

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE
Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales

Sustentabilidad y tecnología

PROYECTO DE APLICACIÓN PROFESIONAL (PAP)
**Programa de desarrollo tecnológico para la sustentabilidad ambiental,
energética y alimentaria**



**ITESO, Universidad
Jesuita de Guadalajara**

**4D08 Programa de Desarrollo tecnológico para la sustentabilidad ambiental,
energética y alimentaria**

**Metodología y simulación computacional de probetas impresas en 3D para la
selección de materiales en la fabricación de prótesis externas de seno**

PRESENTAN

Programas educativos y Estudiantes

Ingeniería en Nanotecnología. Ana Paulina Veloso Ramírez

Ingeniería en Nanotecnología. Israel Vargas Guevara

Profesor PAP: M.I.M. Fermín Castro Aragón; Dra. Gabriela Porras Quevedo

Tlaquepaque, Jalisco, julio de 2022

ÍNDICE

Contenido

| | |
|---|----|
| REPORTE PAP | 2 |
| Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional | 2 |
| Resumen | 0 |
| 1. Ciclo participativo del Proyecto de Aplicación Profesional..... | 0 |
| 1.1 Entendimiento del ámbito y del contexto | 1 |
| 1.2 Caracterización de la organización..... | 5 |
| 1.3 Identificación de la(s) problemática(s)..... | 5 |
| 1.4. Planeación de alternativa(s)..... | 6 |
| 1.5. Desarrollo de la propuesta de mejora | 9 |
| 1.6. Valoración de productos, resultados e impactos | 21 |
| 1.7. Bibliografía y otros recursos | 22 |
| 1.8. Anexos generales..... | 24 |
| 2. Productos | 24 |
| 3. Reflexión crítica y ética de la experiencia..... | 29 |
| 3.1 Sensibilización ante las realidades | 29 |
| 3.2 Aprendizajes logrados | 32 |

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, que es parte de un proyecto iniciado en el semestre primavera 2021, abordó el desarrollo de prótesis de seno utilizando poliuretano termoplástico (TPU). El objetivo es desarrollar una metodología para definir el material y estructura óptima para el desarrollo de una prótesis de seno. Para el logro de este propósito se plantearon cinco objetivos específicos: Investigar el estado de arte en el ámbito de materiales y estructuras para impresión 3D, definir propiedades mecánicas de los filamentos a estudiar, diseñar las probetas adecuadas con sus respectivos mallados e infills, establecer las metodologías para evaluar distintos ensayos de pruebas mecánicas y simular dichas pruebas.

Para lo anterior, se diseñaron las probetas de acuerdo con las normativas ASTM D638 Y D695, y posteriormente se simuló pruebas de tensión y compresión con el uso de SolidWorks por el método de elemento finito y con el modelo de hiperelasticidad Mooney-Rivlin.

Se logró identificar el material más adecuado con base en sus propiedades mecánicas en el contexto de implementación en prótesis. De igual forma, se identificó el mallado y su infill más adecuado para, en conjunto con el material, proveer una prótesis de seno que cuente con una resistencia adecuada tanto a la tensión como a la compresión.

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 metodológica para comparar las propiedades mecánicas, como el módulo de Young, el límite elástico y la tensión de rotura de los materiales ácido poliláctico (PLA), poliuretano termoplástico (TPU) y el acrilonitrilo butadieno estireno

(ABS), con la finalidad de comprender cuál de estos es el óptimo para la fabricación de una prótesis externa de seno. Se hará uso de programas de simulación computacional y modelado CAD como SolidWorks para la evaluación de resultados de comportamiento mecánico de cada uno de los mallados y materiales a utilizar, por medio de la simulación de distintas pruebas mecánicas. Obteniendo como resultado el material más adecuado de los estudiados y la clase de mallado más apropiado para realizar exitosamente la prótesis. El proyecto se realizará en ITESO, en el Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, con la tutoría de M.I.M. Fermín Castro Aragón y la Dra. Gabriela Porras Quevedo como los asesores del proyecto.

Objetivo general

Desarrollar una metodología para definir el material y estructura óptimos para la fabricación de una prótesis externa de seno

Objetivos específicos

- Investigar el estado del arte en el ámbito de materiales y estructuras para impresión 3D.
- Definir el módulo de Young, la tensión de rotura y la elongación de ruptura para distintos filamentos y su uso en simulaciones.
- Diseñar probetas con distintos mallados e infills en SolidWorks.
- Establecer metodologías para la evaluación de distintos ensayos de las pruebas mecánicas a las probetas.
- Simular diferentes ensayos de tensión y compresión a las probetas utilizando SolidWorks, variando el tipo de mallado y los parámetros de tamaño de las estructuras.

1.1 Entendimiento del ámbito y del contexto

El campo médico está siempre en constante renovación, siempre en busca de nuevas formas de innovar los tratamientos y así combatir de la mejor forma los problemas de salud. Una de

las tecnologías que se está adicionando es la de impresión 3D, esto debido a los bajos costos de producción y la constante evolución de los materiales que se utilizan; la técnica más utilizada en la impresión 3D es la de modelado por deposición fundida [1].

Una de las aplicaciones que se le está dando a la impresión 3D en la medicina es en la producción de prótesis, ya que con los materiales adecuados se puede proveer de una prótesis de bajo peso, bajo costo y con cierta flexibilidad, como lo sería una prótesis de mama para las mujeres que se vieron sometidas a una mastectomía [2].

Materiales

Los materiales de principal interés, y del cual se seleccionará el más adecuado para el desarrollo de una prótesis de seno son: el ácido poliláctico (PLA), el poliuretano termoplástico (TPU) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).

En el ámbito de la fabricación de prótesis, principalmente en la impresión de prototipos, el PLA y el ABS son los termoplásticos preferentes, esto debido a que son materiales relativamente rígidos, y poseen módulos de Young con magnitudes en ordenes de gigapascales (GPa), en cambio, el TPU cuenta con un módulo de Young menor, encontrándose en ordenes de megapascales (MPa), lo que lo clasifica como un termoplástico flexible y lo convierte en un material ideal para el desarrollo de prótesis. Algunas de las propiedades mecánicas de estos materiales se presentan a continuación en la Tabla 1 [3].

Tabla 1. Propiedades mecánicas de distintos materiales utilizados en la impresión 3D.

| | PLA | ABS | TPU |
|--|------------|------------|------------|
| Módulo de Young (MPa) | 2346.5 | 1681.5 | 12 MPa |
| Tensión de rotura (MPa) | 45.6 | 33.9 | 26.0 |
| Límite elástico (MPa) | 49.5 | 39 | 4 |
| Densidad (Kg/m³) | 1240 | 1100 | 1190 |
| Elongación al límite de elasticidad (%) | 3.3 | 3.5 | 65 |
| Elongación a la ruptura (%) | 5.2 | 4.8 | 660 |

Nota: Valores de diferentes propiedades mecánicas para el PLA, ABS y TPU tomados de la literatura [4, 5, 6].

A partir de la Tabla 1, se puede concluir que existe una gran diferencia entre los valores de módulos de Young del ABS y el PLA en comparación al del TPU, confirmando que este último cuenta con una ventaja significativa en términos de flexibilidad. Debido a que la aplicación futura de esta investigación es el desarrollo de prótesis de seno, el TPU cuenta con las propiedades más adecuadas para dicha aplicación, descartando el ABS y el PLA, que a pesar de contar con buenas propiedades mecánicas, no son las adecuadas para aplicación de esta investigación.

Mallado (infill)

Además del material, otro parámetro a tomar en cuenta al desarrollar la prótesis es la estructura interna de la misma (*infill*). Esta estructura se produce a partir distintas de figuras geométricas, con la posibilidad de modificar parámetros como el grosor, escala, porcentaje de densidad, entre otros. Existen mallados de estructura ligera (*lightweight structures*), que buscan utilizar el menor material produciendo aun así buenas propiedades mecánicas; mallados de red e incluso mallados adaptables, que optimizan su estructura a la forma de la pieza para utilizar una menor cantidad de material en lugares que no lo requieren [7].

