

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
OCCIDENTE**

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales

Sustentabilidad y tecnología

PROYECTO DE APLICACIÓN PROFESIONAL (PAP)

Programa de Apoyo a Centros de Investigación Externos II



**ITESO, Universidad
Jesuita de Guadalajara**

**4G03 Programa de Apoyo a Centros de Investigación Externos II
Desarrollo de una prótesis externa de mama con el uso de metamateriales.**

PRESENTAN

Programas educativos y Estudiantes

Ing. en Nanotecnología, Ana Paulina Veloso Ramírez

Ing. en Nanotecnología, Israel Vargas Guevara

Profesor PAP: Dra. Gabriela Porras Quevedo, Dra. Blanca A. Valdivia Urdiales, Dra.
Ramona Beatriz Alemón Galindo.

Tlaquepaque, Jalisco, diciembre de 2022

ÍNDICE

Contenido

REPORTE PAP	2
Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional	2
Resumen	4
1. Ciclo participativo del Proyecto de Aplicación Profesional.....	4
1.1 Entendimiento del ámbito y del contexto	6
1.2 Caracterización de la organización	10
1.3 Identificación de la(s) problemática(s)	10
1.4. Planeación de alternativa(s).....	11
1.5. Desarrollo de la propuesta de mejora	19
1.6. Valoración de productos, resultados e impactos	29
1.7. Bibliografía y otros recursos.....	41
1.8. Anexos generales	42
2. Productos	42
3. Reflexión crítica y ética de la experiencia.....	48
3.1 Sensibilización ante las realidades	48
3.2 Aprendizajes logrados	51

REPORTE PAP

Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional

Los Proyectos de Aplicación Profesional (PAP) son experiencias socio-profesionales de los alumnos que desde el currículo de su formación universitaria- enfrentan retos, resuelven problemas o innovan una necesidad sociotécnica del entorno, en vinculación (colaboración) (co-participación) con grupos, instituciones, organizaciones o comunidades, en escenarios reales donde comparten saberes.

El PAP, como espacio curricular de formación vinculada, ha logrado integrar el Servicio Social (acorde con las Orientaciones Fundamentales del ITESO), los requisitos de dar cuenta de los saberes y del saber aplicar los mismos al culminar la formación profesional (Opción Terminal), mediante la realización de proyectos profesionales de cara a las necesidades y retos del entorno (Aplicación Profesional).

El PAP es un proceso acotado en el tiempo en que los estudiantes, los beneficiarios externos y los profesores se asocian colaborativamente y en red, en un proyecto, e incursionan en un mundo social, como actores que enfrentan verdaderos problemas y desafíos traducibles en demandas pertinentes y socialmente relevantes. Frente a éstas transfieren experiencia de sus saberes profesionales y demuestran que saben hacer, innovar, co-crear o transformar en distintos campos sociales.

El PAP trata de sembrar en los estudiantes una disposición permanente de encargarse de la realidad con una actitud comprometida y ética frente a las disimetrías sociales. En otras palabras, se trata del reto de “saber y aprender a transformar”.

El Reporte PAP consta de tres componentes:

El primer componente refiere al ciclo participativo del PAP, en donde se documentan las diferentes fases del proyecto y las actividades que tuvieron lugar durante el desarrollo de este y la valoración de las incidencias en el entorno.

El segundo componente presenta los productos elaborados de acuerdo con su tipología.

El tercer componente es la reflexión crítica y ética de la experiencia, el reconocimiento de las competencias y los aprendizajes profesionales que el estudiante desarrolló en el transcurso de su labor.

Resumen

El presente PAP continua con las investigaciones realizadas durante verano 2022, donde se investigó teóricamente los comportamientos mecánicos de distintos *infills* hexagonales para su posterior aplicación en una prótesis de seno. El objetivo principal es proponer y estudiar un metamaterial que actúe como la parte interna de una prótesis de seno, para posteriormente recubrir con una mezcla de silicona. Para cumplir con el propósito del proyecto, se plantearon objetivos específicos: Investigar el estado de arte en el ámbito de los metamateriales y tejidos de la piel, definir e imprimir 3D un metamaterial para posteriormente realizarle pruebas mecánicas de compresión, definir y elaborar un recubrimiento para posteriormente realizarle pruebas de desgarre y finalmente caracterizar cualitativamente el comportamiento de ambos materiales en conjunto.

Para llevar a cabo lo anterior, se diseñaron y fabricaron probetas de silicona y TPU de acuerdo con las normativas ASTM D3574 y D624B. Posteriormente se les realizaron pruebas de compresión y desgarre respectivamente haciendo uso de una maquina universal Lloyd para pruebas mecánicas.

Se logro identificar la configuración más adecuada para el metamaterial con base en sus propiedades mecánicas de compresión. De igual forma, se identificó una mezcla de silicona adecuada para actuar como recubrimiento del metamaterial basado en las propiedades cualitativas identificadas y sus propiedades mecánicas ante el desgarre. Finalmente, con ayuda de un grupo focal se identificaron las áreas de oportunidad de mejora con respecto a la manera de impresión propuesta, para así ofrecer una configuración que provee sensaciones más cercanas a una mama real.

1. Ciclo participativo del Proyecto de Aplicación Profesional

El PAP es una experiencia de aprendizaje y de contribución social integrada por estudiantes, profesores, actores sociales y responsables de las organizaciones, que de manera colaborativa construyen sus conocimientos para dar respuestas a problemáticas de un contexto específico y

en un tiempo delimitado. Por tanto, la experiencia PAP supone un proceso en lógica de proyecto, así como de un estilo de trabajo participativo y recíproco entre los involucrados.

Se realizará una investigación comparativa de algunas de las prótesis ya existentes en el mercado, incluyendo propiedades como material, diseño, peso y precio, con el propósito de conocer las necesidades que debe cubrir una prótesis de seno. De igual manera, se investigarán el proceso de fabricación y las propiedades mecánicas de la espuma de TPU a diferentes densidades, así como la viabilidad de este material en la técnica de modelado por deposición fundida (FDM), que permita la manufactura de prótesis externas de seno con dimensiones personalizables.

A la par, se investigarán las propiedades mecánicas y viscoelásticas de la piel con el fin de definir un material con propiedades similares para utilizar como recubrimiento de la prótesis externa, para aproximar las características ópticas y táctiles de la prótesis a las de una mama real. El proyecto se realizará en ITESO, en el Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, con la tutoría de la Dra. Gabriela Porras Quevedo y la Dra. Blanca A. Valdivia Urdiales como las asesoras del proyecto.

Objetivo general

Diseñar y caracterizar un metamaterial que cumpla con los requerimientos mecánicos, cosméticos y funcionales de una mama de tal forma que mimetice las propiedades de los tejidos internos y externos para su aplicación en prótesis de mama externa.

Objetivos específicos

- Investigar las propiedades de los tejidos de la piel y el estado del arte de metamateriales y materiales propuestos para realizar prótesis ya propuestos.
- Proponer una celda unitaria con tamaño y densidad relativa que cumpla con los requerimientos funcionales de una mama.
- Imprimir probetas con la estructura propuesta utilizando impresión 3D
- Realizar pruebas de tensión y compresión al metamaterial propuesto

- Proponer un recubrimiento externo al metamaterial propuesto que mimetice la sensación de la mama.
- Elaborar probetas con distintas formulaciones para variar su dureza
- Realizar pruebas de tensión y desgarre al recubrimiento de piel según las normativas correspondientes

1.1 Entendimiento del ámbito y del contexto

El conocimiento de los tejidos mamarios y sus propiedades mecánicas son de suma importancia para el desarrollo adecuado de técnicas como cirugías plásticas de reconstrucción de seno o para el diseño de implantes. Como se observa en la Figura 1, la piel está compuesta por capas: la capa más externa es la epidermis, seguida de la dermis y finalmente le tejido subcutáneo. Internamente, la mama está compuesta principalmente por tejido glandular y tejido adiposo, cuyas propiedades se reflejan en la Tabla 1 [1, 2].

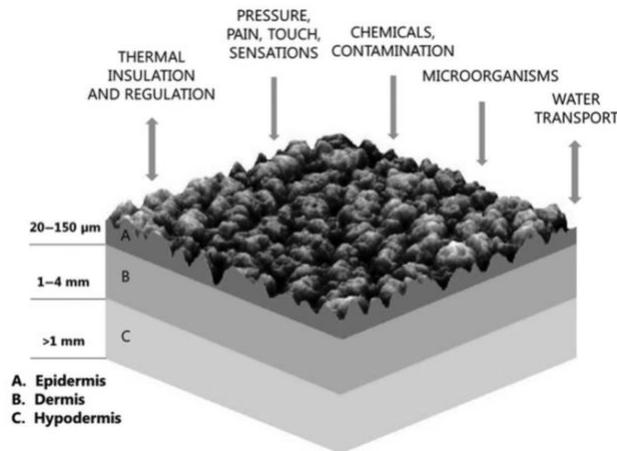


Figura 1. Esquema de la estructura de la piel humana y sus principales interacciones [3].

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los principales tejidos del seno [4, 1]

	Módulo de elasticidad (kPa)
Tejido externo	
Epidermis	1000
Dermis	88-300

Tejido subcutáneo	34
Tejido interno	
Tejido glandular	7.5-66
Tejido adiposo	0.5-25

Los modelos físicos de piel buscan replicar el comportamiento de la piel, pero debido a que su estudio de forma *in vivo* es un proceso muy complicado, las propiedades físicas de estos modelos no son representadas con precisión, esta clase de emuladores de piel se caracterizan por su estabilidad en un largo periodo de tiempo, fácil almacenamiento y mejor control sobre sus propiedades, permitiendo que sean reproducibles y fiables, facilitando su producción en masa [3].

Los modelos físicos de piel son utilizados en ámbitos como imágenes ópticas, medición de tasas de absorción específica, administración de fármacos, penetración de aguja, imágenes acústicas y fotoacústicas, pruebas táctiles, fricción y prótesis [3]. Para fines de la presente investigación, el interés principal de estos modelos es en el ámbito de prótesis externas. Los factores determinantes al escoger una prótesis de seno externa son la sensación al tacto, la función, el costo, la forma y tamaño [5].

El material más utilizado para la fabricación de prótesis externas de seno es la silicona, cuyas propiedades se reflejan en la Tabla 2. Sin embargo, también existen prótesis fabricadas con espuma de poliuretano, que las vuelve más ligeras y frescas que sus contrapartes [6]. Ejemplo de prótesis se observan en la Figura 2.

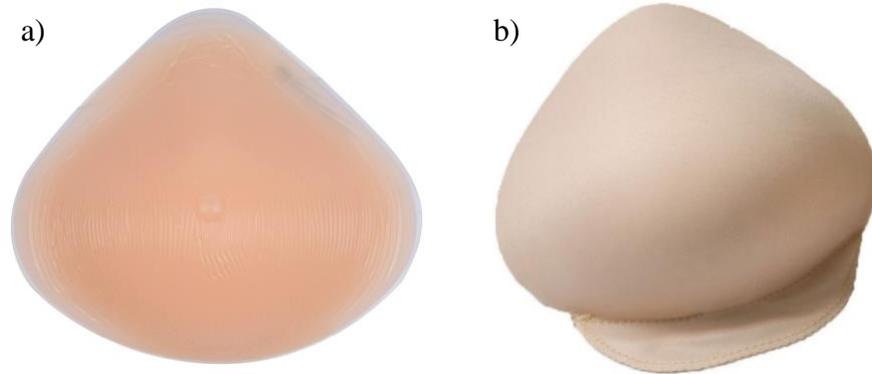


Figura 2. Ejemplos de prótesis de seno existentes en el mercado: a) prótesis de silicón, b) prótesis de espuma de poliuretano recubierta de poliéster [7, 8].

Tabla 2. Propiedades mecánicas de ELASTOSIL® P [9]

	A	B
Densidad (g/cm³)	1.08	1.07
Viscosidad (mPa·s)	2000	3000
Dureza Shore A	12	
Dureza Shore 00	60	
Tensión de rotura (MPa)	3	
Elongación a la ruptura (%)	600	

Ya existen tecnologías para fabricar prótesis de mama personalizadas, que consisten en el escaneo 3D de la mama saludable, para posteriormente fabricar una prótesis a la medida de alguno de los materiales anteriores. La integración del método de FMD (modelado por deposición fundida por sus siglas en inglés), también conocido como impresión 3D, presenta la oportunidad de producir prótesis personalizadas utilizando materiales de bajo costo y ligeros.

El TPU (poliuretano termoplástico por sus siglas en inglés) es un termoplástico flexible, cuyas propiedades mecánicas (Tabla 3) como su bajo módulo de Young permiten su uso en aplicaciones para prótesis impresas en 3D [10]. En conjunto con las propiedades de este filamento, la implementación de un metamaterial de TPU para la impresión de la estructura

interna de una prótesis de seno permitiría la fabricación de prótesis hechas a medida, resistentes a tensión y compresión, a la vez que manteniendo un bajo peso.

Tabla 3. Propiedades mecánicas del TPU para direcciones de impresión XY, YZ y Z [11]

	XY	YZ	Z
Módulo de Young (MPa)	67 ± 6	67 ± 2	56 ± 3
Tensión de rotura (MPa)	23.7 ± 2.1	37.9 ± 1.6	6.4 ± 0.5
Elongación a la ruptura (%)	>560%	>700%	$82.3 \pm 18.4\%$
Densidad (g/cm³)	1.22		

Los metamateriales son estructuras formadas por patrones de celdas unitarias que pueden llegar hasta al rango de los nanómetros. Los avances en el campo de *additive manufacturing* han permitido fabricar materiales celulares con arquitecturas complejas que exhiben propiedades, comportamientos y deformaciones que no se observan en materiales en bulto. A diferencia de los materiales convencionales, los metamateriales presentan buenas propiedades mecánicas sin presentar una alta densidad.

Uno de los parámetros que modifica el comportamiento de los metamateriales es la densidad relativa, que se define como la relación entre la densidad del material celular y la densidad de un sólido hecho del mismo material. El comportamiento mecánico del material también cambia si el material es de celda cerrada, formados por planos, o de celda abierta, formados por vigas con un arreglo tridimensional [12].

Un ejemplo de una estructura de celdas abierta es la celda Kelvin (Figura 3), que es una celda con forma de octaedro truncado cuya superficie se compone de 6 cuadrados y 8 hexágonos cuyas aristas son todas de la misma longitud. Este tipo de estructuras, debido a su geometría, presenta una alta absorción de energía y capacidad de deformación triaxial. Una estructura Kelvin fabricada con TPU (poliuretano termoplástico por sus siglas en inglés) presenta propiedades similares al caucho, como la resistencia a la compresión cíclica y a la deformación permanente, debido a la elasticidad del material y propiedades de la celda Kelvin [13].



