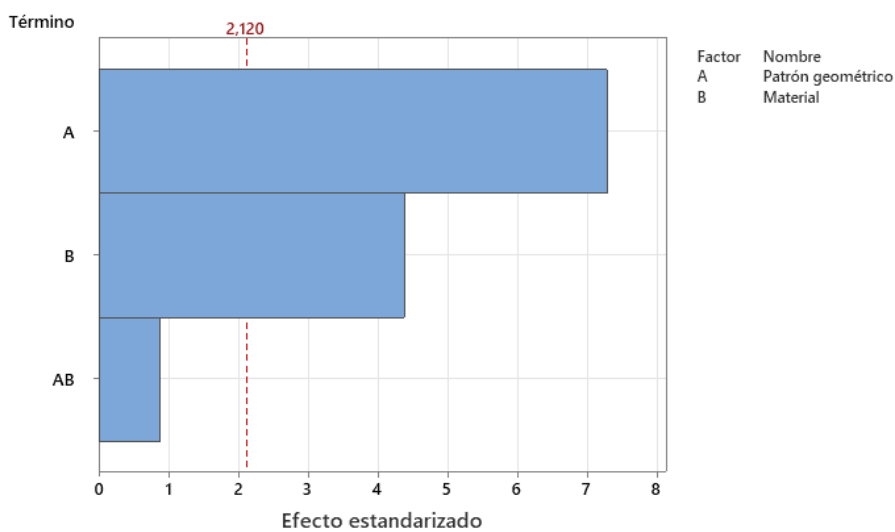
Tabla 38

Análisis de varianza – Porcentaje de alargamiento a la rotura

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	98.885	32.962	24.32	0
Lineal	2	97.835	48.918	36.09	0
Patrón geométrico	1	71.821	71.821	52.99	0
Material	1	26.014	26.014	19.19	0
Interacciones de 2 términos	1	1.05	1.05	0.77	0.392
Patrón geométrico *Material	1	1.05	1.05	0.77	0.392
Error	16	21.687	1.355		
Total	19	120.572			

Figura 87

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Porcentaje de alargamiento a la rotura



En la gráfica de residuos no se evidencia ninguna anomalía, según la Figura 88 la gráfica de probabilidad normal reporta que los puntos siguen la línea de tendencia, la gráfica

residuos vs ajuste muestra aleatoriedad, la gráfica residuos vs orden no refleja ningún patrón ni tendencia, y el histograma presenta una distribución normal.

La gráfica de efectos principales de la Figura 89 demuestra la significancia del patrón geométrico y el material, y la gráfica de interacción reporta que el porcentaje de alargamiento a la rotura se maximiza con el material cobre y un patrón geométrico curvo.

Figura 88

Gráficas de residuos - Porcentaje de alargamiento a la rotura

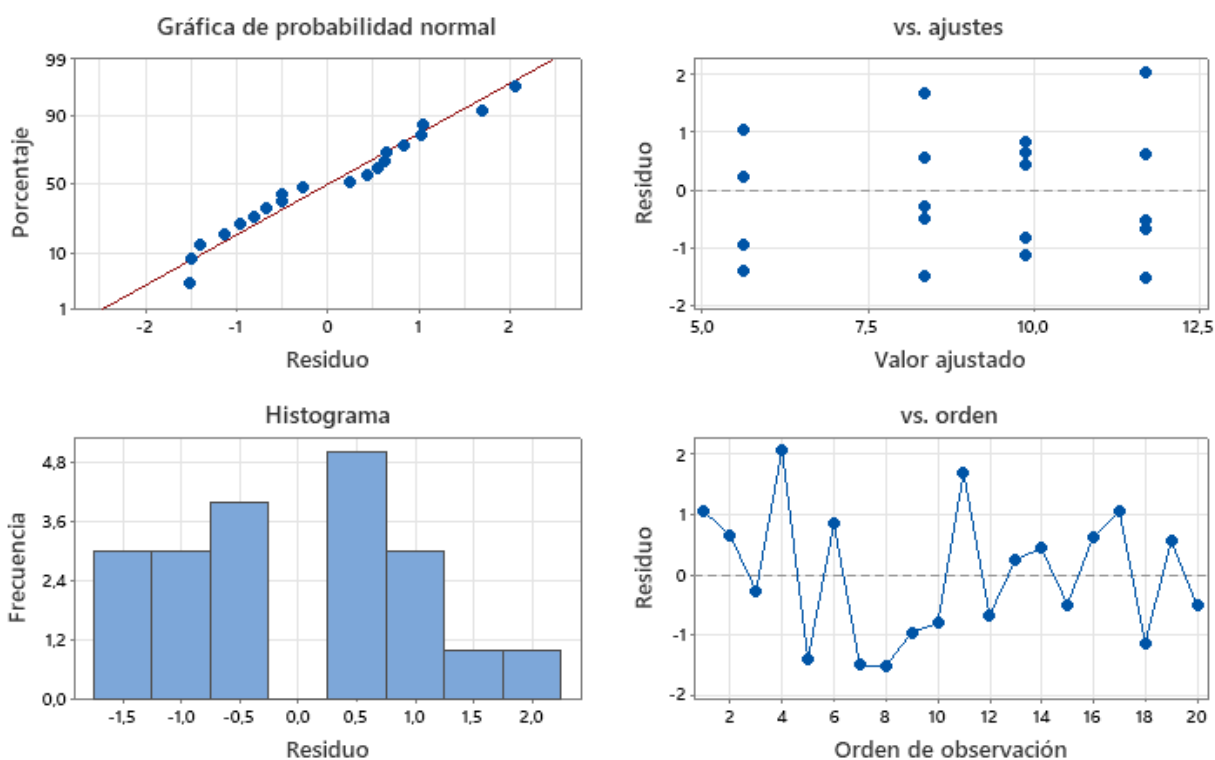
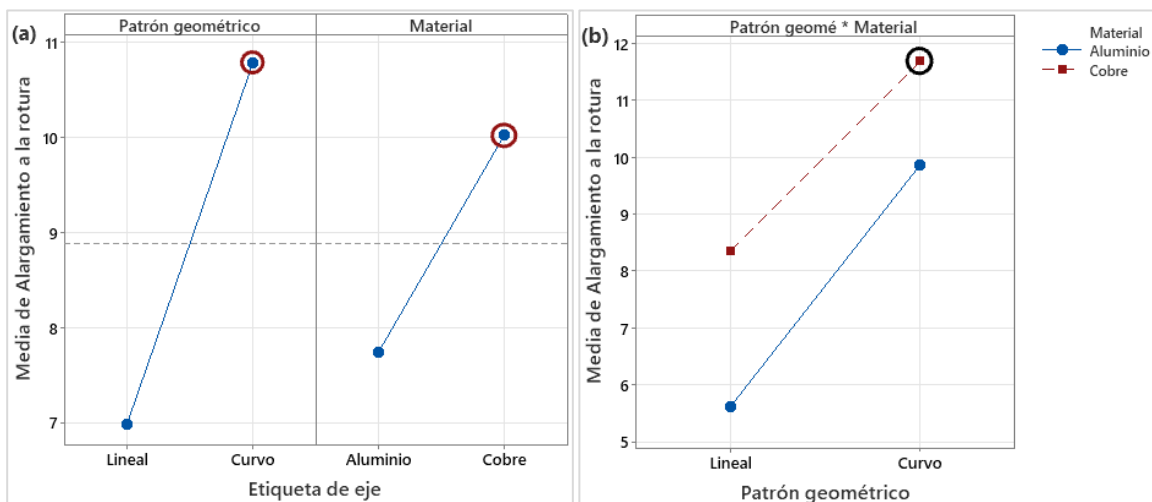


Figura 89

Porcentaje de alargamiento a la rotura. a) Gráfica de efectos principales. b) Gráfica de interacción.



Ensayo de torsión

En el ensayo de torsión (Figura 90) se observa un pico que evidencia el primer fallo de un elemento mecánico, después de este suceso el sistema sigue conduciendo hasta que se produce el fallo en el conductor. Las curvas presentan oscilaciones.