Además de reducir el material utilizado, en comparación con una pieza sólida, los mallados también determinan las propiedades mecánicas del producto final. El tipo de mallado, así como el porcentaje utilizado, presentan una relación directa con la resistencia a la tensión y compresión de la pieza, así como con la velocidad de impresión y reducción de costos, por lo que es recomendado variar estos parámetros en función del uso que se le dará a la pieza [8, 9].

Aplicado a prótesis externas de seno, en un estudio se desarrolló un prototipo utilizando TPU, y se empleó una estructura de *infill* de tipo *Cross 3D*, con un porcentaje de 10%, obteniendo así una pieza con baja densidad y peso, con propiedades mecánicas adecuadas para una prótesis de este tipo [2].

Entre los tipos de mallado utilizados en la “impresión suave”, es decir, que se utilizan para piezas que requieran tanto resistencia a la tensión y compresión como flexibilidad, se encuentran aquellos basados en hexágonos, como lo son *homogenous honeycomb* (hexagonal homogéneo), ilustrado en la Figura 1 a); *hexagonal trapezoid* (trapezoide hexagonal), Figura 1 b); y *non-homogenous honeycomb* (hexagonal no homogéneo), Figura 1 c).

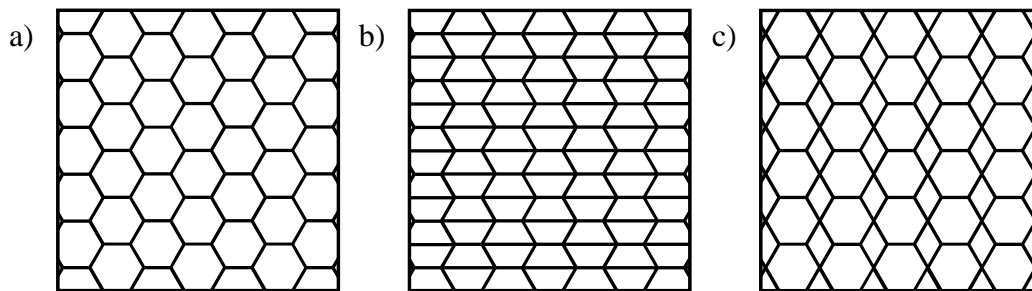


Figura 1. Tipos de mallados hexagonales: a) hexagonal homogéneo, b) trapezoide hexagonal y c) hexagonal no homogéneo

Debido a su geometría hexagonal, estos mallados presentan flexibilidad y estabilidad con alta capacidad de deformación, a la vez que son estructuras de baja densidad, debido a la optimización del espacio que proporciona su geometría. De las 3 estructuras anteriores, la hexagonal no homogénea presenta el menor perímetro por su combinación de hexágonos y rombos, y es por ende la que utiliza menor material, aunque cabe mencionar que sus propiedades mecánicas también se ven afectadas por el tamaño de los hexágonos que la conforman [7].

Con lo anteriormente mencionado, se decidió tomar como objeto de estudio los mallados hexagonales, pues sus propiedades mecánicas, en conjunto con las del TPU, permitirán el desarrollo de una prótesis resistente a esfuerzos mecánicos, a la vez que flexible.

En un estudio, se demostró que los infills de porcentajes bajos, entre 20% y 60%, presentan propiedades compresivas importantes, a la vez que usan menos material y son más ligeros en masa que sus contrapartes más densas. Además, analizando la rigidez de una prótesis de seno

sólida elaborada en un PAP anterior, se decidió priorizar la búsqueda de un infill con características similares a una mama. Por tanto, se enfocó el proyecto en infills de baja densidad, 20%, 40% y 60%, para analizar sus propiedades mecánicas en comparación con un infill del 100% [10].

1.2 Caracterización de la organización

El propósito de este PAP es determinar el mallado interno y porcentaje de infill para las probetas impresas en 3D con filamento TPU, siendo el más adecuado para posteriormente la impresión de una prótesis externa de seno. Las investigaciones previas y simulaciones llevadas a cabo fueron desarrolladas por los alumnos Ana Paulina Veloso Ramírez e Israel Vargas Guevara, bajo la tutoría de M.I.M. Fermín Castro Aragón y la Dra. Gabriela Porras Quevedo.

1.3 Identificación de la(s) problemática(s)

El cáncer de mama es una afección muy común en las mujeres, y aunque con una detección temprana y los debidos cuidados médicos hay posibilidades de preservar la mama, éste no siempre es el caso. La mastectomía es uno de los tratamientos preferentes contra el cáncer, ya que no solo retira el tejido mamario canceroso, sino también prevé la futura recurrencia de esta enfermedad [2].

Una seria consecuencia de este procedimiento, que no tiene la visibilidad debida, son las afecciones psicológicas que estas mujeres sufren a raíz de esta vivencia, los cambios de percepción corporal causando una disminución en su autoestima y rechazo a someterse a nuevos tratamientos quirúrgicos. Lo anterior causa que el proceso de recuperación no sea solamente físico, sino también emocional [11].

A raíz de esta problemática, durante este PAP se buscan comparar diversos polímeros, así como estudiar diferentes mallados (infills) para la futura fabricación de prótesis externas de

seno que les ofrezca a las usuarias mujeres afectadas una alternativa para recuperar su imagen corporal y autoestima, sin que tengan que someterse a cirugía.

1.4. Planeación de alternativa(s)

Para el desarrollo de este PAP en el periodo de verano 2022, requirió la lectura de los PAPs anteriores para entender el contexto y estado actual de la investigación sobre la prótesis. Asimismo, se realizaron investigaciones en la literatura sobre los materiales a utilizar y los distintos tipos de mallado existentes, así como sus aplicaciones en prótesis externas de seno y otros tipos de prótesis.

Modelado de probetas estándar

Las probetas se modelarán utilizando el programa SolidWorks siguiendo las topologías y dimensiones establecidas en las normativas ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Las probetas para pruebas de tensión se modelarán siguiendo el estándar ASTM D638, mientras que se seguirá el estándar ASTM D695 para las probetas de compresión.

Las probetas para pruebas de tensión se elaborarán siguiendo el estándar D638, con una probeta tipo IV, con la forma y dimensiones reflejadas en la Figura 2 y la Tabla 2, respectivamente:

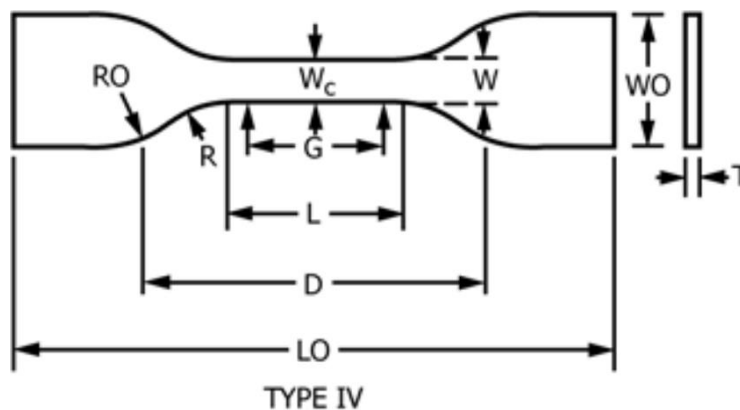


Figura 2. Diagrama de medidas de probeta ASTM D638 tipo IV [12]

Tabla 2. Dimensiones del espécimen para grosor, T , mm(in.).

| Dimensiones (ver dibujo) | Tipo IV (mm(in)) | Tolerancias |
|----------------------------------|------------------|----------------------------|
| W —Ancho de sección angosta | 6 (0.25) | ± 0.5 (± 0.02) |
| L —Longitud de sección angosta | 33 (1.30) | ± 0.5 (± 0.02) |
| WO —Ancho general | 19 (0.75) | + 6.4 (+ 0.25) |
| LO —Longitud general | 115 (4.5) | no max (no max) |
| G —Longitud de calibrador | 25 (1.00) | ± 0.13 (± 0.005) |
| D —Distancia entre mordazas | 65 (2.5) | ± 5 (± 0.2) |
| R —Radio del empalme | 14 (0.56) | ± 1 (± 0.04) |
| RO —Radio externo (Tipo IV) | 25 (1.00) | ± 1 (± 0.04) |

Traducido de ASTM International [12].