Figura 3. Imagen renderizada de una celda Kelvin [13]

1.2 Caracterización de la organización

En el presente proyecto se busca desarrollar y caracterizar un metamaterial que posteriormente actúe como la parte interna de una prótesis de seno externa, así como piel sintética que posteriormente actúe como recubrimiento de dicho metamaterial. La investigación actual es una continuación de PAP I realizado durante verano 2022.

Este es un proyecto realizado en las instalaciones de ITESO bajo la supervisión de la Dra. Gabriela Porras Quevedo, la Dra. Blanca A. Valdivia Urdiales y la Dra. Ramona Beatriz Alemon Galindo. De igual forma se harán uso de instalaciones específicas como lo son los laboratorios de ingeniería industrial, laboratorios de química y laboratorios de síntesis de nanomateriales.

1.3 Identificación de la(s) problemática(s)

Anualmente y de manera global 1.38 millones de personas son diagnosticadas con cáncer de mama, cantidad que sigue en aumento. En la mayoría de los casos se es necesaria una intervención quirúrgica en conjunto con otros tratamientos, como la quimioterapia o la terapia hormonal, siendo el más frecuente la mastectomía, debido a que durante este procedimiento se retira la mama afectada evitando así una futura propagación del cáncer.

Al experimentar el tratamiento anteriormente mencionado, se sufren cambios en la apariencia personal, específicamente en el área de los senos, lo que ocasiona entre las mujeres un cambio de autopercepción y disminución del sentimiento de feminidad, lo que causa posteriormente ansiedad y depresión. Debido a estas consecuencias, la rehabilitación después del tratamiento es de suma importancia para la salud de las mujeres.

Al ser costosa una cirugía de reconstrucción de seno, el uso de prótesis de seno externa es una alternativa más accesible económicamente para las mujeres. Estas prótesis tienen forma de seno y buscan reemplazar el seno natural, ayudando no solo la autoestima, sino también la postura. Existen dos clases de prótesis, la convencional y la adhesiva, la selección ya dependerá de la preferencia de cada una de las mujeres. Aunque el uso de prótesis externas de seno significa un menor costo en comparación a una cirugía reconstructiva, los costos continúan siendo altos [14].

A raíz de la problemática mencionada anteriormente, durante este PAP se busca encontrar un metamaterial con recubrimiento que imite las propiedades de la piel para su aplicación en la elaboración de prótesis de seno externa que pueda fabricarse con un menor costo ofreciéndoles así a las mujeres afectadas una alternativa para recuperar su imagen corporal y autoestima sin tener que invertir altas cantidades monetarias.

1.4. Planeación de alternativa(s)

A pesar de que existen alternativas para las mujeres que se ven sometidas a una mastectomía, como lo son la reconstrucción de seno, o el uso de prótesis internas de seno, nosotros decidimos enfocarnos en el desarrollo de materiales que posteriormente se utilizaran en una prótesis de seno externa, ya que buscamos que con este material puedan fabricarse prótesis que no sólo tengan propiedades similares a las de un seno, sino que, aprovechando las ventajas que ofrece la técnica de FDM, también puedan fabricarse con formas y tamaños personalizados.

Diseño de celda Kelvin en SolidWorks

Con el propósito de realizar probetas con la estructura Kelvin para su posterior caracterización, se modela una celda Kelvin unitaria con parámetros ajustables utilizando el programa SolidWorks, que pueda teselarse para llenar el volumen de las probetas. Los parámetros considerados en este modelo se observan en la Figura 4, y se definen como: ℓ , la longitud de las aristas de la celda; d , el diámetro de los cilindros que conforman las aristas y r el radio de redondeo de los vértices, o conexiones de las aristas.

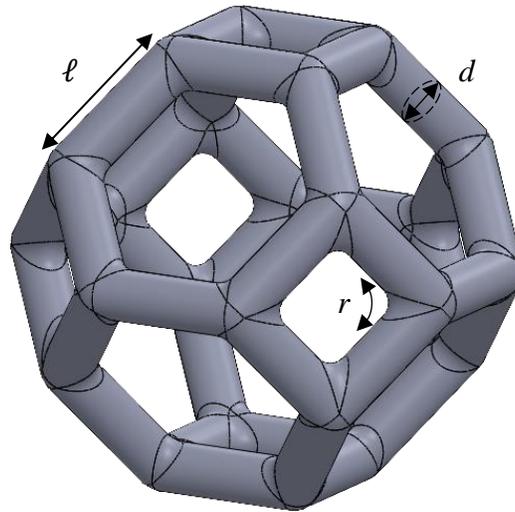


Figura 4. Celda Kelvin y sus parámetros

Para determinar el comportamiento teórico de una combinación de estos parámetros, se calcula la densidad relativa (ρ_R) de la celda, que se define como:

$$\rho_R(\ell, d, r) = \frac{V_{\text{celda}}(\ell, d, r)}{8\sqrt{2}\ell^3}$$

Donde V_{celda} es el volumen ocupado por la celda, calculado con el programa SolidWorks, y $8\sqrt{2}\ell^3$ es el volumen de un octaedro truncado sólido con el mismo valor de ℓ . Para propósitos de una estructura con baja resistencia a la tensión y a la compresión, así como menor peso y uso de material, se busca una estructura con una baja densidad relativa, por lo que la combinación de los parámetros establecidos busca minimizar la densidad relativa de la celda unitaria.

Diseño de probetas

Para realizar la evaluación mecánica del metamaterial, se realiza el diseño de las probetas en el programa SolidWorks, siguiendo las formas y dimensiones establecidas en la normativa ASTM D3574, que concierne a espumas de uretano. Para la prueba de tensión, se utiliza una probeta con forma y dimensiones establecidas en la siguiente figura:

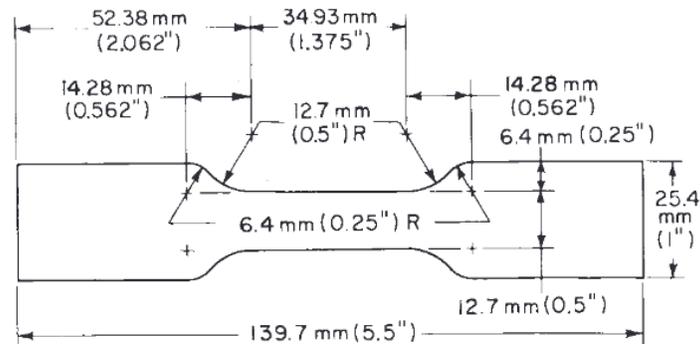


Figura 5. Dimensiones de la probeta para prueba de tensión [15]

Para compresión, se utiliza una probeta con dimensiones de 50 mm × 50 mm × 25 mm. En ambos casos, el volumen de la probeta se diseña en SolidWorks y se le aplica la estructura Kelvin como *infill*.

Impresión de probetas

Utilizando una impresora 3D Makerbot Replicator Z18 y filamento de TPU Ninjaflex, se imprimen 10 probetas de tensión y 10 probetas de compresión por medio de la técnica de FDM. Las probetas se imprimen utilizando un tamaño de extrusión de 0.4 mm y una resolución de capa de 0.1 mm [15].

Pruebas mecánicas a las probetas

Se realizan pruebas de tensión a cada una de las probetas impresas siguiendo la prueba E de la normativa ASTM D3574. En ésta, las mordazas de la máquina universal se configuran para estirar la probeta con una velocidad de 500 mm/min, y se registran los esfuerzos a las elongaciones correspondientes. Al finalizar la prueba, se mide la elongación a la ruptura en múltiplos de 10%.

Las pruebas de compresión se llevan a cabo de acuerdo con la prueba C de la misma norma. En esta prueba, las probetas se comprimen hasta el 75%-80% de su grosor original a una velocidad de 250 mm/min y posteriormente se dejan reposar durante 6 ± 1 min. A continuación, se mide el grosor de la probeta al aplicar una carga de 140 Pa al área de la probeta, y finalmente se comprime la probeta al 50% de su grosor a 50 mm/min y se determina la fuerza final después de 60 ± 3 s .

Síntesis de piel sintética basada (monocapa y multicapa).

Se realizan dos tipos de piel sintética, una monocapa utilizando solamente silicona, y otra que mediante síntesis química se desarrolla una piel sintética multicapa (simulando así la estructura de la piel humana) conformada por Polidimetilsiloxano (PDMS) y Dicrilato de Polietilenglicol (PEGDA), basándose en la metodología propuesta por Zhang et al. Para ambas pieles, se variarán las concentraciones de los reactivos con la finalidad de observar cómo afecta esto en las propiedades de la piel sintética, así como encontrar las formulaciones que mejor mimeticen a la piel humana [16].

Pruebas cualitativas a la piel sintética

Se realiza una primera caracterización cualitativa de las probetas de piel sintética multicapa desarrollada, donde con el uso de la fuerza propia se estiran las probetas, esto con la finalidad de observar de una manera rápida y eficiente si la probeta resiste tal fuerza. Las probetas que resistan de manera adecuada tal fuerza, se les realizara posteriormente las pruebas debidas bajo las normativas ISO 37 (resistencia a la tracción y alargamiento a la ruptura) y ASTM D 624 B (resistencia al desgarro). Se repite el mismo proceso para la piel sintética monocapa desarrollada.

Probetas estándar para pruebas a piel sintética

Para realizar una correcta caracterización de la piel sintética, se deben seguir las normativas adecuadas, en este caso las normativas a utilizar son las que se mencionaron anteriormente. Para la prueba de desgarro, que es el principal interés de esta investigación, se modelaron las probetas siguiendo el estándar ASTM D 624 B, utilizando una probeta tipo DIE B, con la forma y las dimensiones reflejadas en la Figura 6 Y Tabla 4 Respectivamente:

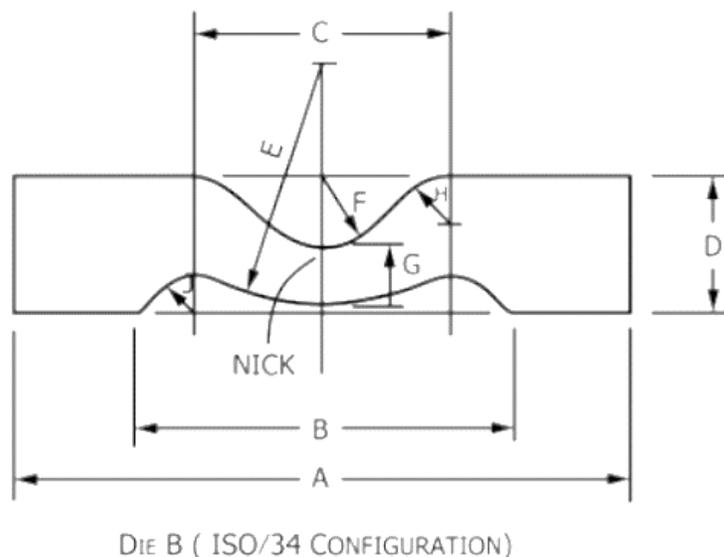


Figura 6. Diagrama de medidas de probeta ASTM D 624 B [17].

Tabla 4. Dimensiones del espécimen y tolerancias.

Dimensiones	Milímetros		Pulgadas	
	Valores	Tolerancia	Valores	Tolerancia
A	110	± 0.50	4.3	± 0.02
B	68	± 0.50	2.7	± 0.02
C	45	± 0.05	1.8	± 0.002
D	25	± 0.05	1	± 0.002
E	43	± 0.05	1.7	± 0.002
F	12.5	± 0.05	0.5	± 0.002
G	10.2	± 0.05	0.4	± 0.002
H	9	± 0.05	0.375	± 0.002
J	7.5	± 0.05	0.3	± 0.002
Mella^A	0.5	± 0.05	0.02	± 0.002

Traducido de ASTM internacional [17].

Para llevar a cabo la prueba de resistencia a la tracción y alargamiento a la ruptura, las probetas se realizaron bajo la normativa ISO 37, utilizando probetas de tipo, con la forma y las dimensiones reflejadas en la Figura 7 Y Tabla 5 respectivamente:

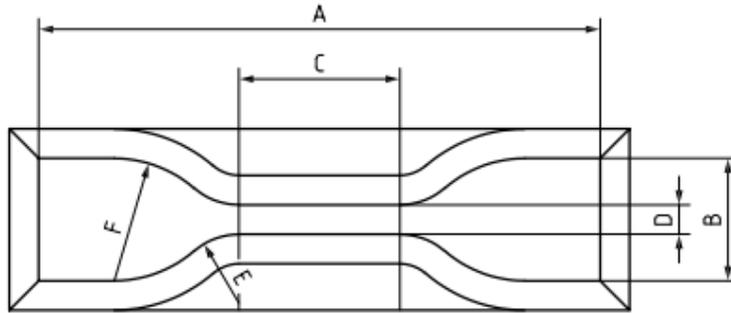


Figura 7. Diagrama de medidas de la probeta ISO 37 [18].

Tabla 5. Dimensiones del espécimen y los tipos de probetas.

Dimensiones mm	Tipo 1	Tipo 1A	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
A Longitud total (mínima) ^a	115	100	75	50	35
B Ancho de los extremos	25 ± 1	25 ± 1	12.5 ± 1	8.5 ± 0.5	6 ± 0.5
C Longitud de la porción angosta	33 ± 2	21 ± 1	25 ± 1	16 ± 1	12 ± 0.5
D Ancho de la porción angosta	6.2 ± 0.2	5 ± 0.1	4 ± 0.1	4 ± 0.1	2 ± 0.1
E Radio de transición exterior	14 ± 1	11 ± 1	8 ± 0.5	7.5 ± 0.5	3 ± 0.1
F Radio de transición interior	25 ± 2	25 ± 2	12.5 ± 1	10 ± 0.5	3 ± 0.1

^a Puede ser necesaria una mayor longitud total para garantizar que solo las lengüetas del extremo ancho entren en contacto con las mordazas de la máquina, evitando así las “roturas de hombros”

Traducido de ISO internacional [18].

Caracterización de las muestras de piel sintética

Se realiza la prueba de desgarre de la piel sintética basada en PDMS y la piel sintética basada en silicón utilizando la máquina para prueba de tensión estableciendo una tasa de desplazamiento constante de 500 ± 50 mm/min [17].

Las pruebas de resistencia a la tracción y alargamiento a la ruptura se llevan a cabo de igual forma en la máquina para prueba de tensión estableciendo una tasa de desplazamiento constante de 500 ± 50 mm/min, proceso igual al de la prueba de desgarre, cambiando solo el tipo de probetas que se utilizan [18].