El fallo eléctrico ocurre después del mecánico (Figura 91), entonces, se consideró este último para el diseño experimental pues, hasta ese punto el sistema no se destruye.

Figura 90

Esfuerzo cortante vs Deformación por cortante. Primer fallo eléctrico del sistema. a) Cobre Curvo. b) Cobre Lineal. c) Aluminio Curvo. d) Aluminio Lineal

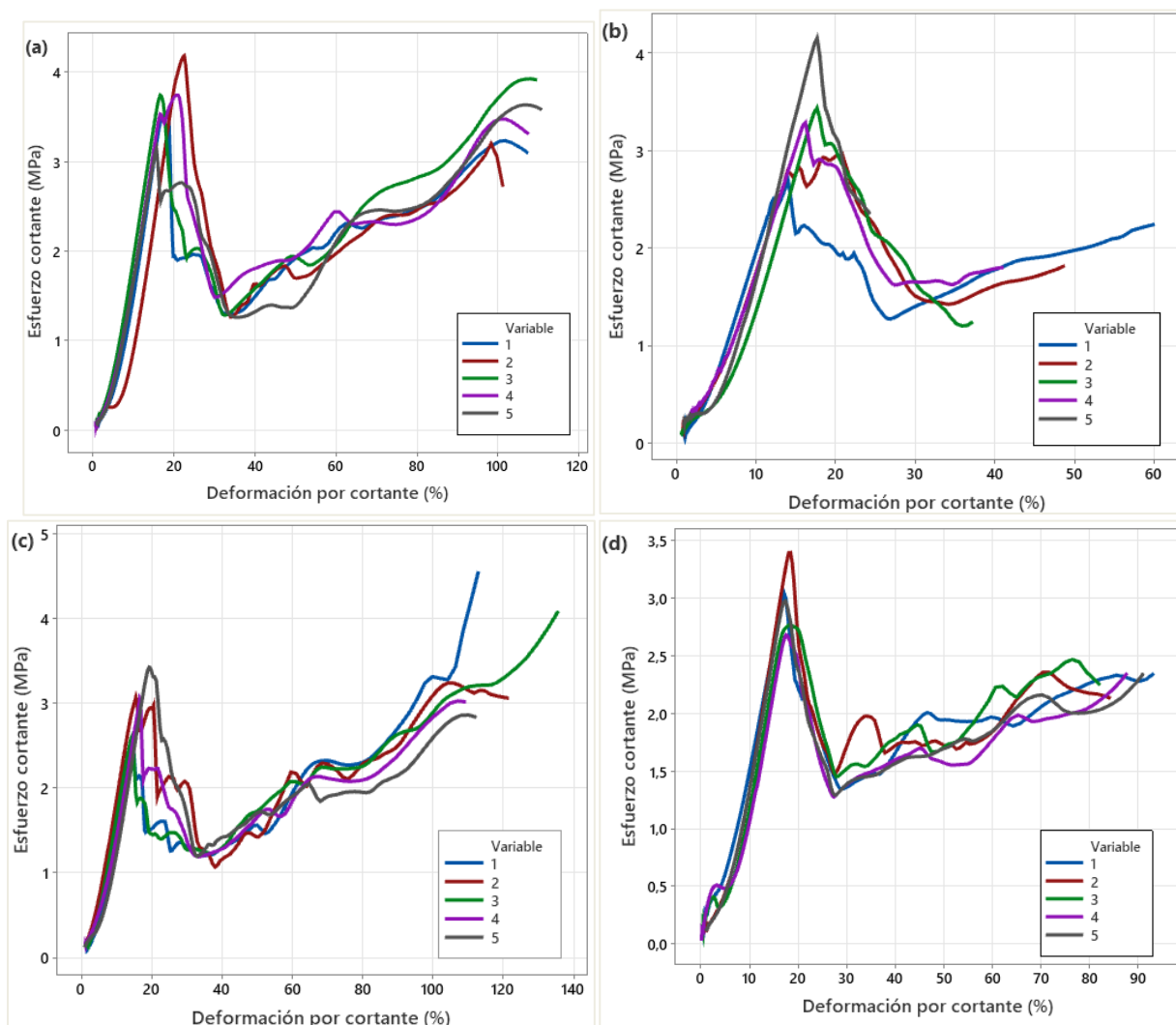
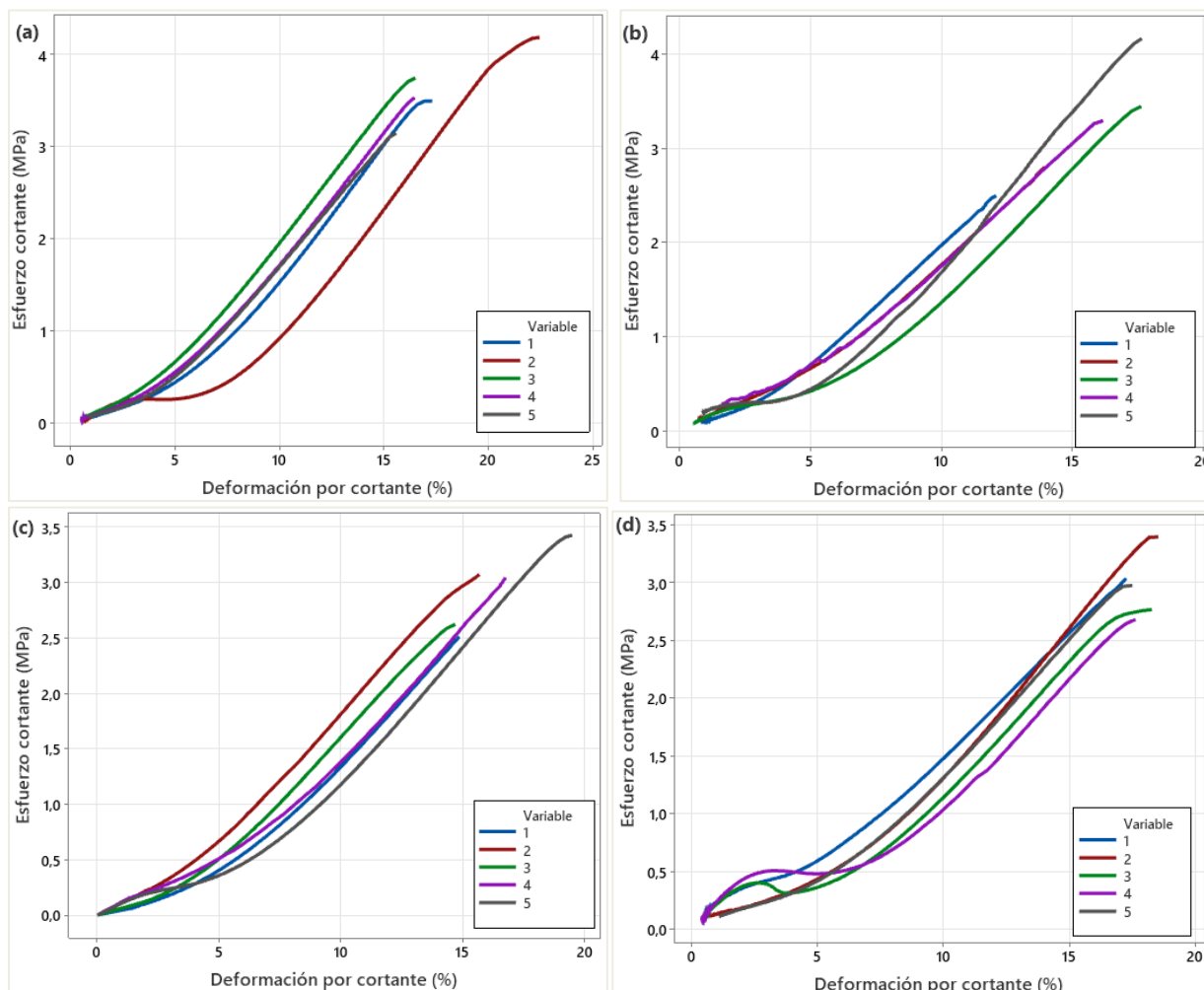