Según el estándar, las probetas deben tener un grosor de 3.2 ± 0.4 mm, medida que también se implementó en el diseño CAD [12].

Asimismo, las probetas para pruebas de compresión se elaborarán siguiendo el estándar ASTM D695, que indica el uso de un cilindro o prisma cuadrangular cuya longitud sea el doble de su diámetro. En este caso, se utilizará un prisma cuadrangular con una base de 25.4 mm \times 25.4 mm y una altura de 50.8 mm, como ilustra la Figura 3 [13].

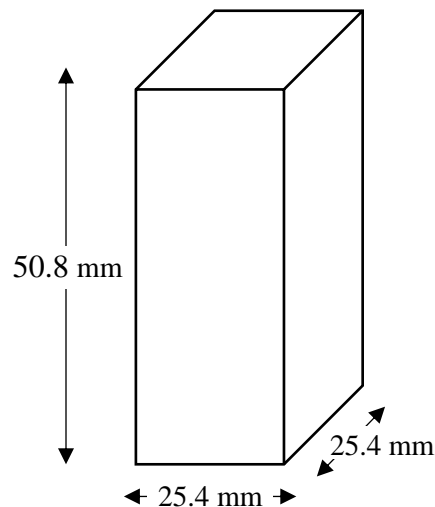


Figura 3. Diagrama de medidas de probeta ASTM D695

Se utilizará la herramienta de patrón de mallado de SolidWorks para modelar los mallados establecidos en la Figura 1, considerando un espesor de pared de 1 mm. Asimismo, por medio de aproximaciones de volumen, se obtendrán variaciones de 20%, 40% y 60% de infill para cada tipo de mallado, resultando en 9 probetas de tensión y 9 de compresión.

Simulación de pruebas mecánicas por análisis de elemento finito (FEA)

Siguiendo la metodología de Alharbi, Kong y Patel, se realizará un estudio estático no lineal en SolidWorks para ejecutar la prueba de tensión. Las propiedades físicas del TPU, recopiladas y presentadas en la Tabla 1, se introducirán en un material personalizado en la biblioteca de SolidWorks, utilizando un modelo de material de plasticidad de Von Mises, para simular el comportamiento no lineal del TPU. Se utilizarán las herramientas de Fijo y Carga Remota para sujetar las probetas de un extremo y aplicar una carga de tensión en el otro [14]. De igual manera, se utilizará la misma metodología para llevar a cabo las simulaciones de pruebas de compresión, utilizando las probetas adecuadas y aplicando las cargas en dirección opuesta [9].

A continuación, en la Tabla 3 se presenta el cronograma con el desglose de las actividades que se tienen planeadas para llevar a cabo satisfactoriamente el proyecto, previendo así los tiempos necesarios para realizar cada objetivo esperado. Posteriormente, en la Tabla 4 se muestran las abreviaturas de los recursos que se utilizan y se muestran en el cronograma.

Tabla 3. Cronograma de actividades previstas para la realización del proyecto.

| Método de evaluación de mallados en probetas | Recursos | 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 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Contextualización del tema para comprender que se busca ofrecer como producto final | TP, AF y AG | 3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Investigación sobre los materiales ABS, PLA y TPU | TP, AF y AG | 4 | | | | | | | | | | | | | | | |
| investigación sobre los distintos tipos de mallados en la impresión 3D | TP, AF y AG | 4 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Preparación de modelos CAD de probetas con distintos infills | TP Y AI | 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Realización de simulaciones no lineales de pruebas de tensión | TP, COM, AF y AG | 5 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Realización de simulaciones no lineales de pruebas de compresión | TP, SW, AF y AG | 6 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Comparación de los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas | TP, AF y AG | 3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Preparación y presentación del RPAP | TP | 7 | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabla 4. 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 |
| AI | Ilustrador |
| SW | Simulación SolidWorks |

1.5. Desarrollo de la propuesta de mejora

Elaboración de probetas

Para modelar las probetas para las pruebas de tensión y compresión, en el programa SolidWorks se crearon sólidos con las formas y dimensiones establecidas en la Figura 2 y la Figura 3, respectivamente. En un croquis, se diseñaron los patrones a repetir para crear los

FO-DGA-CPAP-0017

infills, ilustrados en la Figura 4, utilizando ecuaciones para variar el tamaño de los patrones y mantener un espesor de pared de 1 mm, independiente del porcentaje de infill.

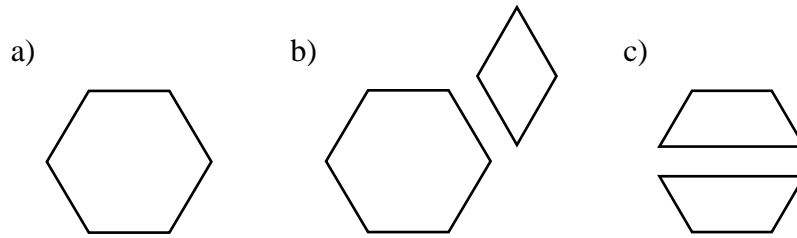


Figura 4. Patrones para a) hexágono homogéneo, b) hexágono no homogéneo y c) trapezoide hexagonal

Utilizando la herramienta patrón de mallado, se generaron las mallas en la superficie de las probetas, que posteriormente se restaron de los sólidos principales y resultaron en probetas con infills de porcentaje variable. Finalmente, se modificó iterativamente el tamaño de los patrones para obtener los infills deseados para cada uno de los tipos de mallado.

Después de realizar pruebas preliminares y analizar datos experimentales sobre el TPU, se llegó a la conclusión de que el TPU es un material hiperelástico, por lo que el modelo más adecuado para utilizar en la simulación fue el modelo de Mooney-Rivlin. Se obtuvieron las constantes del modelo, $\mu_1 = 0.77$ MPa y $\mu_2 = 2.94$ MPa, y se capturaron en el programa, permitiendo así una aproximación más precisa del comportamiento de este material [15].

Prueba mecánica de compresión

Para llevar a cabo la prueba mecánica de compresión se utilizaron las probetas ASTM D695 previamente construidas en SolidWorks. Se estableció en la base del prisma una geometría de sujeción fija, y en la cara superior, con ayuda de la función de carga remota, se ejerció la fuerza, esto con la finalidad de simular la carga uniforme que ejercería una maquina universal de ensayos sobre la probeta en una prueba física de compresión.

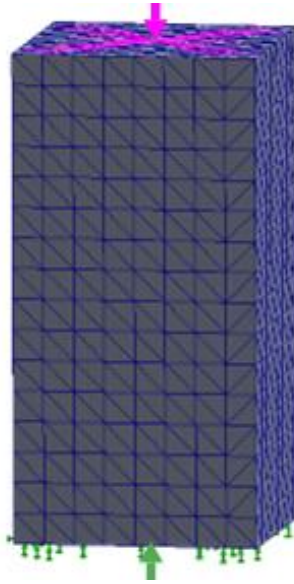


Figura 5. Fuerzas para la simulación de la prueba de compresión [Flechas rosas: vector de fuerza y flechas verdes: geometría fija].