Grupo focal (focus group)

Posterior a la realización de las pruebas mecánicas a la piel sintética y al metamaterial, se fabrica un producto con la finalidad de presentar en un *focus group* y escuchar opiniones ajenas al proyecto con respecto a la combinación de la piel sintética propuesta con el

metamaterial en su interior, similar a la forma en que se encontrarían en una prótesis de mama externa.

El producto que se presentará en la actividad del *focus group*, consistirá en una semi esfera donde el interior de este estará conformado por el metamaterial impreso con TPU en 3D recubierto con una delgada pared del mismo material, y estará recubierto por una capa de mezcla de silicona con un grosor de 5 mm.

El molde que se utilizara para el desarrollo del producto se fabricó por impresión 3D con resina UV, dicho molde se observa en la siguiente figura:



Figura 8. Molde para fabricar producto de grupo focal.

A continuación, se presenta el cronograma con el desglose de actividades que se tienen planteadas para llevar a cabo satisfactoriamente el proyecto, previendo así los tiempos necesarios para realizar cada objetivo esperado. Posteriormente se presenta otra tabla donde se muestran las abreviaturas de los recursos que se utilizan y se muestran en el cronograma.

Tabla 6. Cronograma de actividades previstas para la realización del proyecto.

Método de evaluación de mallados en probetas	Recursos	Encargado	Tiempo (días)	Agosto			Septiembre				Octubre			Noviembre				Diciembre
				Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13	Semana 14	Semana 15
Planeación																		
Investigación general sobre lo que es un metamaterial y su uso en prótesis	TP	IV, PV	35															
Investigación sobre celdas específicas con metamateriales	TP	IV	6															
investigación piel sintética en el ámbito medico	TP	PV	6															
Investigación de pruebas mecánicas respectivas y las normativas que las rigen	TP	IV, PV	2															
Determinación del tipo de celda a imprimir en 3D	TP	IV	7															
Establecer metodologías para síntesis de piel sintética, apartar laboratorios y conseguir reactivos	TP, AB, AG	PV	7															
Diseño CAD de probetas de metamaterial,	SW, AB, AF,	IV	28															
impresión 3D y pruebas mecánicas	I3D, LIN																	
Síntesis de piel sintética, diseño y obtención de moldes para probetas con medidas estándar y pruebas mecánicas debidas	LQ, LSN, AB, AG, LIN	PV	28															
Investigación respecto a la adhesión del metamaterial y la piel sintética	TP	IV, PV	7															
Desarrollo de probetas adheridas de metamaterial y piel sintética y pruebas mecánicas correspondientes	LQ, LSN, I3D, AB	IV, PV	7															
Correcciones finales a RPAP y entrega	TP	IV, PV																
Presentación RPAP	TP	IV, PV	1															

Tabla 7. Significado de las abreviaturas utilizadas para identificar los recursos utilizados en el cronograma de actividades.

Recursos utilizados	
Abreviatura	Significado
TP	Trabajo personal
AF	Asesoría M.I.M Fermín Castro
AG	Asesoría Dra. Gabriela Porras
AB	Asesoría Dra. Beatriz Alemon
I3D	Impresión 3D
SW	Simulación Solid Works
LIN	Laboratorio Industrial
LQ	Laboratorio Química
LSN	Laboratorio Síntesis de Nanomateriales
IV	Israel Vargas
PV	Paulina Veloso

1.5. Desarrollo de la propuesta de mejora

Elaboración de probetas estándar en SolidWorks

Se utilizó el programa SolidWorks para crear un modelo de las probetas de compresión con las dimensiones anteriormente establecidas. Modificando los parámetros ℓ , d y r , se crearon 6 probetas distintas para posteriormente ser impresas. Los parámetros para cada celda se observan en la Tabla 8:

Tabla 8. Parámetros ℓ , d , r y densidad relativa de las probetas de compresión

Probeta	ℓ (mm)	d (mm)	r (mm)	V_{celda} (mm ³)	ρ_R
A	7.5	2.5	0.8	9613.9073	0.0852
B	6	2.5	0.8	12199.6804	0.1081
C	6.5	2.5	1.25	10471.5197	0.0928
D	7	2.5	1.25	10948.0347	0.0970
E	7	1.25	1	2838.3883	0.0251
F	7	1.5	1	4013.6855	0.0356

Una vez definidos los parámetros, se modelaron las probetas en el programa SolidWorks, ilustradas en la Figura 9, añadiendo una pared y base con un grosor de 1 mm para delimitar el volumen normativo de las probetas y proveer una estructura sólida para facilitar la impresión de cada capa.

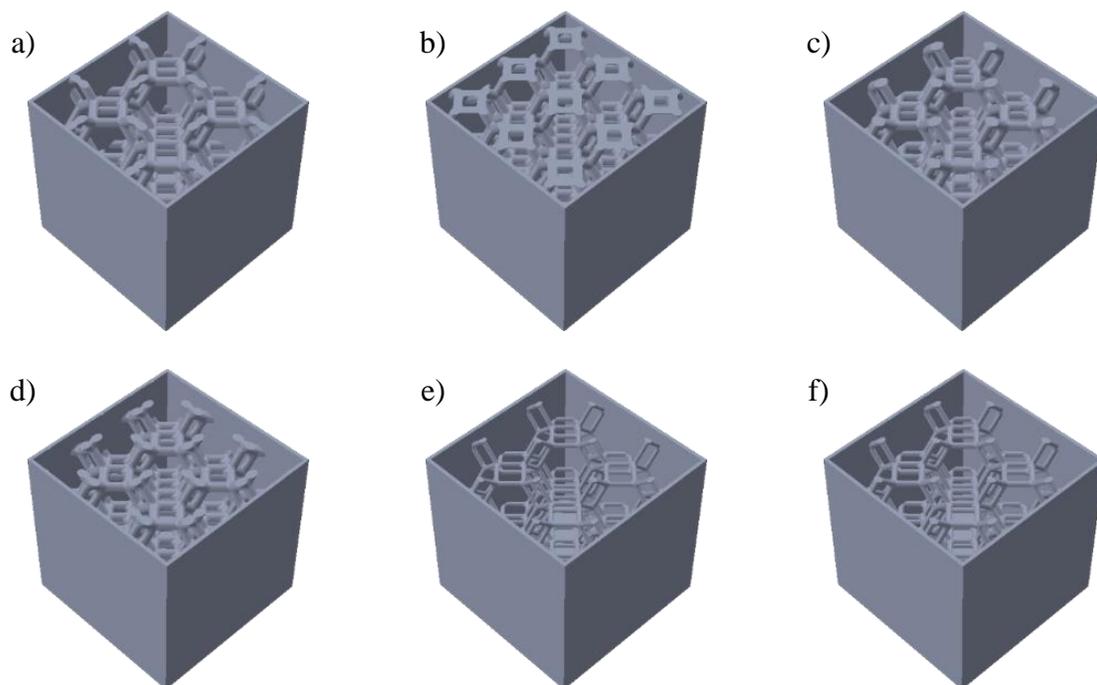


Figura 9. Probetas de compresión a) A, b) B, c) C, d) D, e) E, f) F elaboradas en SolidWorks

Impresión de probetas para pruebas mecánicas

Para realizar la impresión de las probetas, Se utilizó una impresora BCN3D Sigma y filamento de TPU marca Ultimaker de 2.8 mm. Inicialmente, se utilizó una configuración de impresión para TPU previamente definida por el Profesor César Real Díez Martínez, establecida en la Tabla 9:

Tabla 9. Configuración 1 para impresión de probetas

Ancho de extrusión	0.43 mm
Distancia de retracción	12.00 mm
Tamaño de capa	0.2000 mm
Porcentaje de infill	100%
Temperatura de cama	50 °C
Velocidad de impresión por defecto	30 mm/s
Ajustar velocidad de impresión para capas inferiores a	5 s

Permitir reducciones de velocidad hasta	20 %
--	------

El resultado de la impresión de las probetas A y B utilizando la configuración previa se observa en la Figura 10:

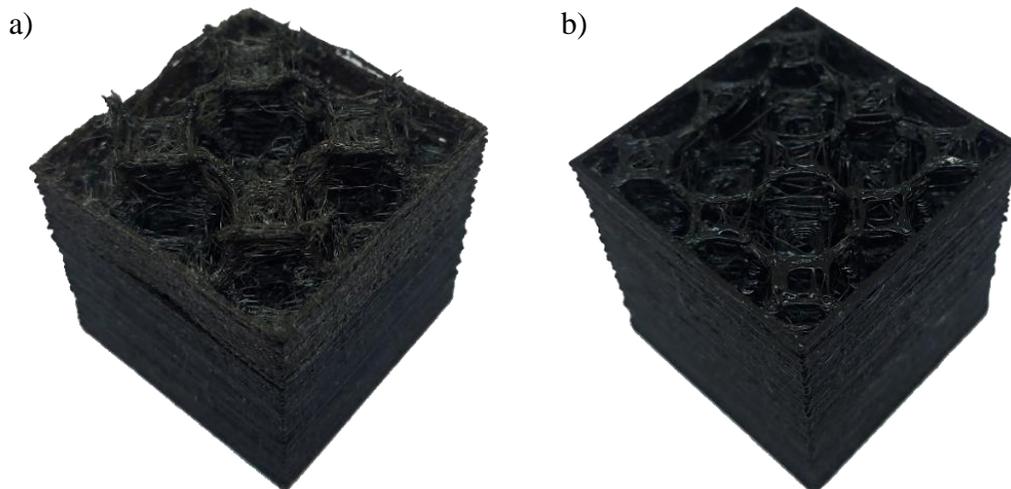


Figura 10. Probetas de compresión a) A y b) B, impresas con la configuración 1

Estas probetas presentaron defectos de impresión notables, como desalineación de las capas de la pared, *stringing*, que se refiere a los hilos delgados entre partes sólidas, delaminación o separación de capas en el caso de la probeta A, exceso de material en la figura B, así como un deterioro de la calidad de impresión progresivo en dirección z, derivado de la baja definición de capa y que resultó en partes incompletas de la estructura al acercarse a la capa superior de las probetas.

Se determinó que la calidad de la impresión se vio afectada por la configuración de impresión implementada, que fue formulada para piezas con deposición continua, por lo que se realizaron pruebas para mejorar la fidelidad de la impresión. Así, se realizó una segunda configuración que se aplicó al imprimir las probetas C, D, E y F, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10. Configuración 2 para impresión de probetas

Ancho de extrusión	0.43 mm
Distancia de retracción	Sin retracción
Tamaño de capa	0.2000 mm
Porcentaje de infill	100%
Temperatura de cama	50 °C
Velocidad de impresión por defecto	26 mm/s
Ajustar velocidad de impresión para capas inferiores a	0.5 s
Permitir reducciones de velocidad hasta	40 %

Posteriormente, con la configuración 2, se imprimieron las probetas antes mencionadas, que se observan en la Figura 11:

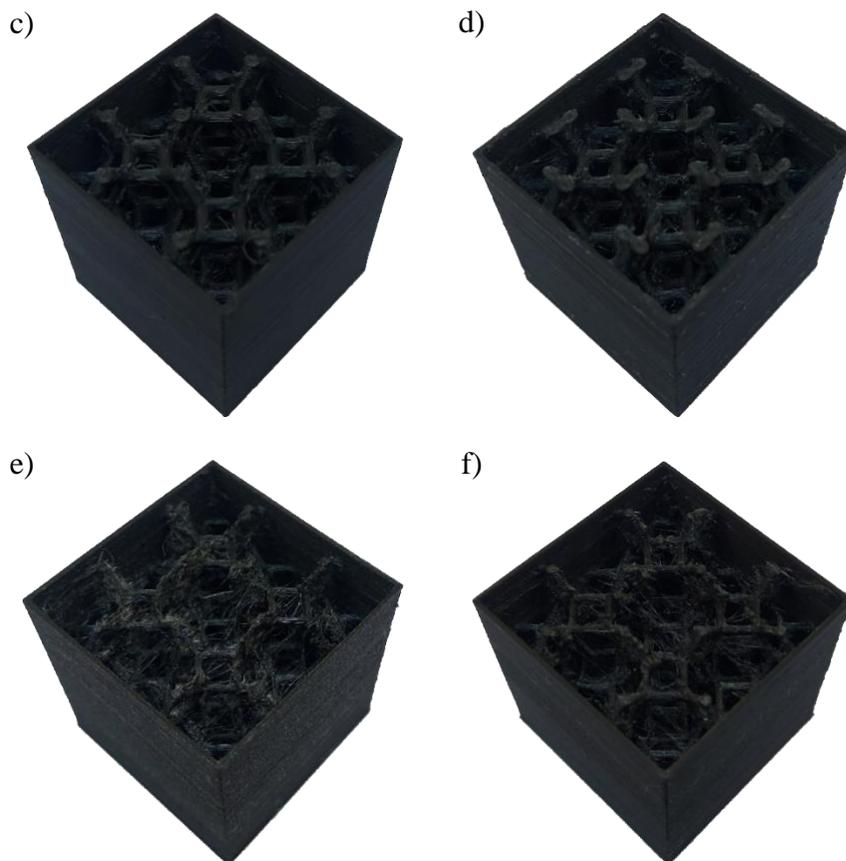


Figura 11. Probetas de compresión a) C, b) D, c) E y d) F, impresas con la configuración 2

Los cambios a la configuración, específicamente los ajustes a la velocidad de impresión, mejoraron la definición de capa y redujeron los defectos presentes en las probetas A y B, debido a que las deposiciones finas que conforman a las aristas se imprimieron de forma más lenta y precisa, aumentando la estabilidad de la estructura y disminuyendo los defectos de impresión en dirección z. Asimismo, la eliminación de las retracciones disminuyó en gran medida los hilos presentes en la probeta.

Debido a esto, se permitió la impresión de estructuras más delgadas, como las probetas E y F, con densidades relativas calculadas de 0.0251 y 0.0356 respectivamente. Un análisis táctil y mecánico de estas probetas muestra que los parámetros de sus estructuras permiten comprimirlos y estirarlos con facilidad al aplicar fuerza, por lo que las probetas de compresión E y F se eligieron para realizar las pruebas mecánicas posteriores.

Síntesis de piel sintética monocapa

Se compró caucho de silicona de calidad media en Resinas Guadalajara S.A. de C.V., esto debido a que era la única mezcla que contaba con diluyente (fluido de polidimetilsiloxano) y catalizador (peróxido de metil etil cetona) por separado, permitiendo así fabricar muestras con distintas composiciones. Esta clase de caucho de silicona es de tipo *2-Part-Room-Temperature* (RTV-2), que se refiere a composiciones de silicona que vulcanizan al momento que ambos líquidos vertibles son mezclados y usualmente curan a temperatura ambiente.