Figura 91

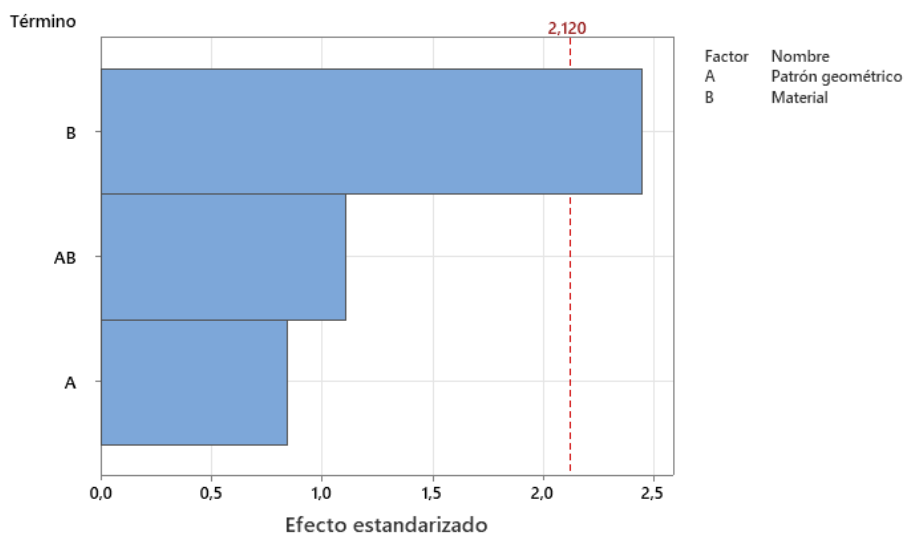
Esfuerzo cortante vs Deformación por cortante. Primer fallo mecánico del sistema. a) Cobre Curvo. b) Cobre Lineal. c) Aluminio Curvo. d) Aluminio Lineal



Resistencia al corte. Los términos lineales son: patrón geométrico y material. Según la Tabla 39 el primero mencionado no es significativo, pues su valor p de 0.411 es mayor al nivel de referencia, por otro lado, el segundo si es significativo, reporto un valor p de 0.026. La iteración de Patrón geométrico*Material no es significativa, cuenta con un valor de 0.284. En la Figura 92 se observa que B (Material) es significativo, mientras que A (Patrón geométrico) y AB no lo son.

Tabla 39*Análisis de varianza – Resistencia al corte*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	1.509	0.503	2.64	0.085
Lineal	2	1.2749	0.6375	3.34	0.061
Patrón geométrico	1	0.1359	0.1359	0.71	0.411
Material	1	1.1391	1.1391	5.97	0.026
Interacciones de 2 términos	1	0.234	0.234	1.23	0.284
Patrón geométrico *Material	1	0.234	0.234	1.23	0.284
Error	16	3.0514	0.1907		
Total	19	4.5604			

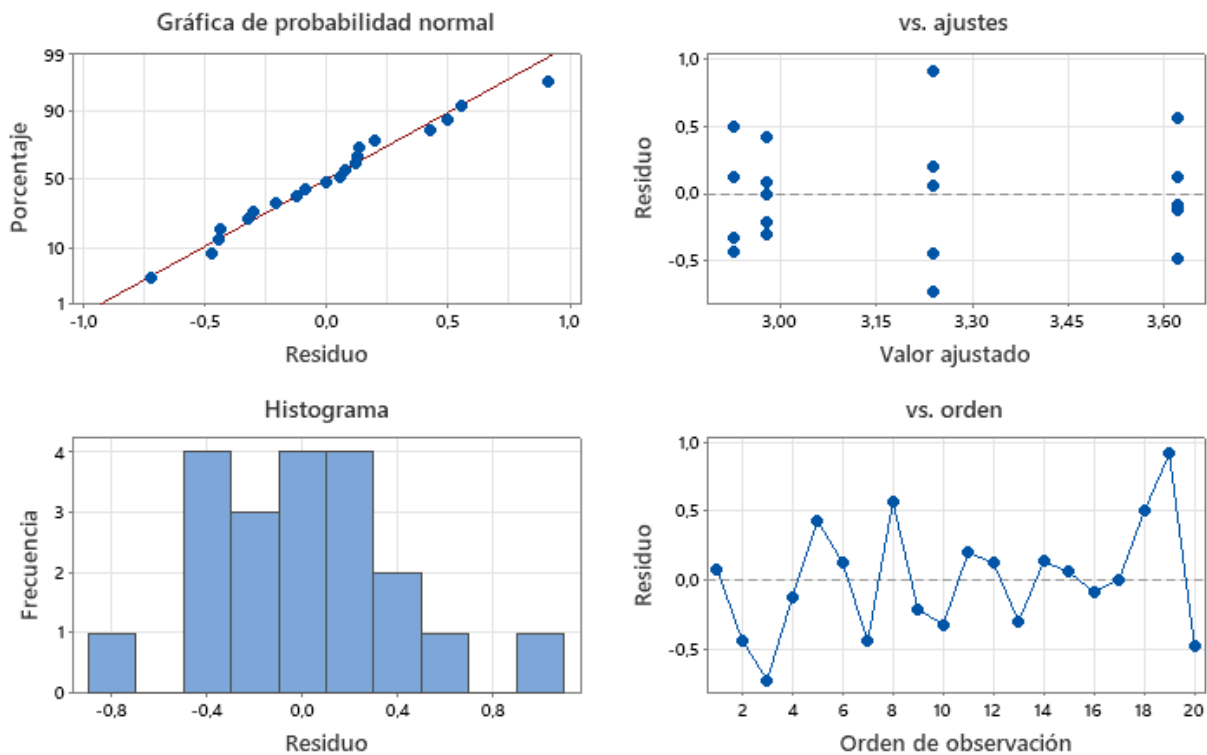
Figura 92*Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Resistencia al corte*

Los residuos son aquellos valores que surgen al comparar las observaciones reales con las predicciones realizadas por un modelo. La Figura 93, muestra que los residuos no presentaron anomalías, la gráfica de probabilidad normal cuenta con sus puntos a lo largo de la línea de tendencia, la gráfica de residuos vs ajustes muestra una distribución aleatoria de los puntos sin presentar valores atípicos o una varianza de residuos que incrementa con los

valores ajustados, el histograma tiene forma de campana y la gráfica de residuos vs orden no presenta tendencias.

Figura 93

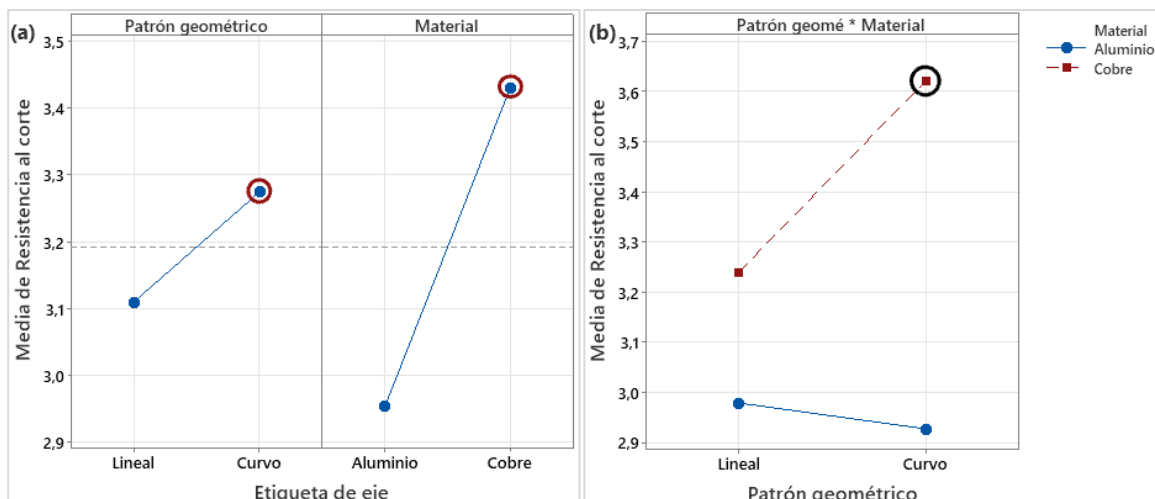
Gráficas de residuos - Resistencia al corte



El patrón geométrico no es significativo, sin embargo, se determinó la combinación que genere una maximización a la resistencia al corte, según la Figura 94 la unión se conformó por el material cobre (significativo) y el patrón geométrico curvo.