Posteriormente a realizar la debida preparación de la probeta y el material, se ejecutó la simulación de prueba de compresión. Como se observa en la Figura 5, se sujetó en el software la cara inferior y se aplicó en la cara superior una carga con variación lineal en el tiempo, con un valor de 100 N/s hasta llegar al pandeo de la probeta o la deformación plástica del material. Se repitió la misma metodología para todas las probetas ASTM D695 y se obtuvieron curvas de carga-desplazamiento de las distintas combinaciones de mallado y porcentaje de infill, para analizar su deformación elástica de compresión a distintas cargas, así como su carga máxima antes del fallo.

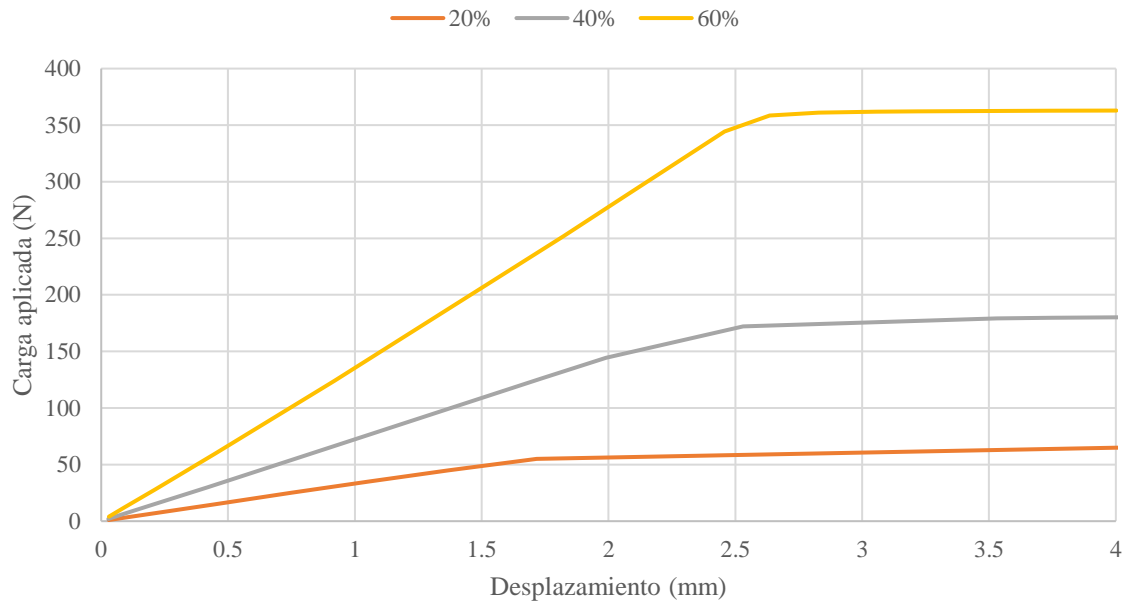


Figura 6. Comparación de curvas carga-desplazamiento para el mallado hexagonal homogéneo a distintos porcentajes de infill

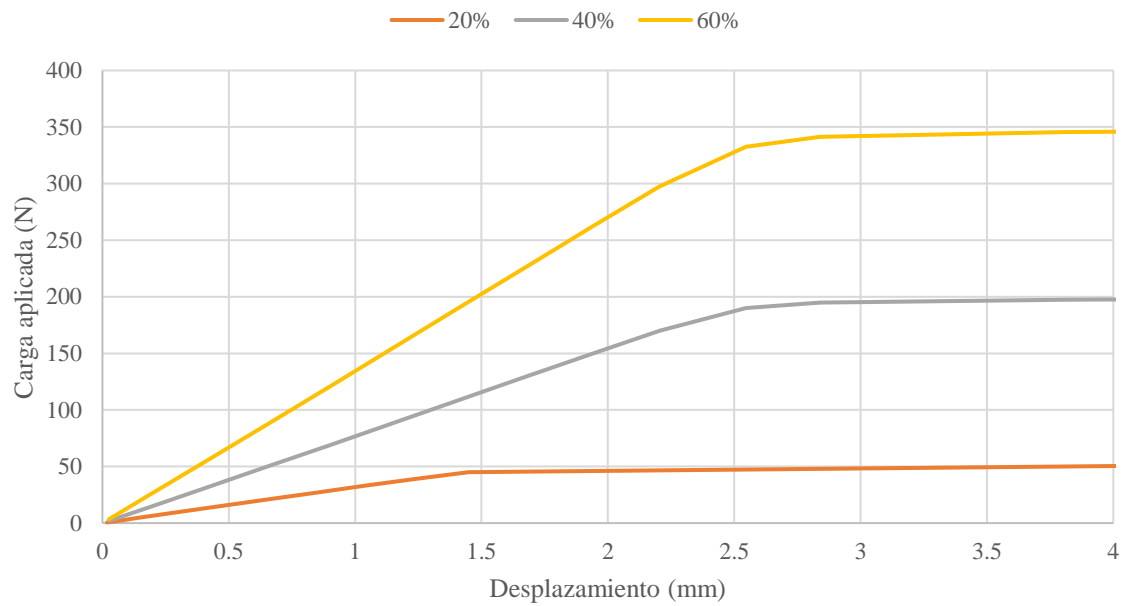


Figura 7. Comparación de curvas carga-desplazamiento para el mallado hexagonal no homogéneo a distintos porcentajes de infill

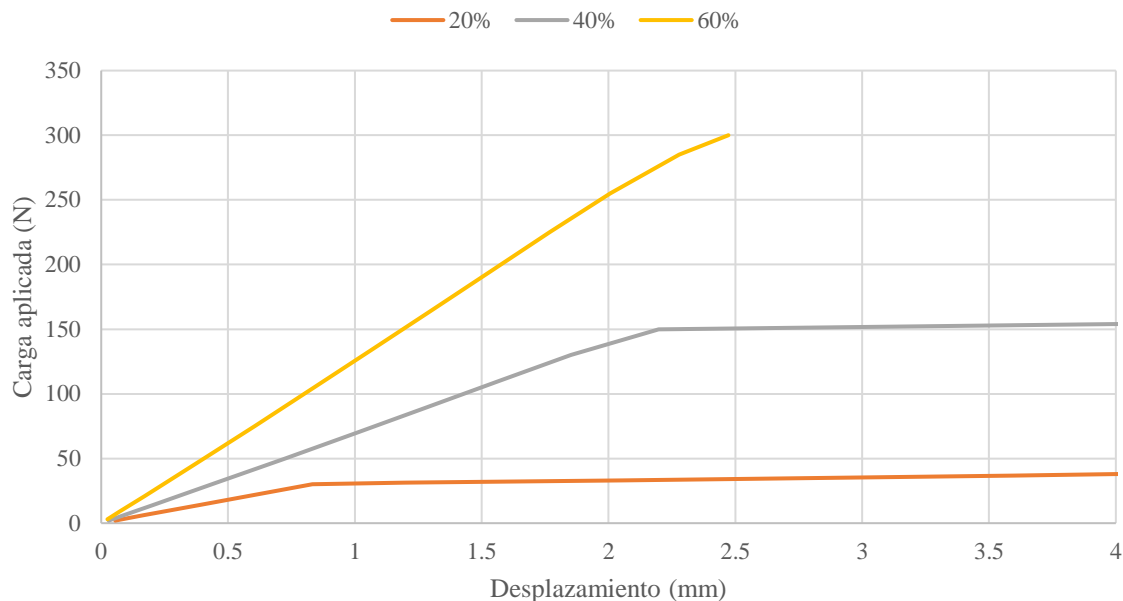


Figura 8. Comparación de curvas carga-desplazamiento para el mallado trapecoide hexagonal a distintos porcentajes de infill

En la Figura 6, Figura 7 y Figura 8 se observan las curvas de carga contra desplazamiento de las probetas de compresión, en las que se observa la relación proporcional entre el porcentaje de infill y la carga máxima soportada por la estructura. Debido a que el área de interés es la región elástica del material, la primera pendiente de cada gráfico, los datos de las gráficas anteriores se acotaron para proporcionar una comparativa del comportamiento de cada infill. Debido a su baja densidad de mallado, las probetas de 20% de infill presentan comparativamente mayor deformación por unidad la misma carga, pero su carga máxima es más baja, debido a que su inestabilidad estructural las vuelve propensas al pandeo.