En la Tabla 2, se muestran las propiedades mecánicas del ELASTOSIL® P, silicona que se está utilizando como comparativa, esta silicona está conformada por dos componentes A y B, A es el caucho de silicona y B es el agente de curación, que en nuestro caso es el peróxido de metil etil cetona.

El tipo de reacción que se lleva a cabo durante la gelación de la silicona es un curado de condensación, donde conforme la reticulación se va propiciando, se va formando alcohol de subproducto, pero al ser de baja volatilidad, este se va evaporando rápidamente. En la siguiente figura se muestra el mecanismo del curado por condensación [19].

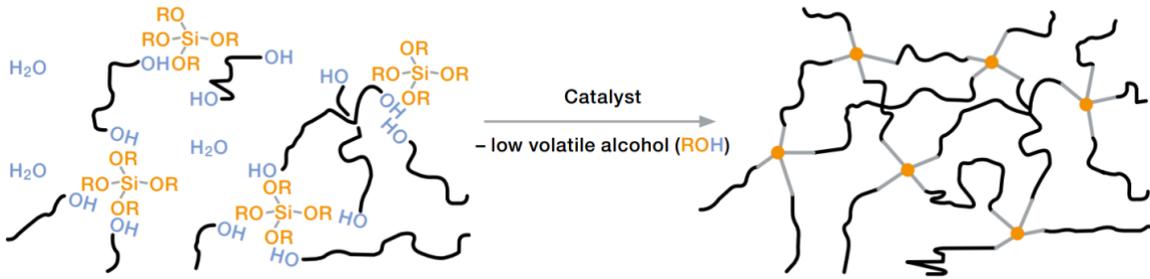


Figura 12. Curado por condensación para caucho de silicona RTV-2 [19].

Cabe resaltar que el fluido de silicona no participa en el curado durante la reacción, su función es incrementar la penetración del fluido, que se ve reflejado como composición más suave [20]. Es por esto que se decidió variar la cantidad de diluyente adicionada en las mezclas, y así observar la relación entre la concentración de diluyente y la suavidad de las muestras.

Se realizaron 4 muestras utilizando la composición proporcionada por el fabricante, siendo de 100 g de silicona, 20% de diluyente y 3% de catalizador. Para llevar a cabo dichas muestras, se compraron vasos de polietileno como se muestra en la siguiente figura:



Figura 13. Molde utilizado para fabricar muestras de silicona.

Se pesaron 25 g de silicona en cada vaso, adicionando 5 mL de diluyente y 0.75 mL de catalizador. Se mezclaron hasta obtener una mezcla homogénea y se dejaron gelar, obteniendo lo siguiente:



Figura 14. Muestras control con la composición recomendada por el fabricante.

A partir de los resultados anteriores, utilizando dichas 4 muestras como punto de control, se fabricaron 8 muestras más, variando la cantidad de diluyente adicionado en cada una de ellas, la composición de cada muestra se observa en la siguiente tabla:

Tabla 11. Composición de muestras de silicona variando la cantidad de diluyente adicionado.

Muestra	Silicona	Catalizador	Diluyente (mL)
5	25 g	0.75 mL	6.25
6			7.50
7			8.75
8			10.00
9			11.25
10			12.50
11			13.75
12			15.00

Las muestras obtenidas se observan en la siguiente figura:



Figura 15. Muestras de silicona con variación de mL de diluyente.

A partir de las mezclas anteriores, mediante un análisis táctil se observó que la muestra 12, con un 60% de diluyente mostraba suficiente suavidad para parecerse a una prótesis de seno externa, por lo que se seleccionó esa composición y se varió la cantidad de catalizador (hule) agregado. La composición de 4 muestras se observa en la siguiente tabla:

Tabla 12. Composición de muestras de silicón variando la cantidad de catalizador adicionado.

Muestra	Silicona	Diluyente	Catalizador (mL)
A	25 g	15 mL	0.50
B			1.00
C			1.25
D			1.50

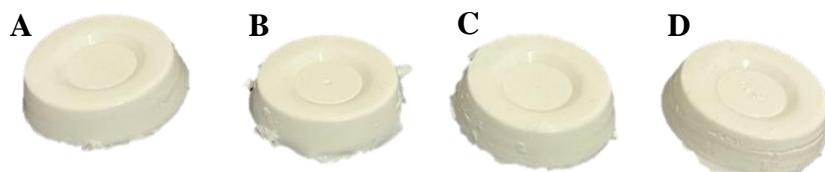


Figura 16. Muestras de con composición de 25g de silicona, 15 mL de diluyente y: A) 0.5 mL, B) 1 mL, C) 1.25 mL y D) 1.5 mL de catalizador adicionado.

A partir de las muestras de la Figura 16, se observó que los mL de catalizador adicionados si interfirieron en los resultados cualitativos de cada una. Tomando en consideración lo anterior y buscando observar el comportamiento cualitativo de la mayor cantidad de muestras, se decidió realizar 4 muestras más donde se varían nuevamente la cantidad de mL de diluyente adicionado, buscando obtener muestras más suaves que las anteriores y observar sus propiedades cualitativas de desgarre. La siguiente tabla muestra la composición de dichas muestras:

Tabla 13. Composición de muestras de silicona variando la cantidad de diluyente.

Muestra	Silicona	Catalizador	Diluyente (mL)
13	25 g	0.75 mL	16.25
14			17.50
15			18.75
16			20.00



Figura 17. Muestras de silicona con variación de mL de diluyente.

Mediante un análisis táctil, las muestras de la Figura 17 presentaron mayor suavidad que las muestras realizadas anteriormente. Lo que permite encontrar mayor rango de comparación táctil y proponer mezclas de interés para pruebas mecánicas.

Caracterización cualitativa de las muestras de silicona de monocapa

Con las muestras de silicona (4-12) ya fabricadas, se realizó la prueba cualitativa, donde se les aplicó fuerza a cada muestra, de las cuales la muestra 8 y la muestra 12 fueron las que se desgarraron.

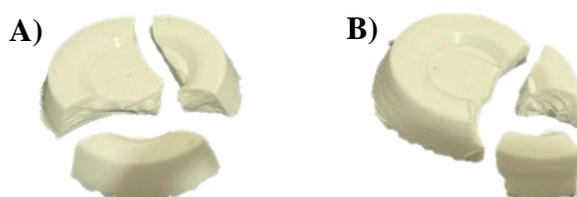


Figura 18. Muestras desgarradas al aplicar fuerza. A) Muestra 8 y B) Muestra 12.

Para el conjunto de muestras A-D, la muestra D, de mayor cantidad de mL adicionados, mostró un comportamiento de ruptura frágil; en cambio, la muestra A, con la menor cantidad de mL adicionados, mostró una ruptura de desgarre, comportamiento pertinente para la investigación.



Figura 19. Muestras desgarradas al aplicar fuerza. 1) Muestra A y 2) Muestra D.

Para el último grupo de muestras 13-16, si se observó una mayor suavidad en relación con el aumento de mL de diluyente adicionados, comportamiento que era de esperarse. Al aplicarles fuerza a estas muestras, todas llegaron a la ruptura, se cree que, debido a la suavidad, costo menor fuerza tensionarlas en comparación a muestras con una menor cantidad de diluyente.

Probetas estándar para pruebas a piel sintética

A partir de los resultados obtenidos por la caracterización cualitativa realizada a las distintas muestras, se seleccionaron tres composiciones para las probetas, optado por estudiar a mayor profundidad las composiciones de 60%, 70% y 80% de diluyente. Con dichas composiciones, se realizaron 4 probetas para cada una, probetas como las mostradas en la Figura 6 y haciendo uso de moldes de aluminio proporcionados por la Dra. Ramona Beatriz Alemón Galindo, para posteriormente llevar a cabo pruebas mecánicas de desgarre. Dichos moldes se observan a continuación:



Figura 20. Moldes para probetas de prueba mecánica de desgarre.

Al solo contar con dos moldes, el proceso de fabricación de las probetas era lenta, por lo que se descartó cualquier variación de catalizador debido a que los tiempos de gelación de las probetas iba a aumentar y no se contaba con una gran cantidad de tiempo. Las composiciones seleccionadas para las probetas se observan en la siguiente tabla:

Tabla 14. Composiciones seleccionadas para probetas de prueba de desgarre.

Probetas	Silicona	Catalizador	Diluyente (mL)
60%	25 g	0.75 mL	15.0
70%			17.5
80%			20.0

En total se obtuvieron 12 probetas, 4 para cada composición, en la siguiente figura se observa la probeta de silicona lista para la realización de la prueba mecánica de desgarre.



Figura 21. Probeta de silicón para prueba mecánica de desgarre realizada con moldes de aluminio.

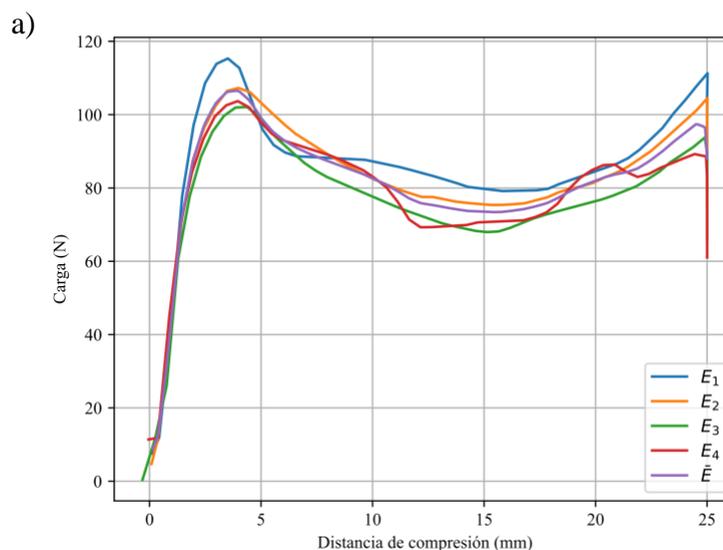
Caracterización de las muestras de piel sintética

Haciendo uso de una máquina universal Lloyd para pruebas mecánicas, se llevó a cabo la prueba mecánica de desgarre. Como se mencionó en la sección 1.4, se utilizó una tasa de desplazamiento de 500 ± 50 mm/min, y se tensó hasta el desgarre. La prueba se llevó a cabo para todas las probetas.

1.6. Valoración de productos, resultados e impactos

Resultados de compresión

A partir de los resultados obtenidos de las pruebas de compresión, se realizaron gráficas de carga-desplazamiento para cada probeta, como se observa en la Figura 22 a) y b). Igualmente, se promediaron los datos por tipo de probeta para producir una comparativa entre los comportamientos, como se observa en la Figura 22 c). Se omitió en las gráficas la prueba realizada a la probeta F₂ debido a que sufrió una ruptura durante ésta, produciendo una curva con comportamiento anómalo.



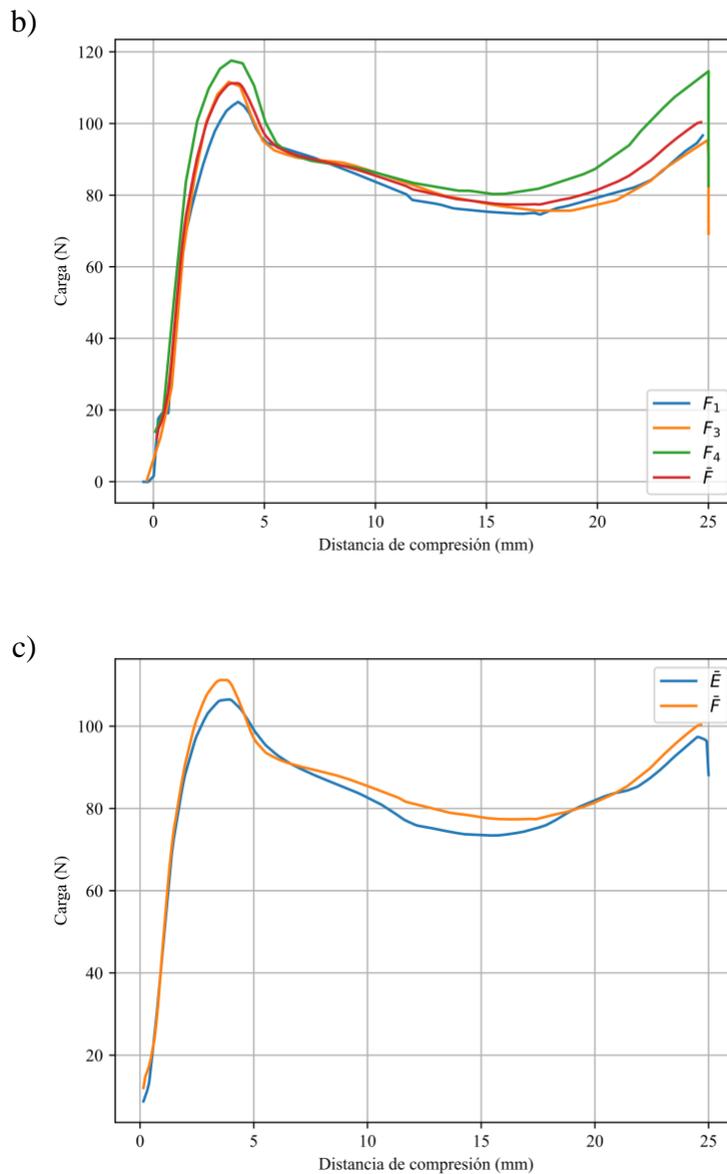


Figura 22. Gráficas de carga-desplazamiento de las probetas tipo a) E, b) F y c) E y F

Estos gráficos pueden dividirse en la región elástica, zona en que las probetas vuelven a sus dimensiones originales al retirar la carga, presentando un comportamiento elástico dictado por la ley de Hooke; y la región plástica, zona en la que la probeta presenta deformaciones plásticas o permanentes incluso después de retirar la carga, y que comienza al alcanzar el pico máximo de carga que se muestra en la Figura 22.