Figura 94

Resistencia al corte. a) Gráfica de efectos principales. b) Gráfica de interacción.



Deformación por cortante. En la Tabla 40 se muestra que ningún término lineal o interacción es significativa, pues todos los valores de p son mayores al nivel de referencia de α correspondiente a 0.05. El patrón geométrico, material y patrón geométrico*material tienen valores de 0.738, 0.579 y 0.067 respectivamente. El diagrama de Pareto de la Figura 95 confirma estos valores.

Tabla 40

Análisis de varianza – Deformación por cortante

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	18.8535	6.2845	1.43	0.271
Lineal	2	1.9204	0.9602	0.22	0.806
Patrón geométrico	1	0.5084	0.5084	0.12	0.738
Material	1	1.412	1.412	0.32	0.579
Interacciones de 2 términos	1	16.9332	16.9332	3.85	0.067
Patrón geométrico *Material	1	16.9332	16.9332	3.85	0.067
Error	16	70.4077	4.4005		
Total	19	89.2613			

Figura 95

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Deformación por cortante

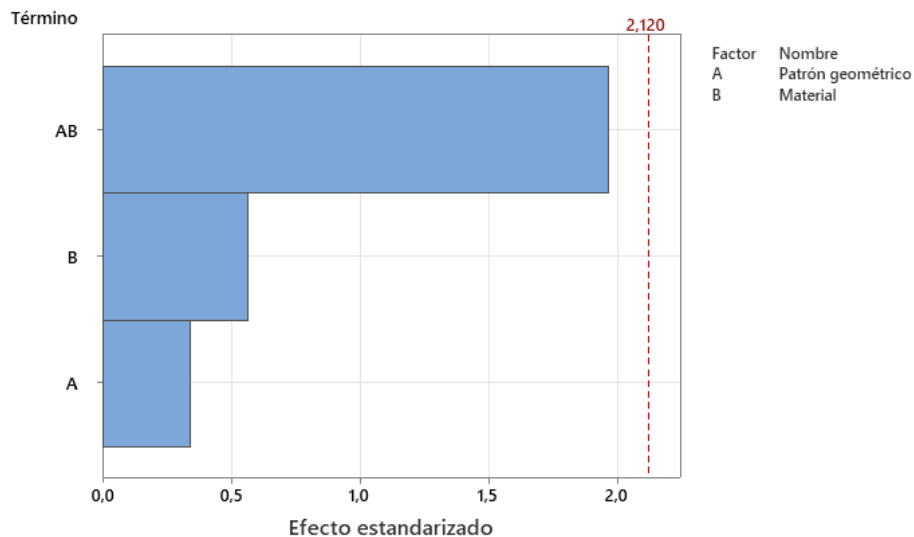
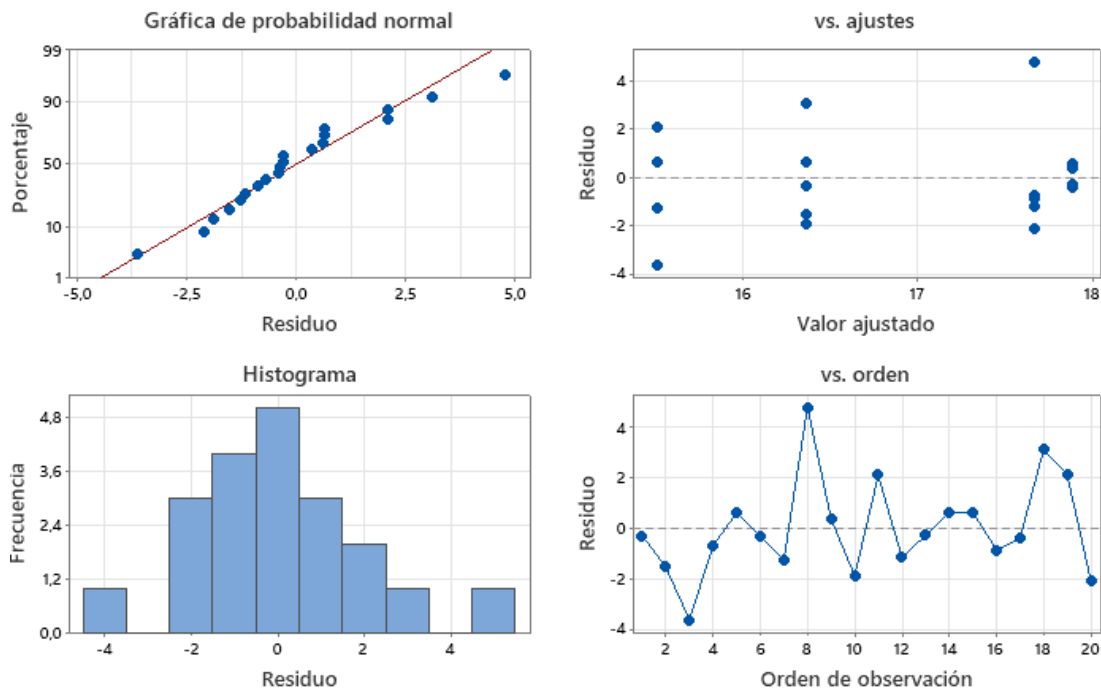


Figura 96

Grafica de residuos - Deformación por cortante

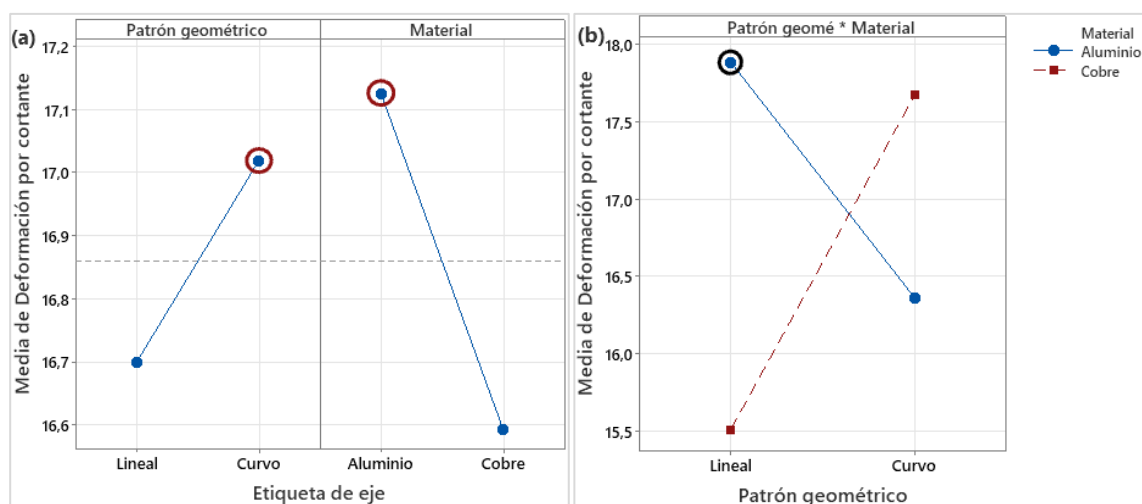


No se presenta ninguna anomalía en la gráfica de residuos de la Figura 96, el histograma cuenta con una distribución normal, residuos vs ajustes y residuos vs orden no presentan tendencias, y por último en la gráfica de probabilidad normal se observa que los residuos siguen la línea recta.

Pese a que ningún factor es significativo, se aprecia que el mayor valor de deformación cortante se dio a partir de la combinación del material cobre y el patrón geométrico lineal.

Figura 97

Deformación por cortante. a) Gráfica de efectos principales. b) Gráfica de interacción.