El comportamiento compresivo de los infills de 40% se encuentra entre el de los de 20% y 40%. Estos poseen una deformación máxima cercana a las de 60%, pero requiriendo una menor carga. Por tanto, se concluye que un infill de 40% permite una deformación elástica similar a mallados con mayor densidad, pero requiriendo una menor carga.

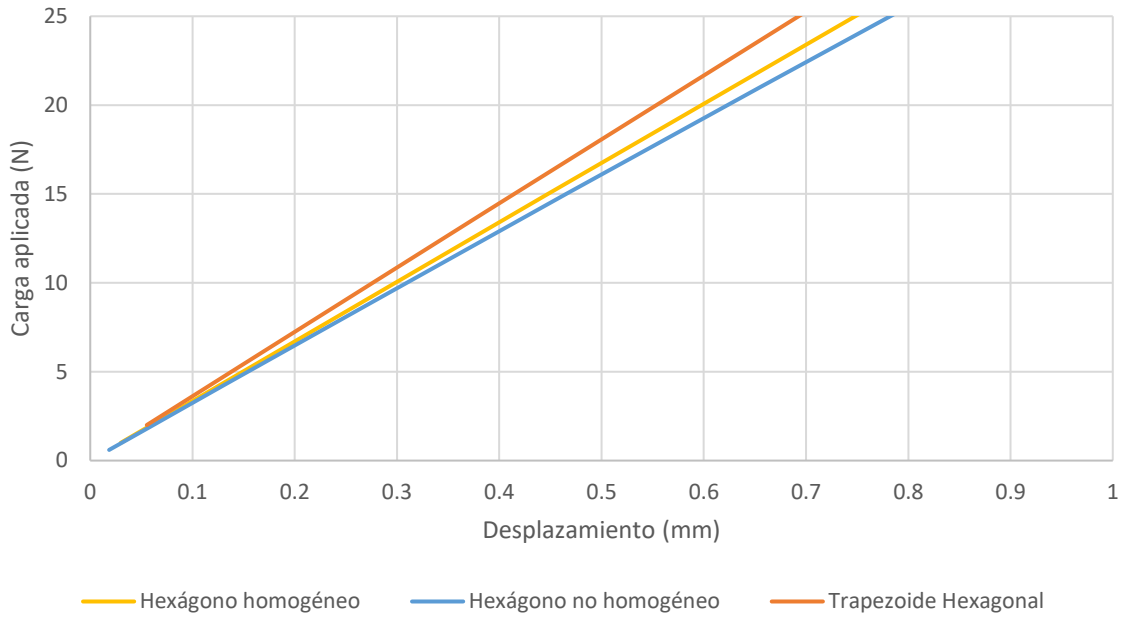


Figura 9. Comparación de compresión por mallado con un infill de 20%.

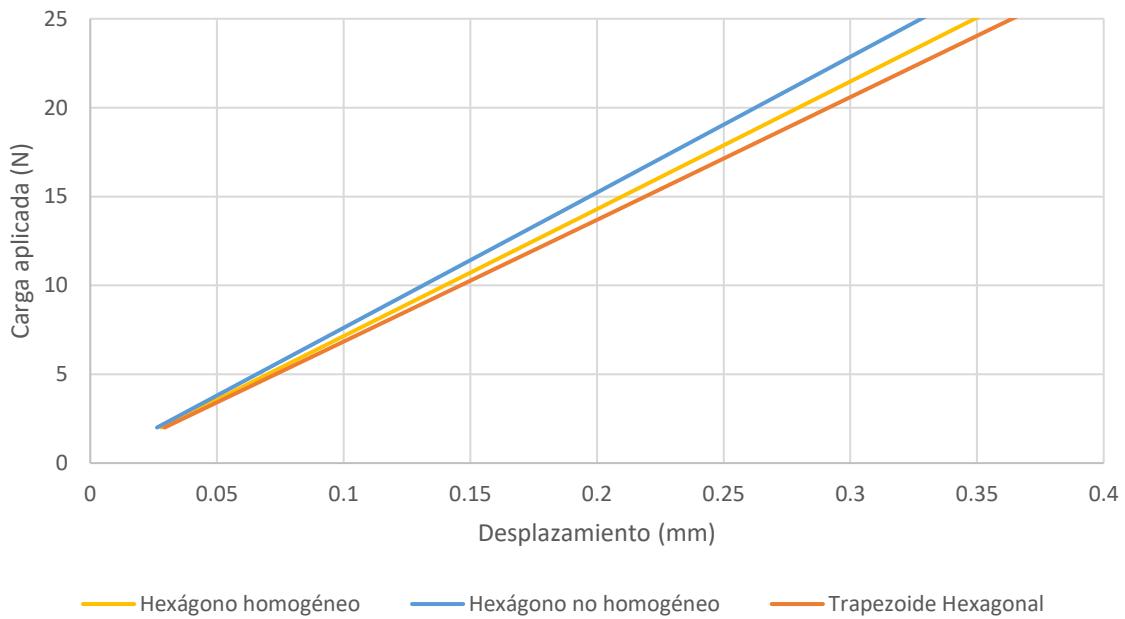


Figura 10. Comparación de compresión por mallado con un infill de 40%.

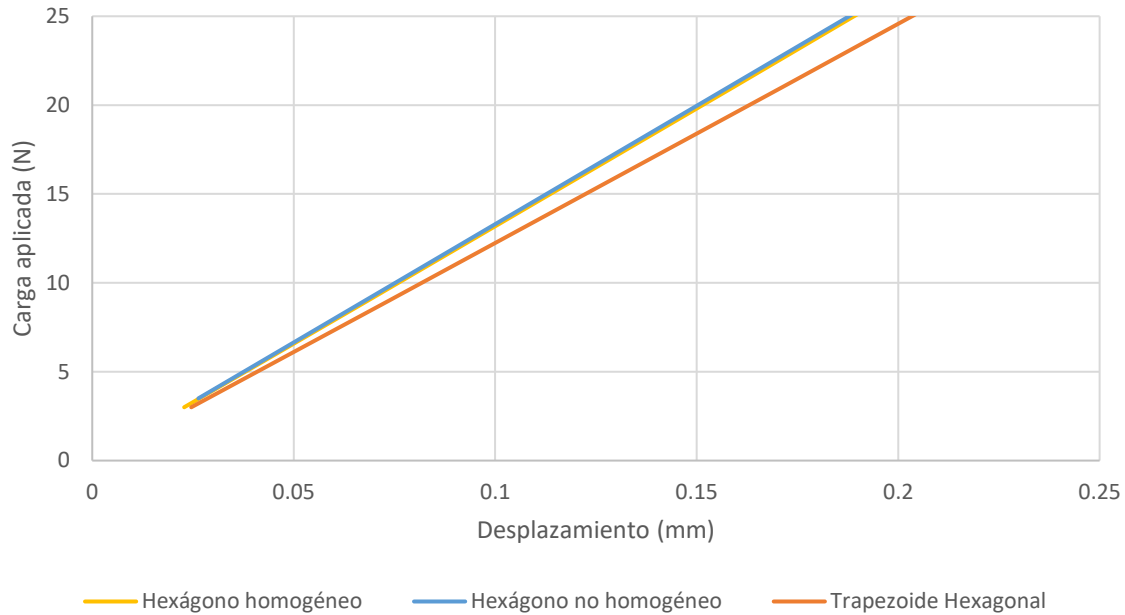


Figura 11. Comparación de compresión por mallado con un infill de 60%.