A partir de estos gráficos, pueden calcularse propiedades extensivas de las probetas, que son aquellas que dependen tanto del material utilizado, como del arreglo estructural de las

probetas. Las propiedades por analizar son: la carga última, máxima fuerza aplicada a las probetas antes de sufrir deformaciones plásticas; y el coeficiente de rigidez, que cuantifica la inflexibilidad de una estructura en respuesta a una fuerza uniaxial, y se describe con la siguiente ecuación:

$$k = \frac{F}{\delta}$$

Donde F es la carga aplicada a la probeta, medida en N, y δ es el desplazamiento, medido en m. A partir de las curvas carga-deformación promedio ilustradas en la Figura 22 c), se calcula que la carga última promedio de las probetas tipo E es de 106.50 N, y 111.24 N para las probetas tipo F. Asimismo, se obtiene el coeficiente de rigidez para ambas curvas, calculando la pendiente de la sección recta de la región elástica, cuyos valores se reportan en la Tabla 15:

Tabla 15. Propiedades mecánicas promedio en compresión de las probetas tipo E y F

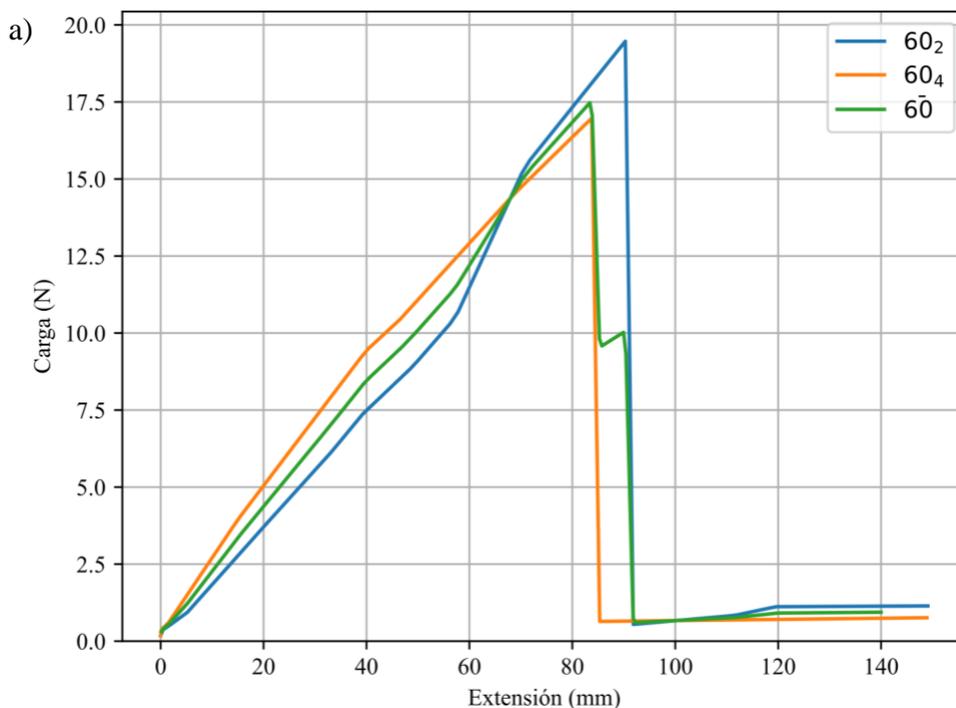
Propiedad mecánica	Tipo E	Tipo F
Carga última (N)	106.50	111.21
Compresión en la carga última (mm)	3.87	3.81
Coeficiente de rigidez (N/m)	61086.54	59291.64

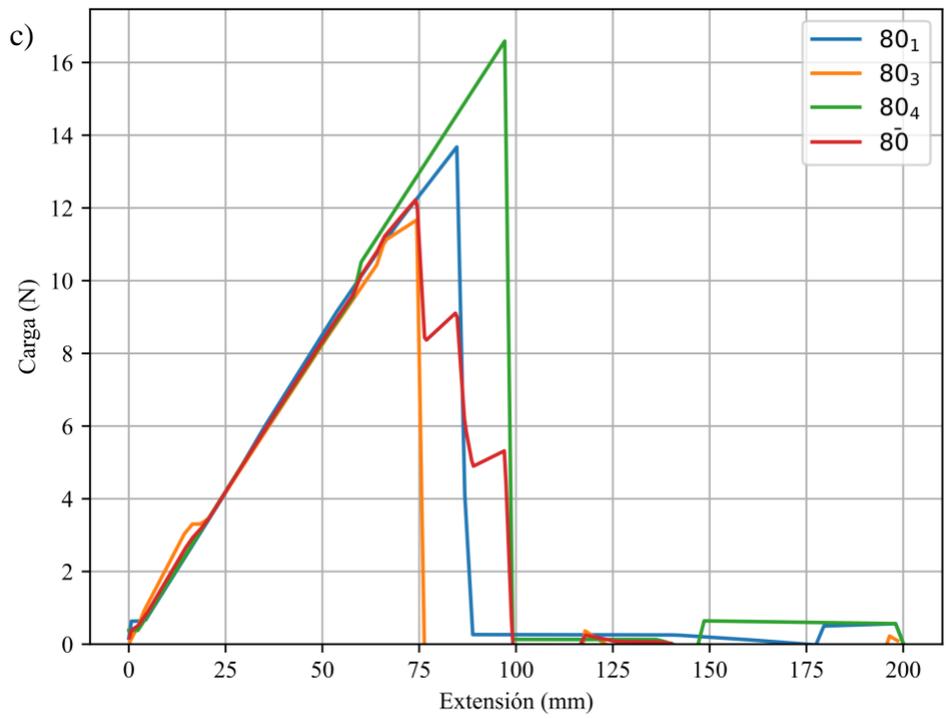
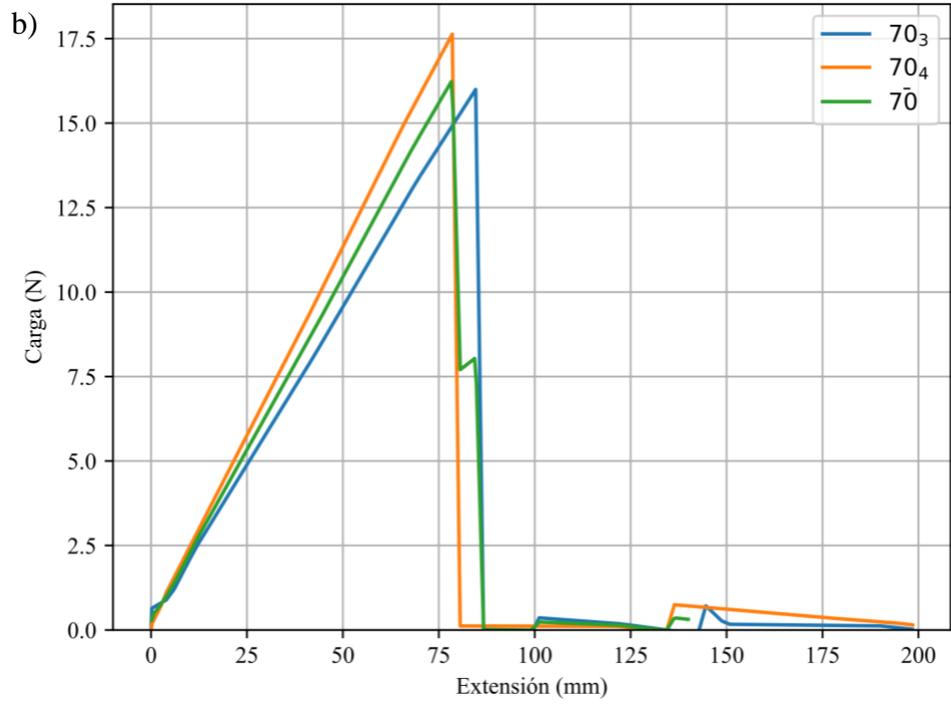
Como se observa, las probetas de tipo F presentaron una mayor carga última, es decir, este tipo de probetas resistieron una mayor fuerza antes de deformarse plásticamente, o de forma permanente, por lo que puede concluirse que son más resistentes que las probetas tipo E, presentando una distancia de compresión similar en el momento de alcanzar la carga última. Finalmente, a pesar de obtener valores aproximados, el coeficiente de rigidez fue menor en las probetas F, por lo que este tipo de probetas son más flexibles y resistentes en compresión que las probetas tipo E, por lo que se determina que la configuración F es la más adecuada para la fabricación de estructuras para prótesis externas de seno.

Es importante mencionar que las pruebas de compresión se realizaron en dirección del eje x . Debido a las propiedades anisotrópicas inherentes al método de fabricación, una caracterización completa requeriría también la caracterización en las direcciones y y z . Además, la pared utilizada para soporte de impresión pudo haber tenido una influencia en el comportamiento mecánico de las probetas, específicamente en las esquinas con ángulos rectos. Considerando que una de las probetas sufrió una ruptura en esta área, es posible que haya existido una concentración de esfuerzos importante en estas regiones, pero no fue posible determinar la influencia de las paredes en el comportamiento mecánico de las probetas en este proyecto.

Resultados de resistencia al desgarre

A partir de las pruebas de desgarre realizadas a las probetas de silicona, se realizaron graficas de carga-desplazamiento, como se observa en la Figura 23:





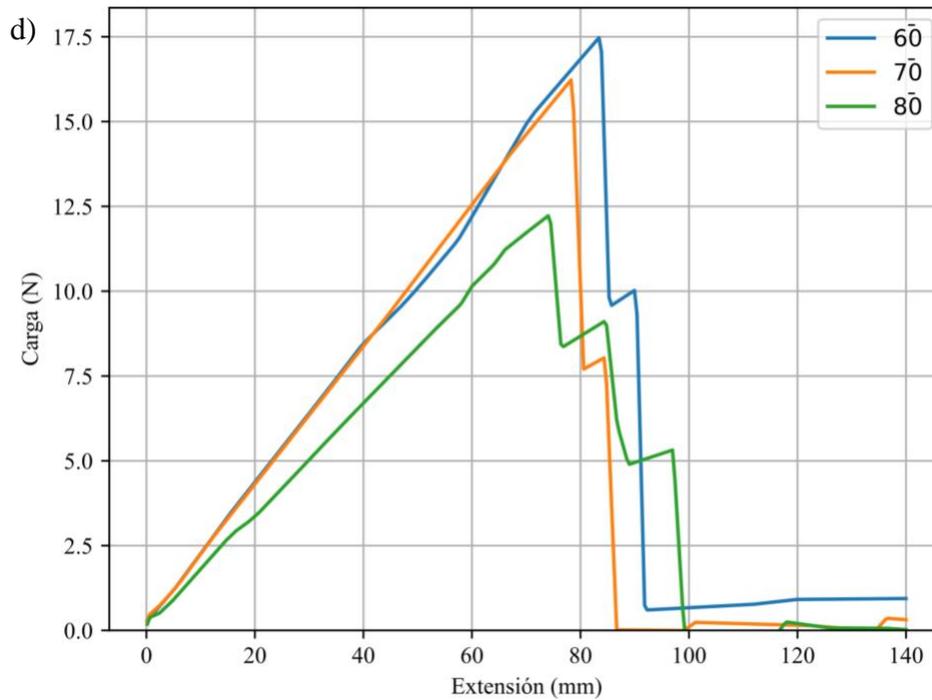


Figura 23. Gráficas de carga-desplazamiento de las probetas a) 60%, b) 70%, c) 80% y d) Promedio 60%, 70% y 80%.

Los resultados presentados en la Figura 23 muestran el comportamiento de la silicona ante el desgarre cuando la concentración de grupos silanos en la mezcla es variada. Las zonas de interés en cada gráfico son del inicio hasta el punto máximo de fuerza aplicado para cada probeta, esto debido que es el punto donde se da el desgarre de la pieza.

En la Figura 23 a) se observa el comportamiento carga-desplazamiento de las probetas que contienen un 60% de fluido de silicona. La Figura 23 b) y c) muestran el comportamiento de las probetas con un porcentaje de silicona de 70% y 80% respectivamente.

En la Figura 23 d), se muestra una comparativa promedio de las probetas, observando un comportamiento similar para las probetas de 60% y 70%, presentando 83.41 y 78.26 mm de extensión máxima respetivamente. En cambio, la probeta de 80% presenta una extensión menor, siendo de 74.05 mm.

No solo es relevante la extensión máxima promedio para cada una de las probetas, sino también la fuerza necesaria para llevar a cabo el desgarre de estas. Para las probetas de 60% y 70% nuevamente se obtuvieron valores similares, siendo de 17.47 y 16.23 N respectivamente, en cambio para la probeta de 80% se vio un cambio significativo, siendo de 12.22 N.

Por el comportamiento mostrado en la Figura 23 d) entre las probetas de 60% y 70%, donde se ve una relación lineal, se esperaba que la probeta de 80% mantuviera esa linealidad, pero en cambio, se mostró un decrecimiento no lineal, del cual se supone que la relación entre la cantidad de fluido de polidimetilsiloxano añadida en la mezcla y la carga soportada anterior al desgarre no es lineal.

A partir de los valores de F promedio de cada probeta, se calcula la resistencia al desgarre promedio utilizando la siguiente relación:

$$T_s = \frac{F}{d}$$

Donde F es la fuerza promedio necesaria para llevar al desgarre cada tipo de probeta, y d , es grosor promedio de las probetas, siendo de 5 mm aproximadamente. Es importante mencionar que para obtener los valores promedio de F para cada probeta, se descartaron las muestras que presentaron desgarre en otra zona que no fuera la central, como se observa en la siguiente figura:



Figura 24. Desgarre de la probeta: a) Incorrecto y b) Correcto.

Las probetas que presentaron una ruptura incorrecta y por ende se descartaron fueron 60₁, 60₃, 70₁, 70₂ y 80₂, razón por la cual sus curvas de carga-desplazamiento no se observan en la Figura 23.

Los valores de resistencia al desgarre que se obtuvieron para cada tipo de probeta son los siguientes:

$$T_{s60\%} = 3.5 \text{ kN/m}$$

$$T_{s70\%} = 3.3 \text{ kN/m}$$

$$T_{s80\%} = 2.4 \text{ kN/m}$$

Los valores de resistencia al desgarre de las probetas de 60% y 70% presentan valores muy acercados, teniendo entre ellas una variación de 0.2 kN/m , en cambio, la probeta de 80% presento una variación de aproximadamente $1 \pm 0.1 \text{ kN/m}$ en comparación a las otras dos probetas.

En la siguiente tabla se muestra de manera resumida las propiedades mecánicas promedio de las probetas estudiadas:

Tabla 16. Propiedades mecánicas promedio de las probetas 60%, 70% y 80%.

Propiedad mecánica	60%	70%	80%
Carga ultima (N)	17.23	16.23	12.22
Extensión máxima (mm)	83.41	78.26	74.05
Resistencia al desgarre (N/mm)	3.5	3.3	2.4

Al no contar con un valor de resistencia al desgarre para una mama, se usó como base comparativa el hule de silicona, utilizada en prótesis, ELASTOSIL® P. En la siguiente tabla, se muestran propiedades mecánicas del ELASTOSIL® P, una de ellas siendo la resistencia al desgarre, presentando valores en un rango de 2 a 13 N/mm .