Caracterización del sistema electrónico flexible

La combinación que maximiza las propiedades mecánicas del sistema electrónico flexible es el material cobre con el patrón geométrico curvo. La caracterización de esta combinación se observa en la Tabla 41. Se aplicó la ley de mezclas de la Ecuación 15 para una rápida inspección obtenido un valor de resistencia última a la tracción de 1.978 (Mpa). El error entre el dato obtenido partiendo de la caracterización de los componentes del sistema y la caracterización directa del sistema es 2.9%.

Tabla 41*Caracterización del sistema electrónico flexible*

Ensayo	Propiedad	Valor
Tracción	Resistencia última a la tracción [MPa]	1.92 ± 0.11
	Porcentaje de alargamiento a la rotura [%]	11.69 ± 1.38
Torsión	Resistencia al corte [MPa]	3.62 ± 0.38
	Deformación por cortante [%]	17.67 ± 2.73

Atenuación

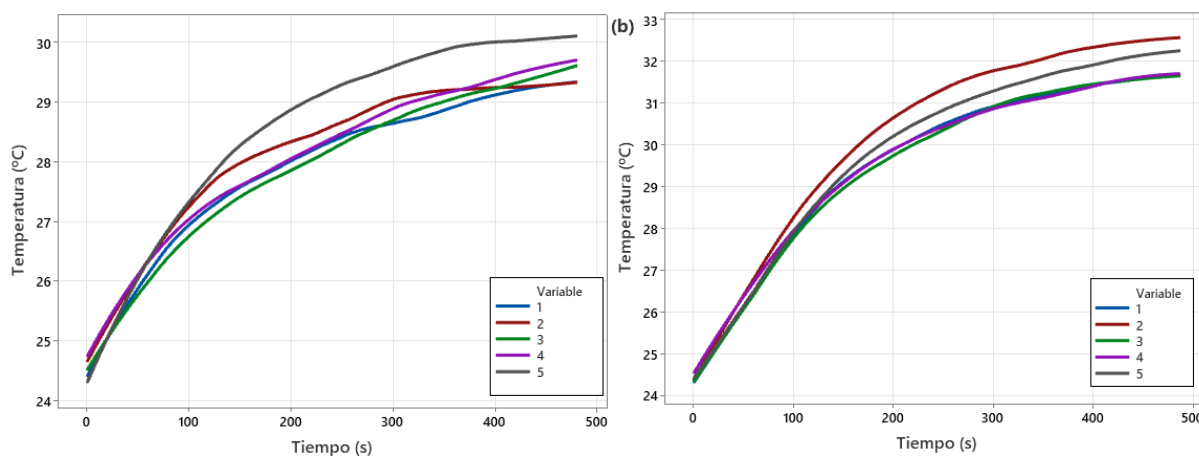
Durante el desarrollo de los ensayos mecánicos no se observó atenuación, es decir no hubo una reducción de la magnitud de onda; el único fenómeno que se presentó, es un ruido de aproximadamente 0.16 V de voltaje medio entre las puntas del osciloscopio.

Resultados de las propiedades eléctricas y electrónicas del sistema***Incremento de temperatura***

La Tabla 42 reporta las medias del incremento de temperatura (ΔT) presentado en las probetas de aluminio y de cobre al someterse a una operación normal de 1 [A] y 12 [V] durante un tiempo de 8 minutos. En la Figura 98 se observa que las curvas llegan a un punto muy aproximado a la estabilización. La probeta 5 de aluminio tiene un comportamiento diferente a las demás probetas. La probeta de aluminio disipó el calor mejor que el cobre.

Tabla 42*Incremento de temperatura*

Material	Incremento temperatura	Unidades
Aluminio	5.11 ± 0.40	°C
Cobre	7.61 ± 0.38	°C

Figura 98*Temperatura vs Tiempo. Incremento de temperatura en funcionamiento normal. a) Aluminio. b)**Cobre****Voltaje máximo de operación*****Tabla 43***Incremento de temperatura para voltaje máximo de operación*

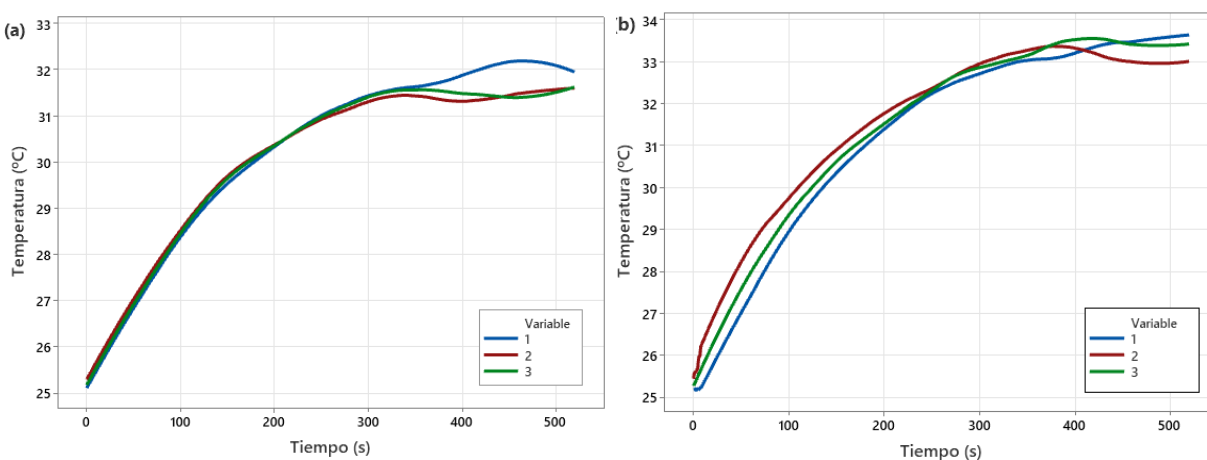
Material	Incremento temperatura	Unidades
Aluminio	6.57 ± 0.32	°C
Cobre	8.29 ± 0.31	°C

El voltaje máximo de operación al cual se ensayaron las probetas fue 1 [A] y 220 [V], la Tabla 43 muestra el valor de ΔT para las probetas de aluminio y cobre a lo largo de 8.5 minutos. El comportamiento de las curvas sigue una tendencia bien definida (Figura 99). El aluminio disipó el calor de mejor manera que el cobre.

Figura 99

Temperatura vs Tiempo. Incremento de temperatura con voltaje máximo de operación.

a) Aluminio. b) Cobre



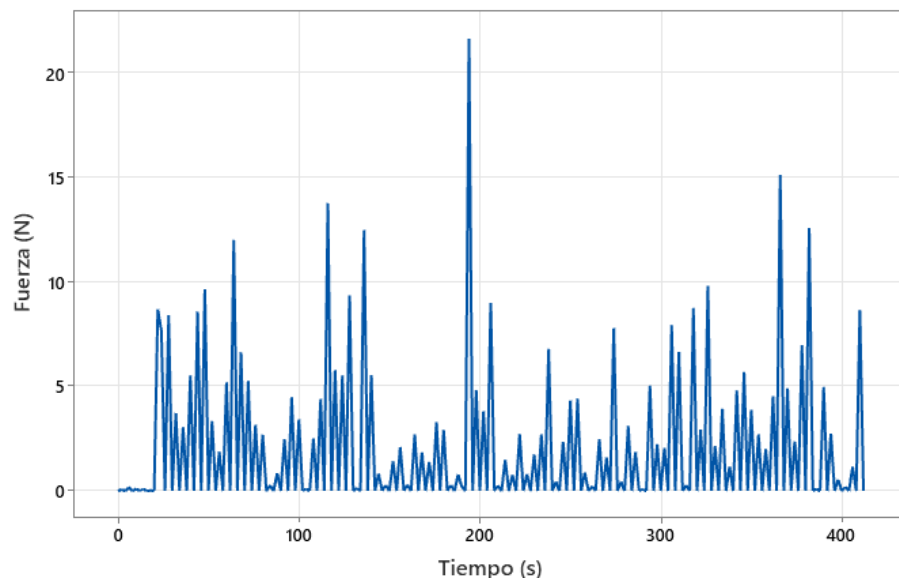
Resultado de la implementación de un sistema electrónico flexible en una aplicación industrial

La taconera inteligente captó el dato de fuerza durante 6.33 minutos, en donde se emplearon diferentes ritmos de marcha: caminata, trote, corrida y saltos. La Figura 100 reporta los valores adquiridos, se observa una fuerza máxima de 21.62 (N).