Tomando una carga de referencia de 25 N, en la Figura 9, Figura 10, Figura 11 se observa el comportamiento de los tipos de mallado a diferentes densidades de infill. En las probetas con infill de 20%, la estructura de trapecio hexagonal demostró ser la más estructuralmente sólida de los tres mallados, deformándose en menor medida que sus contrapartes más propensas al pandeo. En el caso de las probetas de 40% y 60%, fue esta estructura la que permitió mayor deformación de la pieza con una carga de 25 N, por lo que es un mallado ideal para estructuras compresibles a bajas cargas, como lo es el infill de una prótesis de seno.

Prueba mecánica de tensión

Para la prueba mecánicas de tensión se utilizaron probetas ASTM D638, repitiendo un proceso similar al de la prueba de compresión, se estableció la geometría fija y la dirección del vector de fuerza. En la Figura 12 se observa el acomodo de la geometría y la fuerza de tensión para llevar a cabo la prueba mecánica.



Figura 12. Geometría de fuerza y sujeción para la simulación de la prueba de tensión [Flechas rosas: vector de fuerza y flechas verdes: geometría fija].

Con el objetivo de obtener simulaciones realistas, se apegó a la medida de la distancia entre mordazas de la normativa ASTM D638, que se observa en la Tabla 2, con el fin de llevar a cabo una correcta prueba de tensión, dejando un espacio de 65 mm entre las sujeciones (mordazas). Posteriormente, se llevaron a cabo las simulaciones de la prueba de tensión, llevando en cada caso las probetas hasta su límite elástico. A partir de las simulaciones realizadas se obtuvieron gráficos de fuerza contra desplazamiento, agrupando los datos por tipo de mallado y estableciendo como comparación una probeta de TPU sólida (infill 100%).

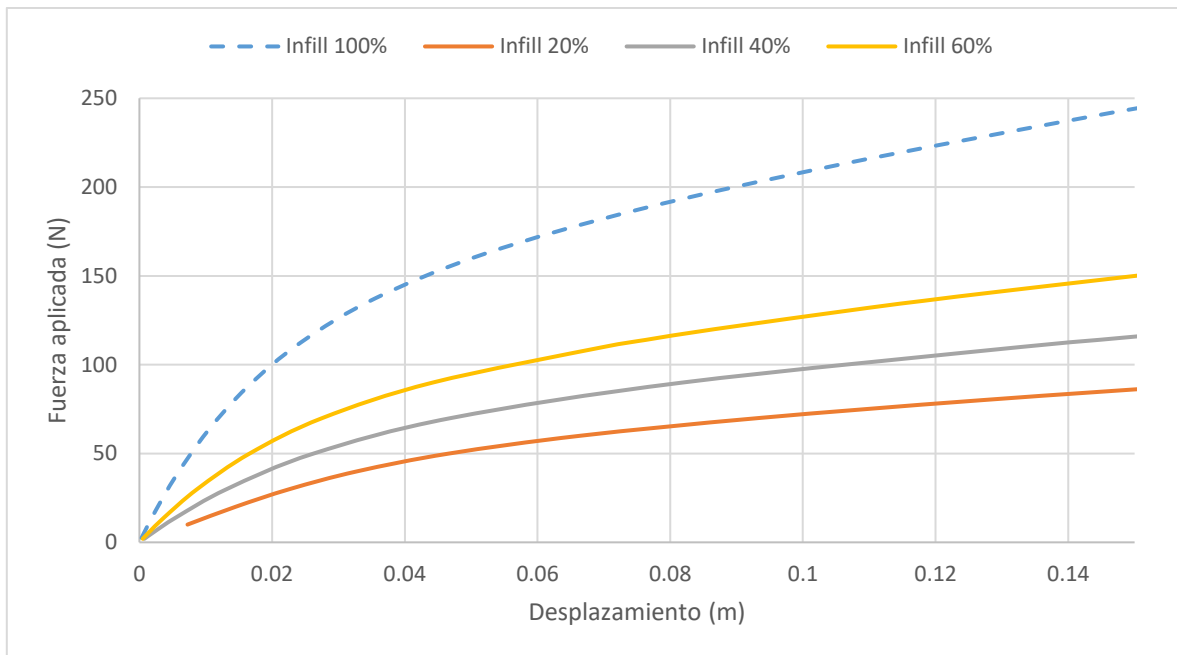


Figura 13. Comparación de curvas carga-desplazamiento para el mallado homogéneo hexagonal a distintos porcentajes de infill.

En la Figura 13, se observan los gráficos de carga contra desplazamiento para las probetas con un mallado hexagonal homogéneo. Se observa que conforme aumenta el porcentaje de infill en las probetas, la fuerza necesaria para generar la misma deformación también aumenta.

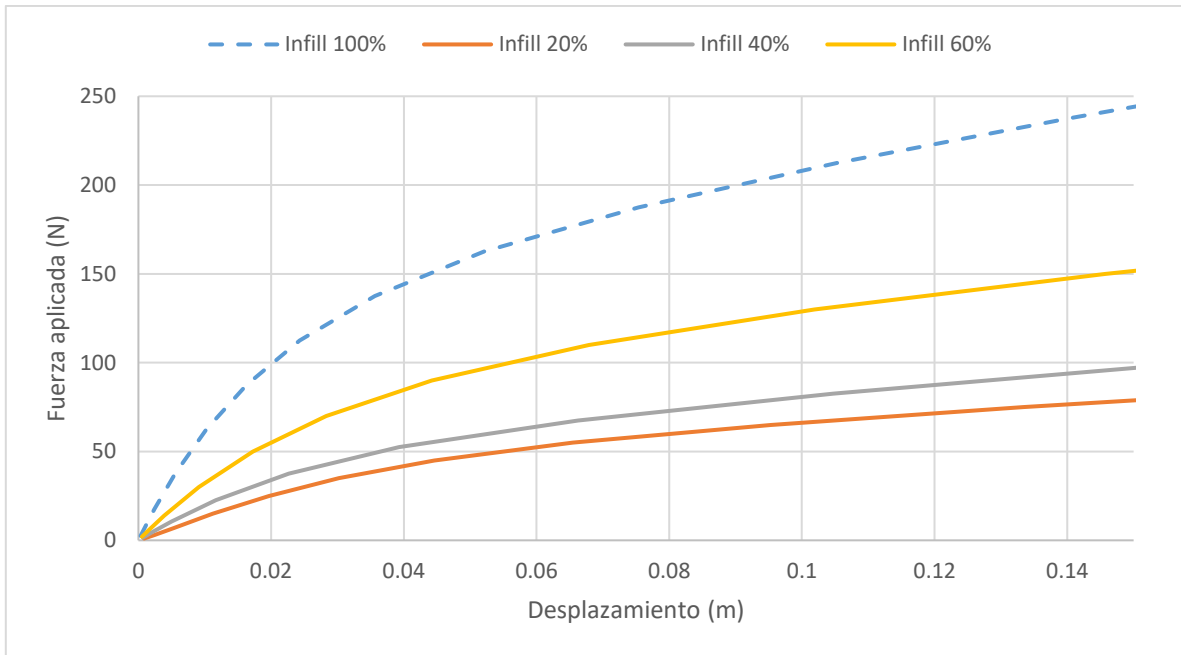


Figura 14. Comparación de curvas carga-desplazamiento para el mallado no homogéneo hexagonal a distintos porcentajes de infill.