Tabla 17. RTV-2 cauchos de silicona ELASTOSIL® P para prótesis.

Designación <i>ELASTOSIL® P</i>	Proporción de mezcla A:B	Viscosidad del componente A [mPa·s]	Viscosidad del componente B [mPa·s]	Tensión de rotura [N/mm²]	Elongación la rotura (%)	Resistencia al desgarre [N/mm]
7600	1:1	4000	2000	1.2	650	3
7670	1:1	1200	1400	1.9	580	3
7671	1:1	1500	1800	0.5	400	2
7676	1:1	1300	900	0.8	700	2
7683/25	1:1	1200	3500	1.5	650	5
7683/47	1:1	1700	1500	2.6	450	8

7684/40	1:1	1500	2300	2.2	670	8
7684/60	1:1	1400	2600	3.8	650	13
K 16	1:1	1700	2700	1.2	850	4

Traducido de Wacker Chemie AG [21].

Comparando los resultados obtenidos de las pruebas de desgarre presentadas en la Tabla 16 con la Tabla 17, se observa que existe una similitud de resistencia al desgarre con los cauchos de silicona 7600, 7670, 7671, 7676 y K16. Estas similitudes se encuentran dentro del rango de los requerimientos establecidos por los productos de ELASTOSIL® P, por lo que si existe una validez para la implementación como recubrimiento externo para una prótesis de mama externa.

Grupo focal

En busca de poder obtener información cualitativa de los materiales que se están proponiendo en este proyecto, se propuso realizar un *focus group*, donde se presentó un producto compuesto por ambos materiales. Para el producto a presentar, se tomaron en cuenta los resultados que se fueron obteniendo de las pruebas mecánicas llevadas a cabo para tanto el metamaterial como la silicona. De los resultados obtenidos se decidió realizar la capa externa del producto con la mezcla de silicona de 70% mostrada en la Tabla 14, puesto que presentaba comportamientos mecánicos similares a la probeta de 60% pero era más suave al tacto, y para la parte interior del producto, se eligieron los parámetros de la probeta E del metamaterial, parámetros que se encuentran en la Tabla 8, debido que utilizaba menor cantidad de material.

Se imprimió el metamaterial en forma de semiesfera, con un diámetro de 5 cm, con una capa que lo recubre de 1 mm, en la siguiente figura se presenta la impresión:



Figura 25. Interior de metamaterial para producto de grupo focal.

Posteriormente se le realizó el recubrimiento de silicona, obteniendo como resultado el siguiente producto:



Figura 26. Producto presentado en grupo focal.

Para la actividad del *focus group*, se contó la participación de 8 personas, de las cuales la mitad del grupo eran de sexo masculino y la otra mitad de sexo femenino. El rango de edad del grupo es de 19 a 24 años.

Para comenzar con la actividad, se comenzó dando una breve explicación sobre el proyecto y el propósito de este: “Proponer un metamaterial como parte interna y un recubrimiento de silicona como parte externa, para posteriormente fabricar prótesis externas de mama”. Ya que todos los participantes estaban conscientes del propósito, se les prestó el producto para que sintiesen el comportamiento de este, sintiendo la forma en que podían estrujar, así como la sensación de la capa externa de silicona en sus manos. Posteriormente, se les pidió que de manera breve comentaran que opinaban al respecto en comparación a una mama real.

De este grupo se obtuvieron opiniones bastante homogéneas entre los participantes, mostrando en general una reacción positiva al recubrimiento de silicona. Se comentó que a pesar de no presentar una similitud del 100% con una mama real, sí presentaba una similitud de sensación táctil. En cambio, el conjunto del recubrimiento con la parte interna conformada por el metamaterial y la delgada capa de 1 mm no fue de ningún agrado para los participantes del grupo puesto que no le permitía al metamaterial comportarse de la manera esperada, limitándolo a comportamientos uniaxiales en el eje x o en el eje y.

A raíz de dicho comportamiento del metamaterial, se ideó un nuevo producto para profundizar en las opiniones de los participantes. Se retiró el metamaterial recubierto dejando la silicona de la siguiente forma:



Figura 27. Recubrimiento de silicona sin el metamaterial.

Posteriormente, se les pidió a los participantes acomodar la silicona en una de las esquinas del siguiente metamaterial sin ninguna pared que limite su comportamiento, para así escuchar nuevamente las opiniones dentro del grupo.



Figura 28. Metamaterial sin pared de 1 mm.

Con el intercambio del interior del producto, la opinión general entre los participantes fue que sí presentaba una sensación más realista en comparación a la configuración anterior, permitiendo una compresión isotrópica, comportamiento esperado del metamaterial.

Conclusiones

A partir de lo anterior, se puede concluir que la pared utilizada para poder llevar a cabo la impresión 3D del material está limitando su comportamiento de compresión a una sola dirección, situación no ideal, puesto que es necesario que se permita la compresión isotrópica para que cumpla la función esperada. Es posible que otro método de fabricación basado en *additive manufacturing* que no requiera la adición de una pared mejore las propiedades mecánicas y la sensación al tacto de la estructura.

El principal resultado que se obtuvo del proyecto se presentó en la fase de investigación, al comprender el concepto y características de los metamateriales, así como la selección de la celda de interés para el desarrollo del proyecto, siendo en este caso la celda Kelvin. Seleccionar la estructura con base en el comportamiento mecánico reportado en la literatura fue un paso fundamental para el desarrollo del proyecto, y permitió escoger dicha celda como objeto de estudio debido a su alta absorción de energía y la capacidad de deformación triaxial.

Los resultados obtenidos por medio de pruebas de compresión permitieron la caracterización uniaxial de las probetas utilizadas, sin embargo, las limitaciones impuestas por el método de impresión escogido, como la calidad insuficiente y las estructuras de soporte, no permitieron obtener una verdadera aproximación de las propiedades mecánicas de una estructura Kelvin de celda abierta. De cualquier forma, las propiedades mecánicas reportadas sugieren que un metamaterial basado en celdas Kelvin es una propuesta adecuada para su implementación en prótesis externas de seno fabricadas con técnicas de *additive manufacturing*.

Otro resultado clave del proyecto, fue la selección de la composición para el recubrimiento, puesto que, como se presentó en los resultados del grupo focal, la sensación táctil cumplió el objetivo de mimetizar en parte la sensación de una mama real. Parte importante para obtener resultados en términos de composición de recubrimiento se debió a las pruebas cualitativas llevadas a cabo, ya que permitió poner en primer plano el análisis táctil, aspecto importante en las prótesis de seno externas.

Con respecto a los valores obtenidos para la resistencia al desgarre, el presentar similitud con cauchos de silicona ya comercializadas, asegura una funcionalidad en el campo de las prótesis, como los son las prótesis de seno externas. Habría que realizarse pruebas posteriores de tensión, para comparar los valores de elongación a la ruptura.

Trabajo a futuro

Como seguimiento al proyecto, a realizar en el periodo Primavera 2023, se espera llevar a cabo la propuesta de síntesis de un material basado en silicona multicapa que actúe como recubrimiento para prótesis de mama, así como la fabricación de probetas bajo la normativa

ASTM D624 B con dicho material multicapa. De igual forma se propone realizar una investigación con respecto a la resistencia al desgarre de una mama real, para así ofrecer un recubrimiento más acertado, pudiendo usar como base el artículo *On the tear resistance of skin*, publicado por Yang et al. [22]. Asimismo, se propone la investigación de métodos de manufactura alternativos que permitan el uso de materiales con mayor flexibilidad, mayor calidad de impresión y que no requieran soportes para impresión, con el objetivo de alcanzar o aproximar la isotropía teórica de la estructura Kelvin.

1.7. Bibliografía y otros recursos

- [1] A. Gefen y B. Dilmoney, «Mechanics of the normal woman's breast,» *Technology and Health Care*, vol. 15, n° 4, pp. 259-271, 2007.
- [2] C. Li, G. Guan, R. Reif, Z. Huang y R. K. Wang, «Determining elastic properties of skin by measuring surface waves from an impulse mechanical stimulus using phase-sensitive optical coherence tomography,» *Journal Of The Royal Society*, 2011.
- [3] A. K. Dabrowska, G.-M. Rotaru, S. Derlers, F. Spano, M. Camenzind, S. Annaheim, R. Stampfli, M. Schmid y R. M. Rossi, «Materials used to simulate physical properties of human skin,» *Skin Research and Technology*, vol. 22, pp. 3-14, 2016.
- [4] C. Ge, S. Wang, W. Zheng y W. Zhai, «Preparation of Microcellular Thermoplastic Polyurethane (TPU) foam and its tensile property,» *Polymer Engineering and Science*, vol. 58, n° S1, pp. E158-E166, 2017.
- [5] J. Fletcher, «What types of breast prostheses are available?,» *MedicalNewsToday*, 3 Septiembre 2021.
- [6] Breast Cancer Now, «Types of breast prosthesis,» Breast Cancer Now, Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://breastcancernow.org/information-support/facing-breast-cancer/living-beyond-breast-cancer/your-body/breast-prosthesis/types-breast-prosthesis>.
- [7] Amazon, «Wonder Mate External Silicon Breast Prostheses - 9 (Beige),» Amazon, [En línea]. Available: <https://www.amazon.in/Wonder-Mate-External-Silicon-Prostheses/dp/B075RYM1FZ>. [Último acceso: 22 Septiembre 2022].
- [8] Park Mastectomy Supply, «Nearly Me 420 Non-Weighted Triangle Foam Breast Form,» [En línea]. Available: <https://www.parkmastectomy.com/product/Nearly-Me-420.html>.
- [9] WACKER, «ELASTOSIL®P 7684/60 A/B,» 2021.
- [10] A. Wentworth y A. W. K. Ma, «Prosthesis Development Utilizing Additive Manufacturing and Low-Cost Electronics,» *Technical Report*, 2017.
- [11] Ultimaker, «Ultimaker TPU 95A Technical data sheet,» 29 Abril 2022. [En línea]. Available: https://support.ultimaker.com/hc/article_attachments/4800773309980/Ultimaker-TPU95A-TDS-v5.00.pdf.

- [12] J. U. Surjadi, L. Gao, H. Du, X. Li, X. Xiong, N. X. Fang y Y. Lu, «Mechanical Metamaterials and Their Engineering Applications,» *Advanced Engineering Materials*, vol. 21, n° 3, 2019.
- [13] C. Ge, L. Priyadarshini, D. Cormier, L. Pan y J. Tuber, «A preliminary study of cushion properties of a 3D printed thermoplastic polyurethane Kelvin foam,» *Packaging Technology and Science*, vol. 31, n° 5, pp. 361-368, 2017.
- [14] Z. A. Jetha, R. B. Gul y S. Lalani, «Women experiences using breast prosthesis after mastectomy,» *Asia-Pacific Journal of Oncology Nursing*, vol. 4, n° 3, 2017.
- [15] ASTM International, «Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials—Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams,» 2003.
- [16] H. Zhang, C. Bian, J. K. Jackson, F. Khademolhosseini, H. M. Burt y M. Chiao, «Fabrication of Robust Hydrogel Coatings on Polydimethylsiloxane Substrates Using Micropillar Anchor Structures with Chemical Surface Modification,» *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 6, n° 12, pp. 9126-9133, 2014.
- [17] ASTM International, «Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers,» 2020.
- [18] International Organization for Standardization, «Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of tensile stress-strain properties,» 2017.
- [19] WACKER, «Room Temperature Vulcanizing (RTV) Silicones».
- [20] WACKER, «Processing RTV-2 Silicone Rubbers».
- [21] WACKER, «Silicone for prosthetics».
- [22] W. Yang, V. R. Sherman, B. Gludovatz, E. Schaible, P. Stewart, R. O. Ritchie y M. A. Meyers, «On the tear resistance of skin,» *Nature Communications*, vol. 6, n° 6649, 2015.
- [23] J. Skewes, M. Y. Chen, D. Forrestal, N. J. Rukin y M. A. Woodruff, «3D Printing Improved Testicular Prostheses: Using Lattice Infill Structure to Modify Mechanical Properties,» *Frontiers*, 2021.
- [24] ASTM International, «Standard Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer—Tension,» 2016.
- [25] ASTM International, «Standard Test Methods for Rubber Property—Compression Set,» 2018.
- [26] NinjaTek, «NinjaFlex® 3D Printing Filament,» Abril 2016. [En línea]. Available: <https://ninjatek.com/wp-content/uploads/NinjaFlex-TDS.pdf>.
- [27] «Properties of RTV-2 Silicones Rubbers,» 2017. [En línea].

1.8. Anexos generales

2. Productos

Nombre y código del PAP	PAP4G03 Programa de Apoyo a Centros de Investigación Externos I
Nombre del proyecto	Desarrollo de metamaterial y recubrimiento de piel sintética para su aplicación en prótesis externa de mama.
Descripción (qué es, para quién se realizó y para qué es):	Manual: Documento que describe de manera ordenada el desarrollo de una prótesis de seno externa utilizando un metamaterial impreso en 3D con TPU y un recubrimiento de silicona.
Autores:	Ana Paulina Veloso Ramirez Israel Vargas Guevara

Manual: Desarrollo de metamaterial y recubrimiento de piel sintética para su aplicación en prótesis externa de mama

Vargas Guevara, Israel

Veloso Ramirez, Ana Paulina

En el presente manual se describirá de manera clara y concisa una metodología para la fabricación de una prótesis de seno externa con base en los resultados obtenidos de la investigación anterior, donde se estudió el comportamiento de una celda kelvin al momento de ser comprimida, y la resistencia al desgarre de distintas composiciones de caucho de silicona. El manual se dividirá en tres secciones: metamaterial, recubrimiento de piel sintética y configuración final.