En la Figura 101 se muestra el prototipo posterior a la prueba y en la Figura 102 se observa la rotura en el conductor que provocó la falla del sistema.

Figura 100

Taconera inteligente. Fuerza vs Tiempo.

**Figura 101**

Taconera inteligente después de la prueba

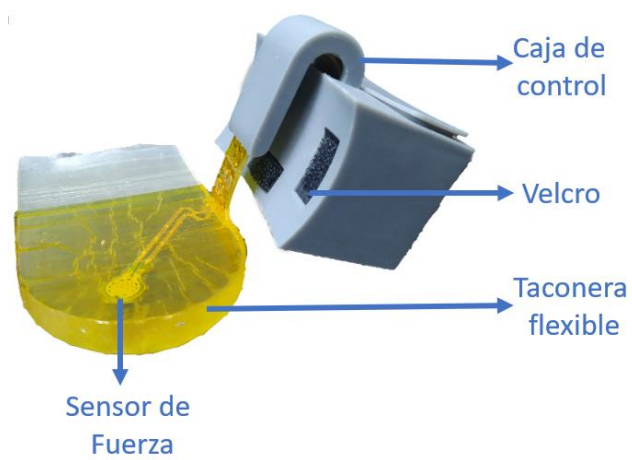
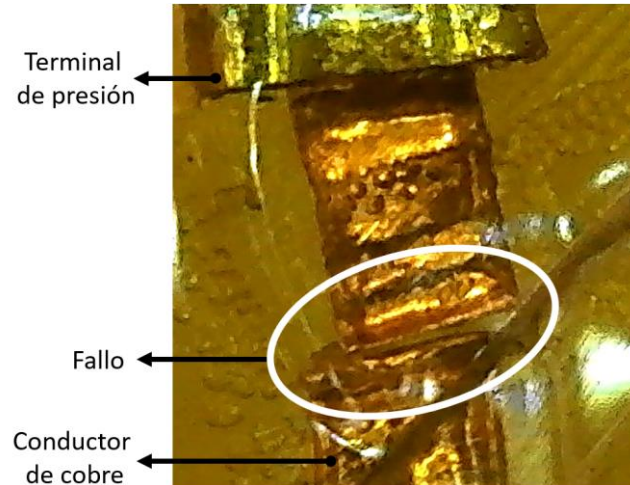


Figura 102

Taconera inteligente fallo



Discusión

Plataforma de diseño de estructuras flexibles

Es importante señalar que, si existe mayor disponibilidad de materiales y acceso a laboratorios con equipos de alta tecnología para el desarrollo de estructuras flexibles, el trabajo planteado puede ser más extenso y con una amplia gama de configuraciones enfocadas a un sinnúmero de aplicaciones. Las prestaciones que pueden obtenerse con este tipo de sistemas son muy extensas, por lo cual esta investigación representa un punto de partida para trabajos futuros. Además, el desarrollo de plataformas de diseño contribuye notablemente al diseño paramétrico.

Sustrato

Se realizó un análisis ANOVA para determinar la orientación de impresión que maximice las siguientes propiedades mecánicas: resistencia última a la tracción, porcentaje de

alargamiento a la rotura, resistencia al corte y deformación por cortante. Las medias de las tres primeras propiedades no tienen una diferencia significativa entre los diferentes niveles de orientación, la deformación por cortante es la única que reporta diferencia significativa. Pese a esto, en todos los casos, la orientación ZX maximiza las propiedades mecánicas analizadas.

Se obtiene una resistencia última a la tracción de 2.27 (MPa), un porcentaje de alargamiento de 112.31 (%), una resistencia al corte de 2.80 (MPa) y el valor de la deformación por cortante es de 173.28 (%).

Según la hoja técnica de la resina, la resistencia última a la tracción es 3.23 (MPa) y el alargamiento a la rotura toma un valor de 160 (%), estas diferencias son del 29.7% y 29.8% respectivamente. El motivo de esta discrepancia se debe a la falta de especificaciones de la orientación usada en los ensayos de caracterización por parte del fabricante y al post-procesado ya que, se lo realizó con la máquina de lavado y curado 3D UW-01 de Creality y no con una Form Cure, propia del fabricante de la resina.

La tecnología de estereolitografía se da a partir del curado de fotoresina mediante luz UV lo que genera no solo una adhesión mecánica, sino que también un enlace químico formado por enlaces covalentes, la ley de Beer-Lambert (Figura 10) explica que la luz del curado no solamente incide en la capa actual, sino que, afecta a las capas anteriores curadas provocando enlaces covalentes laterales y entre capas. Además, a diferencia de otras tecnologías de manufactura como FDM, SLA no genera vacíos ni grietas. Por lo tanto, es evidente que las propiedades mecánicas no tengan una diferencia significativa entre los diferentes niveles de orientación, pues, no existe diferencia entre los enlaces químicos que forman cada capa y los que unen las capas entre sí. Por lo cual la impresión por SLA genera piezas teóricamente isotrópicas. (Formlabs, s. f.)

Formlabs comparó la resistencia última a la tracción en diferentes niveles de orientaciones, presentando un mejor resultado en la orientación B60XY, pese a no ser significativa.

Cinta de Cobre/Aluminio/Poliimida

Se reporta que la cinta comercial de cobre tiene una resistencia última a la tracción de 101.48 (MPa), el cobre puro tiene una resistencia a la tracción de 210 (MPa). La cinta de aluminio posee una resistencia última a la tracción de 75.08 (MPa), mientras que el aluminio en un estado puro es de 90 (MPa). Para el caso de la cinta de cobre, al ser una lámina delgada, la presencia de porosidades y óxidos genera un decremento de la resistencia última a la tracción; por otro lado, el descenso de este valor en la cinta de aluminio es producto de las impurezas presentes en el material como se reportó en el análisis EDS. Es importante señalar que estas impurezas ($FeAl_3$) son inherentes al proceso de laminado del material.

La resistencia de corte de las cintas no se ha considerado dado que sus valores no reflejan la realidad. Esto se debe a que, en su ecuación enfocada a una sección transversal rectangular, el espesor se encuentra como denominador elevado al cuadrado, y si la película que se ensaya no es homogénea, los valores obtenidos serán muy diferentes y grandes que al ensayar una probeta más gruesa. Es importante considerar que, si no se tiene la certeza de que la cinta es homogénea y uniforme, se recomienda aplicar otra metodología de ensayo de torsión.

Dentro de los ensayos mecánicos de la cinta de cobre existen probetas que no cumplen con el patrón, esto se debe a los concentradores de esfuerzo que pudieron formarse en la manufactura de las probetas mediante corte plotter.

Las propiedades de la cinta de poliimida ensayada tienen una resistencia última a la tracción de 62.38 (MPa), la poliimida no posee características mecánicas específicas, pues, depende de su composición y por lo tanto del fabricante. Según de hoja técnica de DuPont Kapton, la resistencia última a la tracción es de 231 (MPa), y Plásticos Brello reporta un valor de 140 (MPa)

Propiedades mecánicas del sistema electrónico flexible

Las curvas de los ensayos de torsión del sistema presentan oscilaciones producto de las características del material del sustrato correspondiente a la resina elástica 50A (Hoja técnica, Apéndice A), este material es un polímero y tiene propiedades viscoelásticas. Si se aplica un esfuerzo a un sólido elástico se deforma y almacena energía, por otra parte, si se aplica un esfuerzo a un fluido viscoso se deforma y puede disipar energía, el comportamiento viscoelástico es el intermedio de ambas definiciones. Entonces, las oscilaciones se deben a las tensiones y relajaciones que ocurren en el material a lo largo del ensayo.