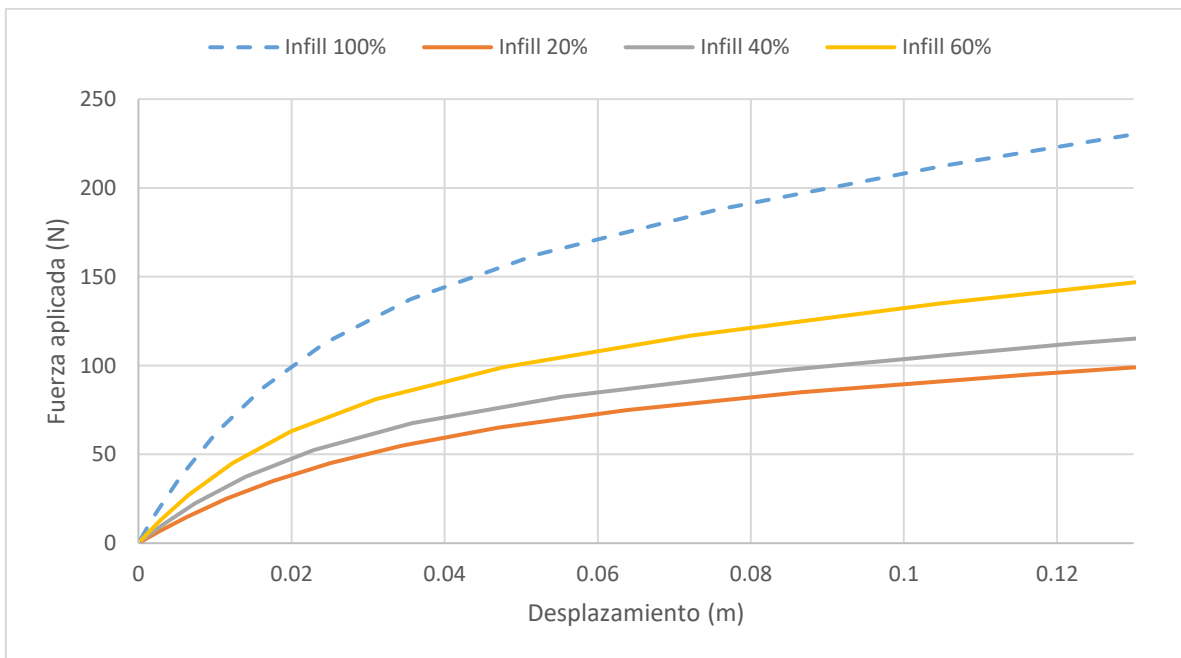


Figura 15. Comparación de curvas carga-desplazamiento para el mallado trapezoide hexagonal a distintos porcentajes de infill.

En la Figura 14 y la Figura 15, se observa el mismo tipo de gráficos que en la Figura 13, curvas de carga contra desplazamiento, siendo el de la Figura 14 un mallado hexagonal FO-DGA-CPAP-0017

homogéneo y en la Figura 15 un mallado trapezoide hexagonal. Ambos casos muestran el comportamiento descrito de la Figura 13, conforme aumente el porcentaje de infill en la probeta, la fuerza necesaria para generar desplazamientos aumentara.

A partir de la Figura 13, Figura 14 y Figura 15, se observa el efecto de los infills en el comportamiento de la resistencia de las cargas, sin embargo, también es importante comparar el efecto que tienen los tipos de mallado para el mismo infill, con el propósito de determinar cuál es el adecuado para la prótesis. En la Figura 16, Figura 17 y Figura 18, se presentan gráficos comparativos donde se busca apreciar como varia para un mismo infill el comportamiento de las probetas a la tensión, siendo la única variable el tipo de mallado hexagonal.

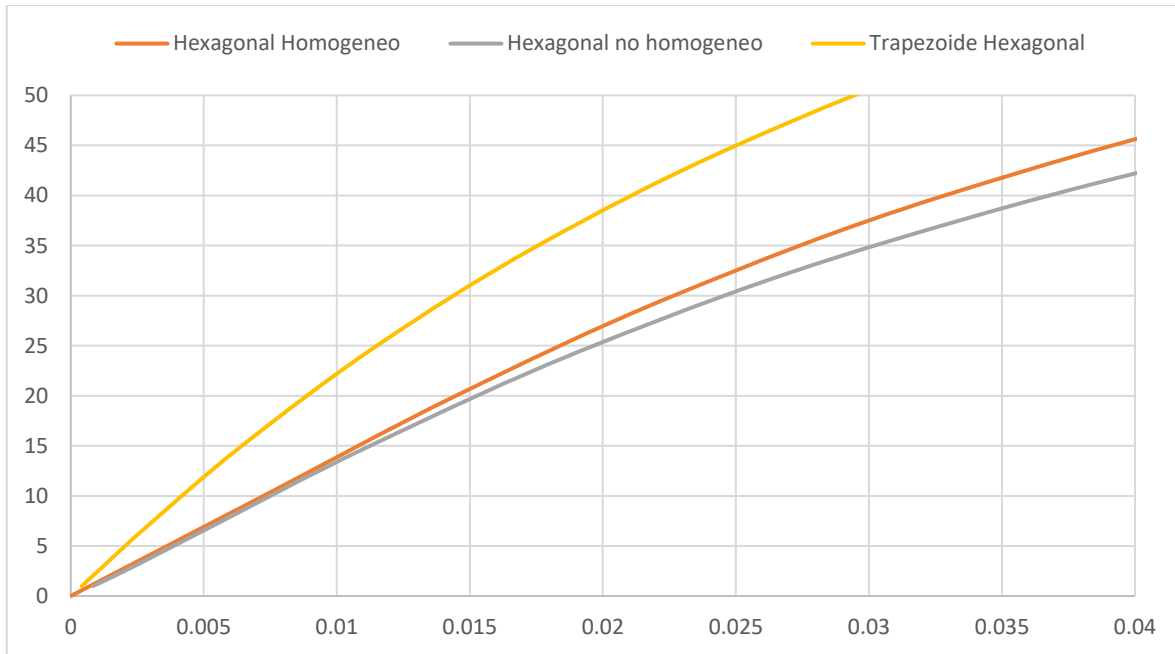


Figura 16. Comparación de tensión por mallado con un infill de 20%.

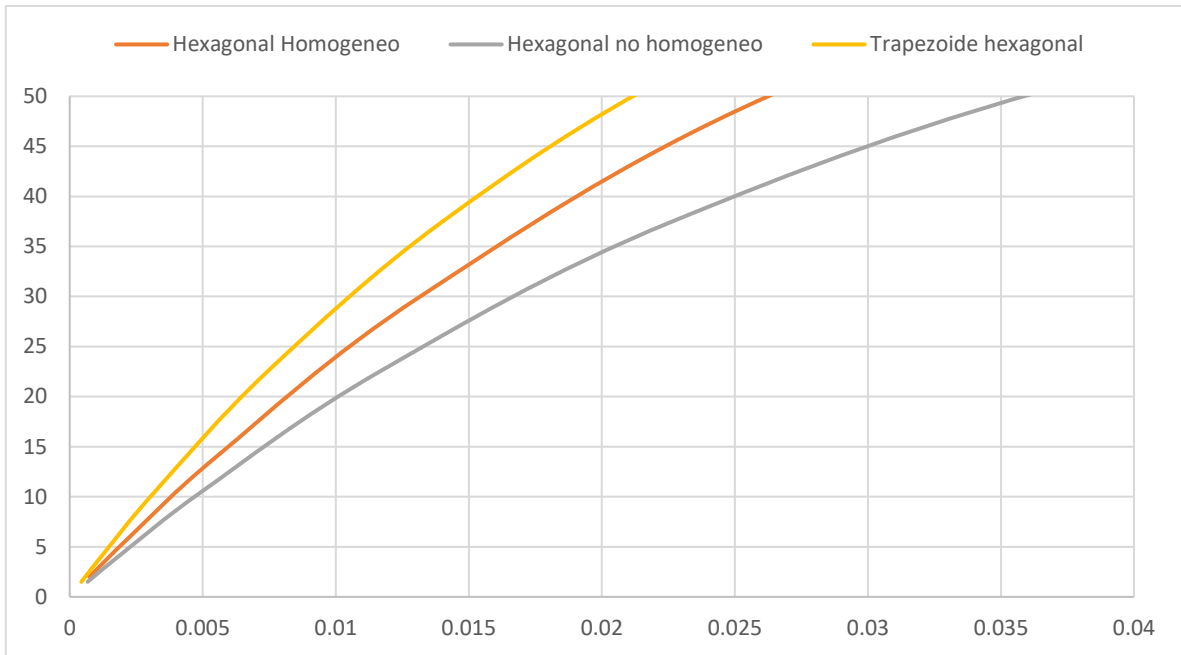


Figura 17. Comparación de tensión por mallado con un infill de 40%.