El material y el equipo necesarios para llevar a cabo la fabricación de la prótesis de seno externa son:

- Filamento de TPU marca Ultimaker, 2.85 mm

- Impresora BCN3D Sigma
- Software SolidWorks
- Modelo CAD de seno
- Caucho de silicona RTV-2
- Fluido de silicona (polidimetilsiloxano)
- Peróxido de metil etil cetona
- Vaso de precipitado
- Agitador de vidrio
- Probeta graduada de 10 mL
- Pipeta graduada de 1 mL
- Jeringa
- Báscula
- Espátula

Metamaterial

El diseño del metamaterial se comienza diseñando una celda Kelvin unitaria en el programa SolidWorks. Haciendo uso de la herramienta *Sketch 3D*, se crea la forma de un octaedro truncado con aristas de 7 mm de longitud. A continuación, se utiliza la herramienta Barrido para crear cilindros con diámetro de 1.5 mm a través de cada una de las aristas de la estructura. Se crean planos paralelos a cada una de las 14 caras del octaedro y se utiliza la herramienta Cortar con superficie para crear una celda que pueda teselarse correctamente. Finalmente, se utiliza la herramienta Redondeo para suavizar las uniones entre las aristas de la celda. Los pasos mencionados anteriormente se muestran en la Figura 1:

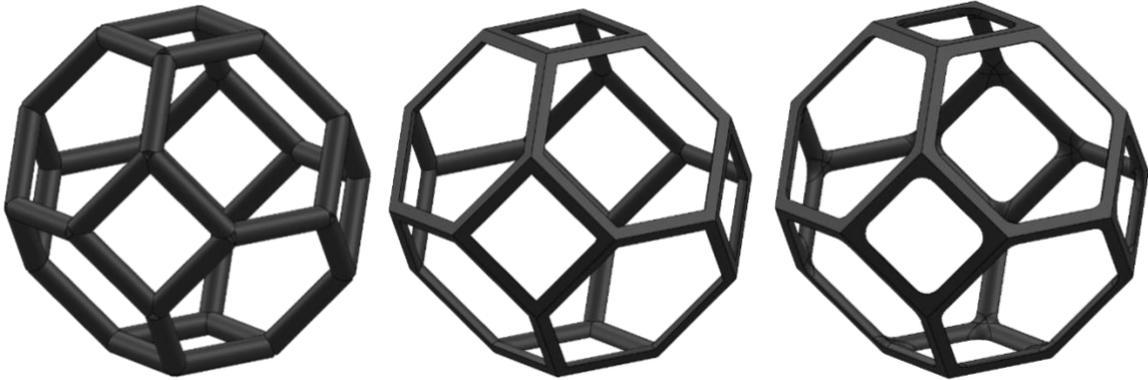


Figura 1. Celda Kelvin unitaria al aplicar la herramienta a) barrido, b) cortar con superficie y c) redondeo

Una vez realizada la celda unitaria, se utiliza la herramienta Matriz lineal para teselar la celda en direcciones x , y y z , así como en diagonales, llenando el volumen ocupado por el sólido de la prótesis. A continuación, se utiliza la herramienta Combinación de sólidos para combinar todas las instancias de la celda en un único sólido. Posteriormente, se utiliza de nuevo el modelo de la mama con la herramienta Combinar en modo de combinación Común, para obtener el volumen de la prótesis con la estructura Kelvin, como se observa en la Figura 2:

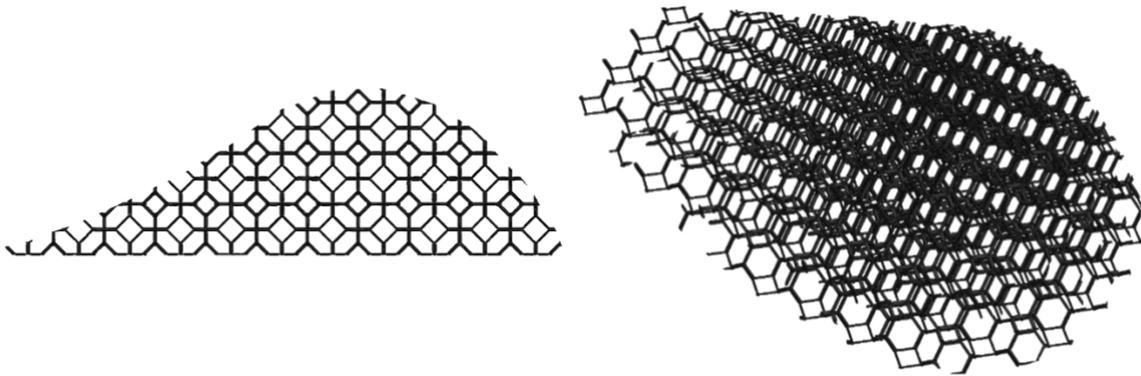


Figura 2. Vista a) lateral y b) general de la estructura de la prótesis

Recubrimiento de piel sintética

Para llevar a cabo el recubrimiento de caucho de silicona, es primero necesario fabricar el molde que se utilizara para dejar polimerizar.

Molde para la polimerización del caucho de silicona

Con ayuda del archivo CAD de la mama, se crea un molde negativo de la forma de la mama, desplazando 3 mm hacia el exterior, el grosor del recubrimiento de silicona. A continuación, se crea un duplicado del sólido de la mama y se le agregan pestañas delgadas para asegurar una correcta fijación al verter la silicona.

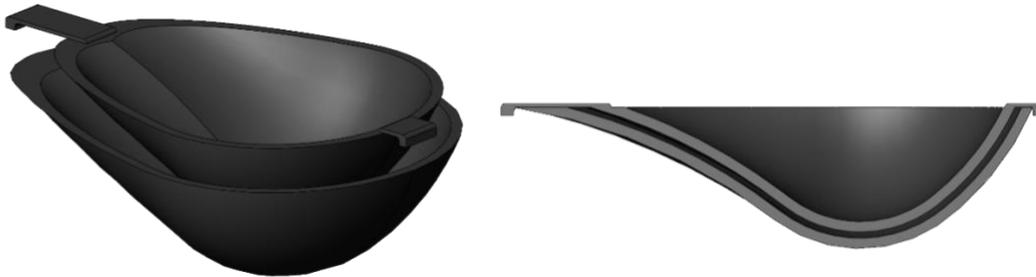


Figura 3. Molde para el curado del recubrimiento de silicona.

Mezcla de caucho de silicona

En una báscula se coloca el vaso de precipitado, ya medido el peso del vaso, se selecciona el botón de tara para establecer la medición en cero y así poder medir el caucho de silicona sin la variación de peso proporcionada por el vaso de precipitado. Posteriormente, con ayuda de una espátula, se pesan 40 gramos de caucho de silicón, colocándolos en el vaso.

Con la silicona ya pesada, esta se retira de la báscula. Para obtener la composición deseada, se debe obtener el 70% del peso, lo que da 28, por ende, con ayuda de la probeta graduada, se miden 28 mL de fluido de silicona y se adición al vaso de precipitado que ya contiene el caucho de silicona. Finalmente, se debe adicionar el peróxido de metil etil cetona, este se obtiene a partir de obtener el 3% del peso de caucho, siendo de 1.2 mL. Haciendo uso de la pipeta de 1 mL y la jeringa, se adiciona dicha cantidad al vaso de precipitado. Se mezcla hasta observar homogeneidad.

Deposición de la mezcla en el molde

A los moldes que se observan en la Figura 3, fabricados previamente con impresión 3D, se les unta una delgada capa de vaselina, para evitar que la mezcla se adhiera. Con la mezcla de caucho de silicona producida correctamente, se vierte sobre el molde, posteriormente acomodando la capa superior y dejando polimerizar.

Configuración final

Con la celda kelvin ya replicada en toda el área del CAD de la mama e impresa en 3D, y el recubrimiento de silicona ya polimerizado, es necesario ensamblar ambas porciones para así en conjunto finalizar la fabricación de la prótesis de seno externa.

La configuración esperada se muestra en la siguiente figura:

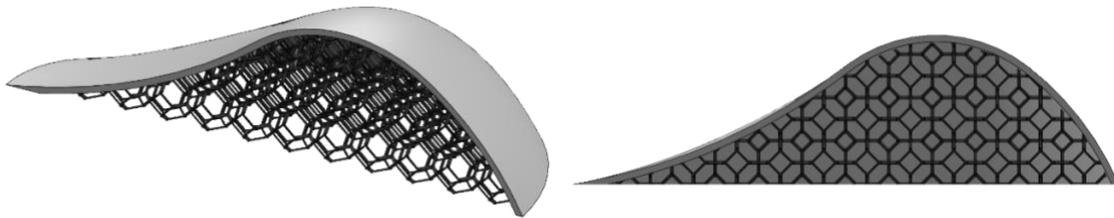


Figura 4. Sección transversal de la configuración final de metamaterial y recubrimiento de silicona.

En la figura se observa como la parte interna de la prótesis estará conformada por el metamaterial teselado y la parte externa es el recubrimiento de la silicona previamente polimerizado.

Se recomienda la implementación de una funda de algodón en la que se pueda introducir la configuración de la prótesis que se muestran en Figura 4 con la finalidad de que no solo mantenga la prótesis en sitio, sino también proporcione una mayor comodidad al momento de usarla y permita la absorción y disipación de sudor efectivamente.

3. Reflexión crítica y ética de la experiencia

El RPAP tiene también como propósito documentar la reflexión sobre los aprendizajes en sus múltiples dimensiones, las implicaciones éticas y los aportes sociales del proyecto para compartir una comprensión crítica y amplia de las problemáticas en las que se intervino.

3.1 Sensibilización ante las realidades

Paulina: El paso principal que se llevó a cabo para el desarrollo del presente proyecto fue la contextualización, me informé con respecto al cáncer de mama, lo que sucede, lo que necesitan, los sentimientos involucrados y las distintas posibilidades con respecto a los tratamientos pre y post operatorios. A pesar de que durante mi primer PAP, me informé del tema, aún hubo nueva información que revisar y así empatizar de manera más profunda.

A pesar de que este proyecto tiene como finalidad aplicar lo propuesto en una prótesis de seno externa, no tuve ningún acercamiento con personas que han vivido una mastectomía y necesitan una prótesis de seno externa. La manera en que pude formar una conexión con el tema y empatizar fue mediante la lectura del tema, pero es cierto que fue un punto clave el que yo sintiera interés por el tema, sé que hay personas que si no cuentan con un interés les cuesta conectar y por ende aportar de manera sincera.

Durante esta experiencia PAP, sentí un amplio rango de sentimientos, el principal fue con respecto a la temática seleccionada, tristeza, esto debido a que el tema en sí es algo complicado, a pesar de no vivir o presenciar un caso de cáncer de mama, empatizar generó en mí ese sentimiento, es difícil saber que muchas personas sufren esto, y no sólo se tienen consecuencias durante el proceso de recuperación, sino posterior a eso, una gran parte de estas personas, tiene que aprender a vivir con las secuelas de superar algo tan difícil y no siempre se les provee el apoyo suficiente, creando un ambiente hostil y empeorando su proceso de recuperación. Por otra parte, la experiencia PAP como tal el desarrollo de un proyecto me tomo mucho esfuerzo personal, sentí mucho estrés y dificultad para sacar adelante partes del proyecto, a pesar de que ya conocía la dinámica PAP, el proceso de cambio de proyecto en conjunto con la carga escolar y de trabajo me dificulto manejar de

forma adecuada las entregas, no sólo decepcionando a los profesores PAP sino a mí también, provocando una disminución constante de motivación a lo largo del desarrollo del proyecto.

En términos de actuar y tomar decisiones durante el desarrollo del proyecto pienso que se debió mayoritariamente a mi razonamiento, antes que, bajo mis creencias, ya que desde elegir el material hasta como implementarlo debe tener un razonamiento lógico, si por mera creencia uno tomara decisiones. Las propuestas de los proyectos pueden llegar a ser muy fantasiosos, uno puede basarse en sus creencias como lo es hacer el bien, ayudar, ofrecer una solución con buenas intenciones, pero si no va de la mano con el razonamiento, la posibilidad de verdaderamente presentar algo útil a las personas se vuelve casi nulo. Uno debe ser fiel a sus creencias para hacer las cosas bien, pero también se debe usar la razón para poder aterrizarlas ideas y en conjunto ofrecer soluciones funcionales y necesarias.

Aunque a veces uno escucha nanotecnología y le cuesta mucho relacionarlo al proyecto, en este proyecto ejercí mayoritariamente como ingeniera, utilizando los conocimientos que he adquirido durante mi carrera para llevar a cabo análisis de materiales y ofrecer soluciones a problemas presentados a lo largo del camino. En términos éticos y sociales, no hay mucha relación directa, acciones éticas que fueron necesarias fue el presentar todos los resultados obtenidos, puesto que no es una actitud correcta el ocultar datos que no favorecen un proyecto con la finalidad de obtener algo a cambio, pudiendo ser un financiamiento o incluso mero reconocimiento.

Israel: El primer paso de este proyecto, que fue comprender la problemática abordada, se realizó de manera teórica, investigando sobre estudios a pacientes de cáncer de mama y sus opiniones con respecto a distintas prótesis de seno existentes, tanto la sensación física de llevarla puesta como el efecto psicológico que tiene en su persona usarlas. Los resultados fueron bastante desalentadores, pues en general mostraban un descontento con las alternativas propuestas, lo que me hizo darme cuenta de que hay aún mucho trabajo por hacer para desarrollar prótesis que no sólo cumplan su función mecánica, sino que puedan devolverles a las afectadas un sentido de normalidad, que a mi parecer debe ser su función principal.

A pesar de que no tuve un acercamiento directo con personas afectadas por el cáncer de mama, en este segundo PAP tuve la oportunidad de tener en mis manos una prótesis de seno, evaluar su sensación al tacto y similitud con una mama real, y finalmente entender el sentimiento de inconformidad que expresan sus usuarias en los estudios revisados, lo que me permitió reflexionar y comprender lo difícil que debe ser no poder tener acceso a un producto que te pueda hacer sentir mejor después de experimentar un proceso tan difícil de sobrellevar como lo es el cáncer de mama.

A lo largo de este proyecto, experimenté la tensión de tener que salir de mi zona de confort, pues el desarrollo de este PAP requirió no sólo obtener aprendizajes sobre temas que no conocía, sino también informarme sobre los conocimientos técnicos necesarios para realizar diseños CAD de una estructura para metamaterial, manejar impresoras 3D y realizar pruebas de compresión, experiencias que no había tenido hasta el momento. También, desde el principio desarrollé sensibilidad y respeto por la problemática, pues me di cuenta de que cuando el tema a tratar es de esta magnitud y seriedad, siempre hay que tener presente que el trabajo que se está realizando no tiene como propósito obtener un producto final para el mercado, sino una alternativa que satisfaga las necesidades emocionales de las personas que lo necesitan, por lo que se debe orientar cada paso de la investigación y el desarrollo a obtener una alternativa que ante todo sea un material que se sienta como una mama real y que pueda ser implementado en una prótesis que le devuelva su seguridad a las afectadas por el cáncer de mama.