En cuanto a la maximización de las propiedades mecánicas se ha evaluado que para el patrón geométrico solo es significativo en el porcentaje de alargamiento a la rotura. Mientras que el material es significativo en la resistencia última a la tracción, el porcentaje de alargamiento a la rotura y la resistencia de corte. Para el caso del patrón geométrico, su influencia sobre la deformación es notoria, pues el patrón curvo sede considerablemente frente al estiramiento, mientras que el patrón lineal falla. En cambio, es evidente que el material tenga una influencia en el sistema, pues ocupa un volumen de este y sus características afectan al conjunto.

La combinación que maximiza las propiedades mecánicas del sistema en su mayoría es la del material cobre y el patrón geométrico curvo, esto se debe a que la cinta de cobre es más

dúctil que la cinta de aluminio, se evidencia este dato considerando su módulo de elasticidad teórico de 119 (GPa) y 71.1 (GPa) respectivamente. Además, en el estudio de (Vaithilingam et al., 2020) se reporta que el patrón curvo presenta mejores características a los esfuerzos mecánicos frente al patrón lineal, debido a su capacidad de deformación.

Propiedades eléctricas del sistema electrónico flexible

El aumento de temperatura en un conductor eléctrico se explica por la ley de Joule detallada en el Capítulo II. Al observar las gráficas del incremento de temperatura tanto en funcionamiento normal como con el voltaje máximo de operación, se aprecia que todas se acercan mucho al punto de estabilización, por lo cual el valor del ΔT representa muy bien el sistema.

Según el diseño de las trazas del sistema electrónico flexible, se tiene una relación de masas de $Cu = 1.97 \cdot Al$, el valor nominal de calor específico del cobre y aluminio es de 385 J/(Kg·°C) y 904 J/(Kg·°C) respectivamente, por lo cual teóricamente el sistema de cobre se calentaría más rápido que el de aluminio al someterse a la misma potencia. Los datos obtenidos cumplen con este análisis, ya que en ambos casos el aluminio es el que presentó un menor incremento de la temperatura.

El ruido de 0.16 (V) de voltaje medio en las puntas del osciloscopio es propio de la máquina, por otra parte, es evidente que en el sistema diseñado no se presenten atenuaciones debido a alta conductividad eléctrica de los materiales que lo componen y a la pequeña longitud del conductor, pues las aplicaciones para las que se enfoca, no requieren cubrir largas distancias como por ejemplo los cables de transmisión.

Implementación de un sistema electrónico flexible en una aplicación industrial

La taconera inteligente es una aplicación en donde se debe priorizar el funcionamiento mecánico, por este motivo se determinó que el conductor sería de cobre y curvo. El sistema eléctrico flexible diseñado se limita a que en las uniones de los componentes el conductor tenga un patrón lineal, pues, deben ingresar en los terminales de prensado. Esta característica genera un concentrador de esfuerzos crítico en el sistema. Una opción factible para generar mejoras es realizar un pliegue del conductor en la zona de las uniones o buscar otras alternativas para unir los componentes sin necesidad de una soldadura que pueda causar daños al conductor.

Es importante conocer que este tipo de sistemas electrónicos flexibles pueden implementarse en más aplicaciones, como sensores, dispositivos implantables, dispositivos portátiles, robótica blanda, pantallas y almacenamiento de energía.

Capítulo V

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Conclusiones

La electrónica flexible usando impresión 3D tiene amplias proyecciones a futuro, permite el diseño, fabricación y prueba de sistemas con estructuras complejas y personalizadas adaptables a superficies dinámicas y no planas, en un tiempo corto y sin equipos sofisticados. El desarrollo de una prueba de concepto de un sistema electrónico flexible usando impresión 3D, logra constituir un producto mediante una sinergia de procesos de manufactura con componentes de fácil acceso, aportando un nuevo enfoque a aplicaciones industriales y de la vida cotidiana.

La plataforma de diseño para sistemas flexibles, posibilita al usuario dimensionar el sustrato y traza requerida acorde a su aplicación y a la cantidad de amperaje nominal de funcionamiento. Los parámetros de salida como el volumen del sustrato y las dimensiones del material base para la manufactura de las trazas, ayudan a determinar los recursos iniciales requeridos.

El sistema electrónico flexible está compuesto por un sustrato de resina elástica 50A (Hoja técnica, Apéndice A) de Formlabs, una traza conductora conformada por cinta de aluminio o cinta de cobre y un cobertor de cinta de poliimida. Al estar constituido por diferentes subsistemas que requieren de un diseño, manufactura y posprocesado tanto independiente como de forma conjunta, la mecatrónica asume un rol importante, desarrolla de manera más amplia estos sistemas electrónicos ya que al poseer un enfoque de sinergia entre varias ramas

de la ingeniería facilita el análisis, estudio y mejora mediante el planteamiento de solución a problemas y optimización.

Considerando la importancia de las relaciones de procesamiento-estructura y propiedades del sistema, se caracterizaron sus componentes de manera individual y se determinaron parámetros del procesamiento que maximizan las propiedades mecánicas del conjunto. El sustrato tiene una resistencia última a la tracción de 2.27 (MPa), un porcentaje de alargamiento a la rotura de 112.31 (%), una resistencia al corte de 2.8 (MPa) y una deformación cortante de 173.28 (%). Además, se determinó que las piezas obtenidas por SLA son teóricamente isotrópicas. En el caso de las cintas, se han determinado los valores de resistencia última, porcentaje de alargamiento y deformación por cortante; para la cinta de cobre los valores corresponden a 101.48 (MPa), 4.03 (%) y 0.18 (%), en el caso de la cinta de aluminio son iguales a 75.08 (MPa), 3.07 (%) y 0.31 (%), y en cuanto a la cinta de poliimida tienen un valor de 62.38 (MPa), 12.81 (%) y 0.40 (%). Es importante mencionar que dentro del cálculo la resistencia al corte se considera el espesor de la película al cuadrado en el denominador, por lo tanto, trabajar con películas delgadas en donde no se garantice su homogeneidad en la sección transversal, no es recomendable, los valores obtenidos pueden no ser reales y varían considerablemente al compararse con películas de mayor grosor. La cinta de cobre al ser una lámina delgada reporta un decremento en la resistencia última a la tracción producto de la presencia de porosidades y óxidos. La cinta de aluminio presenta una disminución similar en este valor debido a la presencia de impurezas.

Al realizar los ensayos de tracción y torsión del sistema, se determina que el primer fallo en tomar lugar es el mecánico y posteriormente el eléctrico. Y se concluye que la mejor combinación para la maximización de propiedades mecánicas es el material cobre con el patrón geométrico curvo. El sistema tiene una resistencia última a la tracción de 1.92 (MPa), un

porcentaje de alargamiento a la rotura de 11.69 (%), una resistencia al corte de 3.62 (MPa) y una deformación cortante de 17.67 (%).

En la caracterización eléctrica y electrónica se reporta que no se observa atenuación. El sistema en funcionamiento normal tiene un incremento de temperatura de 7.61 (°C) para el cobre y de 5.11 (°C) para el aluminio. Al trabajar con el voltaje máximo de operación el cobre incrementa la temperatura 8.29 (°C) y el aluminio 6.27 (°C).

La taconera inteligente implementada mediante un sistema electrónico flexible recopiló datos de forma exitosa durante un intervalo de 6.33 minutos sometiéndose a caminata, trote, corrida y saltos; después del tiempo mencionado, sufrió un fallo en su concentrador de esfuerzos crítico, la unión con el sensor. El sistema se limita en gran medida debido a los terminales de presión para la unión de componentes, requieren que el tramo final del conductor tenga un patrón geométrico lineal.

Recomendaciones

Antes de realizar un trabajo de investigación es importante investigar acerca de todos los equipos y laboratorios que posee la universidad local y las aledañas en el país, permitiendo ampliar el alcance del trabajo. La Universidad Yachay Tech es una excelente alternativa para la investigación, cuenta con equipos para caracterizar materiales eléctrica, mecánica, química y microestructuralmente.

Realizar un control en el posprocesado, especialmente en el cernido de la resina fotocurable del sustrato cada vez que se finaliza una impresión, con el fin de garantizar la calidad de las piezas impresas y optimizar los recursos. Además, se recomienda no imprimir piezas con un espesor menor a 0.5 mm considerando las características elásticas de la resina.

Calibrar y dar un mantenimiento periódico a los equipos de ensayos con el fin de obtener datos confiables y no presentar inconvenientes a lo largo de las pruebas que puedan arruinar los grupos de probetas y la investigación en general.

Trabajo Futuro

Actualmente la electrónica flexible usando impresión 3D tienen un alcance enorme, para un futuro se recomendaría fusionar el sustrato flexible impreso por SLA con electrónica orgánica, es decir, los polímeros conductores a base de carbono, esto potenciaría en gran medida al sistema ya que aportaría mejores características mecánicas y eléctricas. Además, se deben buscar más alternativas de cobertores, pues, la poliimida fue el componente crítico del sistema.

Es importante desarrollar más sistemas electrónicos flexibles y realizar una caracterización mucho más profunda permitiendo la generación de información, como por ejemplo determinar la resistividad eléctrica, el valor de la conductividad eléctrica, analizar el comportamiento de la impedancia mientras el sistema se ve sometido a ensayos mecánicos, agregar ensayos de flexión, impacto y burst pressure.

Bibliografía

- 3DNatives. (2021, febrero). *Cluster Impresión y Packaging*, Cámara de Comercio de Bogotá.
<https://n9.cl/6ixy1>
- AMIKON. (s. f.). *EVO MA25*. Recuperado 24 de agosto de 2023, de <https://www.amikon-shop.de/zeiss-rasterelektronenmikroskop-evo-ma-25-edx-analyseeinheit-oxford-inca-energy-350/laborartikel/a-21803>
- Ashby, M. F. (2005). *Materials selection in mechanical design* (3rd ed). Butterworth-Heinemann.
- Bose, A. B., Susmita (Ed.). (2015). *Additive Manufacturing*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b18893>
- Chen, J., Liu, X., Tian, Y., Zhu, W., Yan, C., Shi, Y., Kong, L. B., Qi, H. J., & Zhou, K. (2022). 3D-Printed Anisotropic Polymer Materials for Functional Applications. *Advanced Materials*, 34(5), 2102877. <https://doi.org/10.1002/adma.202102877>
- Diani, J., Fredy, C., Gilormini, P., Merckel, Y., Regnier, G., & Rousseau, I. (2011). A torsion test for the study of the large deformation recovery of shape memory polymers. *Polymer Testing*, 30(3), 335-341. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.01.008>
- Dym, C. L. (2013). *Engineering Design: A Project-Based Introduction*. John Wiley & Sons.
- Espera, A. H., Dizon, J. R. C., Valino, A. D., & Advincula, R. C. (2022). Advancing flexible electronics and additive manufacturing. *Japanese Journal of Applied Physics*, 61(SE), SE0803. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac621a>

- Formlabs. (s. f.). *Guías*. Validación de la isotropía en la impresión 3D por estereolitografía (SLA). Recuperado 21 de agosto de 2023, de <https://formlabs.com/es/blog/isotropia-impresion-3D-estereolitografia-sla/>
- Formlabs. (2017). *Guía sobre impresión 3D por estereolitografía (SLA) de 2020*. Formlabs. <https://formlabs.com/latam/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/>
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Gray, A. T. (Ed.). (2019). Chapter 3—Attenuation. En *Atlas of Ultrasound-Guided Regional Anesthesia (Third Edition)* (pp. 5-6). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-50951-0.00003-7>
- Hamburg, G. (s. f.). *Métodos de ensayos mecánicos*. <https://n9.cl/qtt5y0>
- Heaney, M. B. (1999). *Electrical Conductivity and Resistivity*.
- Jacobs, P. F. (1992). *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers.
- Liou, F. W. (2007). *Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development*.
- Liu, C., Huang, N., Xu, F., Tong, J., Chen, Z., Gui, X., Fu, Y., & Lao, C. (2018). 3D printing technologies for flexible tactile sensors toward wearable electronics and electronic skin. *Polymers*, 10(6). Scopus. <https://doi.org/10.3390/polym10060629>

- Liu, S., Shi, X., Li, X., Sun, Y., Zhu, J., Pei, Q., Liang, J., & Chen, Y. (2018). A general gelation strategy for 1D nanowires: Dynamically stable functional gels for 3D printing flexible electronics. *Nanoscale*, *10*(43), 20096-20107. Scopus.
<https://doi.org/10.1039/c8nr06369a>
- Medellin, A., Du, W., Miao, G., Zou, J., Pei, Z., & Ma, C. (2019). Vat Photopolymerization 3D Printing of Nanocomposites: A Literature Review. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, *7*(031006). <https://doi.org/10.1115/1.4044288>
- Neworld, 3D. (2018, abril 2). La guía de impresión de estereolitografía (SLA) en 3D. *3D Neworld*. <https://3dneworld.com/la-guia-de-impresion-de-estereolitografia-sla-en-3d/>
- Nisja, G. A., Cao, A., & Gao, C. (2021). Short review of nonplanar fused deposition modeling printing. *Material Design & Processing Communications*, *3*(4), e221.
<https://doi.org/10.1002/mdp2.221>
- 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>
- podoactiva. (2019, marzo 14). Presentamos las primeras plantillas inteligentes personalizadas del mercado. *Podoactiva. Líderes en Podología*.
<https://www.podoactiva.com/blog/presentamos-las-primeras-plantillas-inteligentes-personalizadas-del-mercado>
- Ren, P., & Dong, J. (2021). Direct Fabrication of VIA Interconnects by Electrohydrodynamic Printing for Multi-Layer 3D Flexible and Stretchable Electronics. *Advanced Materials Technologies*, *6*(9). Scopus. <https://doi.org/10.1002/admt.202100280>

SEAS. (2022, febrero 14). *Qué es el efecto Joule y su aplicación | Blog SEAS*.

<https://www.seas.es/blog/automatizacion/que-es-el-efecto-joule-y-su-aplicacion/>

Shin, S. R., Farzad, R., Tamayol, A., Manoharan, V., Mostafalu, P., Zhang, Y. S., Akbari, M., Jung, S. M., Kim, D., Comotto, M., Annabi, N., Al-Hazmi, F. E., Dokmeci, M. R., & Khademhosseini, A. (2016). A Bioactive Carbon Nanotube-Based Ink for Printing 2D and 3D Flexible Electronics. *Advanced Materials*, 28(17), 3280-3289. Scopus.

<https://doi.org/10.1002/adma.201506420>

Somireddy, M., & Czekanski, A. (2020). Anisotropic material behavior of 3D printed composite structures – Material extrusion additive manufacturing. *Materials & Design*, 195, 108953.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108953>

Tehrani, M. (2021). Advanced Electrical Conductors: An Overview and Prospects of Metal Nanocomposite and Nanocarbon Based Conductors. *Physica Status Solidi (a)*, 218(8), 2000704. <https://doi.org/10.1002/pssa.202000704>

Vaithilingam, J., Saleh, E., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Hague, R., & Dickens, P. (2020). 3D-inkjet printing of flexible and stretchable electronics. En Bourell D.L., Crawford R.H., Seepersad C.C., Beaman J.J., Fish S., & Marcus H. (Eds.), *Proc. - Annu. Int. Solid Freeform Fabr. Symp. - Addit. Manuf. Conf., SFF* (pp. 1513-1526). The University of Texas at Austin; Scopus. <https://n9.cl/6clkw>

Wang, L., & Liu, J. (2014). Liquid metal inks for flexible electronics and 3D printing: A review. *ASME Int Mech Eng Congress Expos Proc*, 2B. Scopus.

<https://doi.org/10.1115/IMECE2014-37993>

Wang, Z., Sun, L., Ni, Y., Liu, L., & Xu, W. (2021). Flexible Electronics and Healthcare Applications. *Frontiers in Nanotechnology*, 3.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnano.2021.625989>

Xu, W., Huang, M.-C., Amini, N., Liu, J. J., He, L., & Sarrafzadeh, M. (2012). Smart insole: A wearable system for gait analysis. *Proceedings of the 5th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, 1-4.

<https://doi.org/10.1145/2413097.2413120>