Si bien la nanotecnología no estuvo directamente relacionada con este proyecto, aprendí que los metamateriales abren la puerta a un sinnúmero de aplicaciones y posibilidades que no existían anteriormente, y espero que en un futuro los resultados obtenidos a lo largo de este proyecto puedan aportar a obtener una solución para el problema de la inexistencia de prótesis de mama convincentes y que sean del agrado de aquellas que las necesitan. A pesar de lo anterior, en mi opinión, independientemente del impacto y aplicabilidad de los resultados obtenidos, el enfoque social que se le dio al proyecto es algo de suma importancia, y es algo

que espero se mantenga en las investigaciones futuras con respecto al desarrollo de prótesis externas de seno.

3.2 Aprendizajes logrados

Paulina: Durante el desarrollo de este proyecto los aprendizajes obtenidos fueron una parte importante, el principal y que siento que seguiré aplicando posteriormente es que aprendí que son los metamateriales y el propósito de estos, así como las distintas siliconas que hay en el mercado y qué parámetros uno busca analizar para poder darle las aplicaciones deseadas. Para mí, durante este PAP los retos presentados no fueron tanto en términos de aprendizaje escolar, sino más bien de crecimiento personal, me quedó muy claro lo injusta que pueden ser las cosas a veces y aun así uno tiene que seguir intentando, seguir investigando y seguir presentando avances, a veces nos cuesta entender que no porque nosotros nos detengamos porque nos sentimos mal o porque estamos viviendo algo difícil, la vida no para, el tiempo sigue pasando y resultados siempre se tienen que entregar.

En términos de aprendizaje, lo que más me costó procesar fueron los metamateriales, al inicio el concepto me parecía muy difícil de imaginar y más ver las posibles aplicaciones, conforme se estaba desarrollando el proyecto, se me fue clarificando el concepto pudiendo aplicarlo en otras áreas de mi carrera. La forma en que pude disminuir los efectos de no comprender un concepto fue mediante la vasta investigación de explicaciones con respecto al tema, en especial videos con aplicaciones. El momento en que fui consciente de que mi entendimiento al tema había sido exitoso fue cuando comencé a poder conversar al respecto con otras personas y exitosamente lograr que comprendieran de manera general de que trataban, puesto que llega a ser a veces un concepto muy abstracto.

Para concluir, los aprendizajes que obtuve fueron variados, de manera profesional, amplíe mis conocimientos que no precisamente son de enfoque para un nanotecnólogo, investigando y analizando muestras de silicona, esto de la mano con mejorar mis habilidades de investigación, siendo más consciente del uso de las palabras claves para encontrar información deseada, disminuyendo mi tiempo buscando información pertinente y por ende

umentando mi tiempo de productividad, viendo esto reflejado en mi trabajo. En el aspecto social, ver más allá de mis vivencias siento que fue algo sumamente importante, ya que no siempre las cosas son como uno las visualiza, y hay muchas situaciones pasando más allá de nuestra burbuja. Finalmente, en lo personal, siento que adaptarse fue una cualidad que estuve trabajando durante el desarrollo de este proyecto, en especial debido a que tuvimos que pasar de un proyecto a otro, realizando en poco tiempo la base teórica para completarlo correctamente. También, maneje mucho el control de mis emociones, tratando de no permitir que estas dirijan mi comportamiento y mi rendimiento general.

Israel:

En este PAP pude desarrollar habilidades disciplinares como expresar mis ideas utilizando lenguaje técnico para transmitir información de forma específica y eficiente. Aunque no propiamente de mi carrera, también aprendí a utilizar equipo especializado que no había tenido oportunidad de manejar, como impresoras 3D y una máquina universal para ensayos mecánicos. Asimismo, mejoró mi habilidad para redactar resultados y justificar las conclusiones obtenidas en un documento científico.

Durante este proyecto, también desarrollé habilidades personales que me fueron de utilidad durante este periodo y que seguirán impactando el progreso y calidad de mis trabajos futuros. Por ejemplo, un reto recurrente durante este proyecto fue el manejo del tiempo, puesto que no sólo implicó el manejo de mis horas dedicadas a la investigación, sino también dependió en gran medida de la disponibilidad de los profesores que nos apoyaron y del equipo utilizado, por lo que fue de gran importancia poder coordinarme y desarrollar los pasos necesarios para completar este proyecto con estas restricciones de tiempo en mente.

En general, en este PAP aprendí sobre las posibilidades que ofrece el campo de los metamateriales, las similitudes de la silicona con la piel y su proceso de fabricación, los conceptos básicos y el manejo del método de FMD, las normativas utilizadas para caracterizar estos materiales y la interpretación de los resultados obtenidos por medio de pruebas realizadas a éstos. Asimismo, aprendí sobre las prótesis ya existentes en el mercado y pude empatizar sobre los problemas que estas presentan. Finalmente, mejoré mis

habilidades personales como el manejo del tiempo, del estrés y mi capacidad de trabajar en equipo.

3.3 Inventario de competencias Inicial (ingreso del PAP) e Inventario de competencias Final (salida al PAP).

Paulina:

	Competencia	Evidencia	Relevancia/ Fortaleza*	Competencias nuevas	Competencias potencializadas	
Categorizar los elementos, si es un conocimiento, una habilidad, una actitud,	Conocimientos	Programación con Python	Haber cursado satisfactoriamente el curso de Algoritmos y programación en ITESO	Permite desarrollar proyectos donde se maneja una gran cantidad de datos.	Aprendí que es un metamaterial	Mejoro mi programación en Python
		Entendimiento de estructuras cristalinas de los materiales	Haber cursado satisfactoriamente el curso de Ciencia de materiales en ITESO	Permite entender de qué manera se va a comportar un material y la forma en que va a interactuar con otros materiales, así como algunas de sus propiedades.	Aprendí que son las siliconas RTV-1 y RTV-2, así como las reacciones de condensación y de adición	Mejore mi habilidad de caracterizar materiales utilizando normativas para pruebas mecánicas
		Matlab	Haber cursado satisfactoriamente el curso de Métodos numéricos en ITESO	Permite desarrollar programas que utilicen demasiada matemática, pero sean complejos de resolver de manera analítica.	Aprendí lo que es una celda Kelvin	Mejoro mi entendimiento de la impresión 3D, comprendiendo los parámetros que entran en juego y uno tiene que desarrollar productos alrededor de las limitaciones de la impresora
		Sintetizar y caracterizar materiales.	Haber cursado satisfactoriamente los cursos de Síntesis y Caracterización de Nanomateriales I y II en ITESO	Permite llevar a cabo la sinterización correcta de nanomateriales pertinentes a una investigación, así como caracterizar para observar sus propiedades.	Aprendí que son los modelos físicos de piel o piel sintética, así como sus propiedades dependiendo de la aplicación	Me fue más fácil elaborar un cronograma de actividades
		Física y matemática avanzada	Haber cursado satisfactoriamente cursos como Variable compleja, Mecánica cuántica, Álgebra lineal, etc. en ITESO	Permite solucionar problemas de nivel de complejidad alto así como desarrollar una mejor lógica matemática que se	Aprendí sobre las pruebas de desgarré y la relación de su valor con el diluyente adicionado a las mezclas	Mejoro mi habilidad de hacer investigaciones documentales
					Aplique mis conocimientos de trabajo en un laboratorio	Reforcé mi habilidad para trabajar en equipo

				puede aplicar en la resolución de otros problemas.		Mejoro mi comunicación de ideas
		Circuitos eléctricos	Haber cursado satisfactoriamente los cursos de Dispositivos electrónicos Semiconductores y Dispositivos de Captación y Conversión de Energía en ITESO	Permite desarrollar circuitos electrónicos que pueden ser aplicados a distintos proyectos, así como ir de la mano con otras materias.		
		Impresión 3D	Haber cursado PAP I	Me permite entender la manera en la que esta técnica funciona, así como visualizar distintos enfoques de aplicación.		
		Elaboración de cronogramas	Haber cursado PAP I	Me permite calendarizar las distintas actividades que se deben realizar para completar algo satisfactoriamente, ayudando así a manejar mejor los tiempos sin tener que sentirse presionado constantemente,		
Habilidades		Realizar el desarrollo de investigaciones de manera adecuada	Proyectos pasados en distintas materias	Permite llevar a cabo el desarrollo teórico completo de un proyecto, tomando en cuenta un buen manejo del tiempo entre actividades.		
		Trabajar adecuadamente dentro del laboratorio	Materias de química, biología y materiales	Permite comportarse de manera adecuada en el laboratorio, tomar las precauciones debidas y utilizar correctamente los materiales dentro de estos.		
		Resolución de problemas	Proyectos y clases pasadas	Permite no estancarse al		

				momento de estar llevando un desarrollo, siempre buscando solucionar de manera adecuada y poder continuar con otras cosas.		
		Realizar simulaciones con Python	Proyectos pasados y conocimientos adquiridos en la materia de Simulación matemática	Permite visualizar o modelar situaciones para observar un comportamiento actual o futuro y con base en esto tomar decisiones		
		Realizar simulaciones en COMSOL	Proyectos pasados y conocimientos adquiridos en la materia de Dispositivos de Captación y Conversión de Energía	Permite visualizar el comportamiento de un sistema, pudiendo cambiar distintos parámetros y así ver distintos casos.		
		Eficientar tareas y tiempos	Trabajando	Permite un mejor uso del tiempo para seguir trabajando en otros objetivos y poder ser un empleado mucho más eficiente		
		Trabajar en equipo	Proyectos pasados a lo largo de distintas materias	Permite un trabajo más ameno en equipo, de armonía y eficiencia para cumplir objetivos		
		Simular en SolidWorks	Proyectos pasados durante la materia PAP I	Permite visualizar comportamientos físicos, así como estimar comportamientos		
	Actitudes	Proactiva	Al estar trabajando en equipos y en mi empelo	Permite estar siempre un paso delante de los problemas, no dando lugar para la procrastinación y por ende el retraso de entrega de proyectos o tareas		
		Comunicación	Al estar trabajando en	Permite comunicar las		

			equipos y en mi empleo	ideas a los demás, así como explicar los problemas que se pudieran tener, llegar a conclusiones mediante el dialogo.		
		Autodidacta	Proyectos y clases pasadas	Permite no siempre depende de que se te enseñe algo directamente, sino la posibilidad de utilizar las herramientas que se tienen y poder encontrar por sí mismo una solución		
		Organizada	Proyectos, clases pasadas y mi empleo	Permite cumplir con todos los objetivos que se tienen sin tener que sentirse agobiado o con falta de tiempo, así como evitar el retraso en tiempos de entregas		
		Paciente	Proyectos y clases pasadas	Permite evitar conflictos al trabajar en equipo o con personas difíciles, lograr comunicar tus ideas y ayudar a los demás a comprender algo cuando necesiten ayuda sin tener que hacer sentir mal a nadie ni generar peleas innecesarias.		

En el inventario de competencias observé que, aunque contaba con distintos conocimientos y habilidades para el desarrollo de este proyecto no todas fueron útiles, situación que no me limitó a esforzarme en desarrollar nuevos conocimientos, como lo son los metamateriales y la fabricación de modelos físicos de piel. Los conocimientos adquiridos sobre la impresión 3D fueron muy importantes para el aterrizaje del proyecto a modelos más realistas y que si se pueden imprimir. La comunicación fue clave para llevar a cabo el proyecto, sin ellos decisiones importantes no se habrían logrado. Es importante resaltar que sin el trabajo en equipo, no se habría completado a tiempo el desarrollo del proyecto, debido a que la repartición de tareas fue una de las partes claves de su éxito.

Israel:

Categorizar los elementos, si es un conocimiento, una habilidad, una actitud,	Competencia		Evidencia	Relevancia/Fortaleza*	Competencias nuevas	Competencias potencializadas
	Conocimientos	Comprensión del comportamiento mecánico de materiales	Análisis de propiedades de materiales en PAP anterior	Escoger materiales adecuados con base en sus propiedades físicas y su aplicabilidad al proyecto	Concepto y aplicaciones de metamateriales	Diseño de probetas estandarizadas para pruebas de compresión
Diseño en 3D		Diseño de modelos previos en programas de CAD	Elaboración de estructuras para su análisis mecánico	Diseño de modelo CAD de metamateriales	Aplicación de conocimientos de ensayos en pruebas reales	
Realización de ensayos de materiales		Simulaciones de pruebas en PAP anterior	Entender los resultados obtenidos por estas pruebas para escoger el material y estructura óptimos	Conceptos y limitaciones de técnica FMD	Entendimiento y aplicación de temas de ciencia de materiales.	
Dominio de inglés		Certificación	Obtener fuentes bibliográficas en otros idiomas	Preparación y manejo de impresora 3D	Mejora en términos de análisis de datos y resultados	
Uso de software CAD		Diseño de probetas en PAP anterior	Diseño de estructuras tridimensionales	Diseño y fabricación de moldes	Conceptos de química en curación de polímeros	
Habilidades	Investigación	Presentar una cantidad considerable	Adquirir un contexto del estado del arte tan	Fabricación de piezas de silicona	Manejo del tiempo.	

			de fuentes de información	completo como sea posible	Redacción de un documento científico
		Redacción correcta de reportes	Utilizar la información recopilada para completar el reporte	Evitar tantas correcciones como sea posible, para mejorar el flujo de trabajo del proyecto	
		Elaborar hipótesis	Con base en la información recopilada de distintas fuentes, plantear hipótesis sobre la solución a un problema	Encontrar soluciones nuevas o diferentes a los obstáculos que enfrenta el proyecto	
	Actitudes	Responsabilidad	Realizar las entregas a tiempo	Permitir el desarrollo constante y fluido del reporte del proyecto.	
		Organización	Planear las actividades a realizar en un periodo de tiempo dado	Evitar atrasos por imprevistos	
		Respeto	Escuchar las opiniones de los demás integrantes aunque no estemos de acuerdo	Evita conflictos en el equipo y facilita el trabajo en equipo	
		Apertura al diálogo	Establecer un diálogo acerca de las opiniones de todos los integrantes	Llegar a consensos y a conclusiones a las que no se habrían llegado de forma individual	

A pesar de las similitudes del PAP anterior con el actual, el desarrollo de éste implicó adquirir una multitud de conocimientos nuevos, sobre todo con respecto a los metamateriales y a la

silicona, y refuerzo de los anteriores, como la interpretación del comportamiento físico de las probetas. Las habilidades que ya poseía fueron de gran utilidad para este proyecto, y logré desarrollarlas, como en el caso del manejo de Solidworks, y adquirir nuevas, como la elaboración de piezas por medio de FMD. Las actitudes también fueron un factor clave para la realización exitosa del proyecto, pues la problemática ameritó tratar el tema con respeto y seriedad. Además, el alcance del proyecto requirió mucha comunicación dentro del equipo, organización para la distribución de tareas individuales y manejo de los tiempos de investigación, asesoría y equipos.