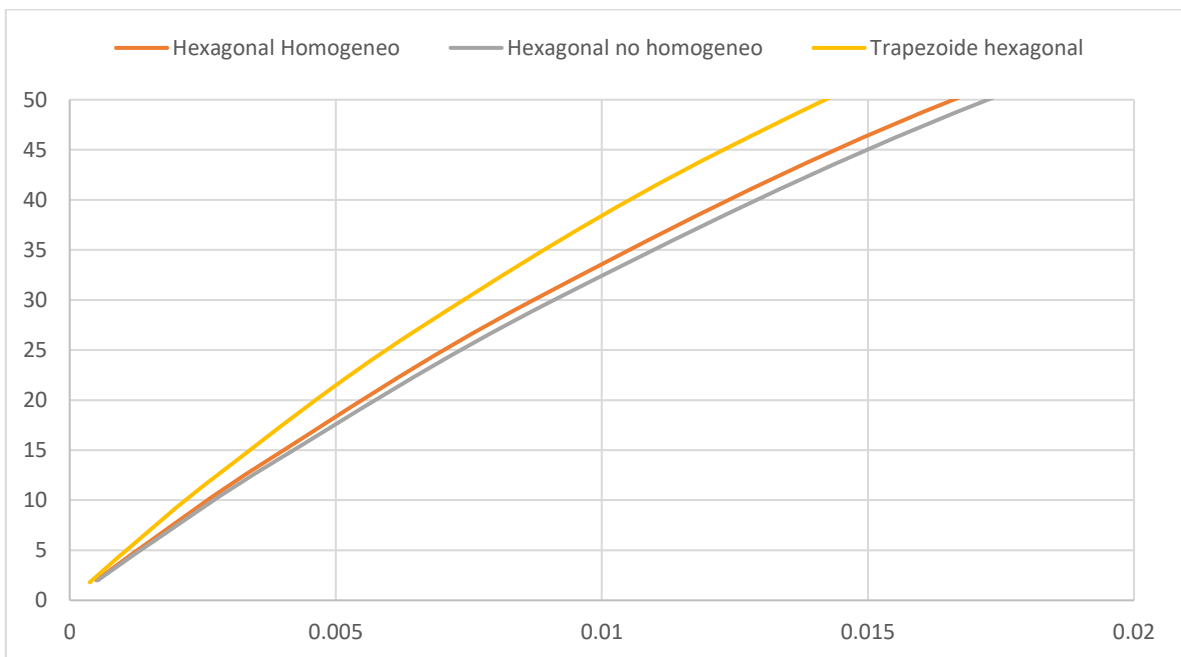


Figura 18. Comparación de tensión por mallado con un infill de 60%.

A partir de la Figura 16, Figura 17 y Figura 18, se observa que en los tres casos de infill (20%, 40% y 60%) se mantuvo una tendencia general de resistencia a la deformación, siendo

el mallado trapezoide hexagonal el que menos deformación tuvo al verse expuesto a una fuerza aplicada de 50 N, y el mallado hexagonal homogéneo el que tuvo mayor deformación.

Tomando en cuenta los resultados de las pruebas de tensión y compresión, el mallado de trapezoide hexagonal con 40% o 60% de infill es una propuesta adecuada para su aplicación en una prótesis externa de seno, puesto que presenta la mejor resistencia a la tracción, a la vez que puede comprimirse elásticamente una mayor distancia que los otros tipos de mallado y porcentajes, obteniendo así una estructura resistente y flexible, a pesar de estar elaborada con un termoplástico.

Para realizar una comparación numérica, se calculó el coeficiente de rigidez k para cada una de las probetas, utilizando la siguiente ecuación:

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

Ecuación 1. Ecuación del coeficiente de rigidez

Donde F es la carga aplicada a la probeta, medida en N, y δ es el desplazamiento total de la pieza, medida en m. De esta forma, mientras menor sea el coeficiente k de la estructura, tendrá mayor flexibilidad, y mayor capacidad de tensión y compresión, siempre y cuando no se supere el límite de tensión.

Tabla 5. Coeficientes de rigidez calculados para combinaciones de mallados y densidades de infill

| Tensión (N/m) | | | |
|------------------------|----------|----------|-----------|
| | 20% | 40% | 60% |
| Hexagonal homogéneo | 1010.56 | 1475.23 | 2526.11 |
| Hexagonal no homogéneo | 1283.29 | 1632.4 | 2861.89 |
| Trapezoide hexagonal | 1814.5 | 1898.45 | 2625.91 |
| Compresión (N/m) | | | |
| | 20% | 40% | 60% |
| Hexagonal homogéneo | 32342.69 | 72646.56 | 140128.53 |
| Hexagonal no homogéneo | 31256.69 | 77267.39 | 133238.58 |

| | | | |
|----------------------|---------|---------|-----------|
| Trapezoide hexagonal | 36034.6 | 69309.9 | 124662.34 |
|----------------------|---------|---------|-----------|

En la Tabla 5, se observan los valores de rigidez calculados para cada combinación de tipo de mallado y porcentaje de infill, divididos por tipo de probeta (ASTM D638 y ASTM D695). Estos valores se obtuvieron a partir de los gráficos de carga-desplazamiento presentados con anterioridad, siendo la pendiente para la sección sin deformación plástica permanente el valor de rigidez en cada caso.

Como es predecible, los valores del coeficiente de rigidez son directamente proporcionales a el porcentaje de infill, puesto que mientras mayor sea la densidad, se utilizará más material y existirán más nodos que puedan distribuir las cargas, por lo que los porcentajes de infill mayores tendrán una carga máxima mayor. De igual manera, la relación inversamente proporcional de k con el desplazamiento, indica que mientras mayor sea el porcentaje de infill, menor será el desplazamiento final de la pieza, sometiéndola a la misma carga.

1.6. Valoración de productos, resultados e impactos

Durante el desarrollo de este PAP, principalmente tuvimos la oportunidad de expandir nuestros conocimientos en áreas que suelen ser fuera del estudio de nuestra carrera (Ingeniería en nanotecnología), permitiéndonos desarrollar por cuenta propia conocimientos sobre uso y preparación de simulaciones en el programa SolidWorks, retomar, fortalecer y complementar conocimientos en el ámbito de ciencia de materiales, así como, recopilar e interpretar datos con el propósito de satisfacer el objetivo general de este proyecto.

Es importante mencionar, que, a raíz de haber desarrollado este proyecto, no solo adquirimos nuevas habilidades, sino también conocimiento en nuevas áreas, como lo fue la impresión 3D enfocado al ámbito de la medicina, dando como resultado un nuevo foco de interés para la aplicación de nuestros aprendizajes durante la carrera.

Uno de los resultados más valiosos que obtuvimos durante esta investigación fue la selección del material, puesto que, aunque se presentaban tres opciones iniciales TPU, ABS y PLA, al analizar las propiedades mecánicas y aplicaciones de cada uno, el TPU era sin lugar a duda

la opción más beneficiosa para la aplicación futura, una prótesis de seno, debido a su bajo módulo de Young y alta flexibilidad.

El segundo resultado clave del proyecto, fue la selección del mallado y su infill, escoger mallados basados en hexágonos permitió la optimización del uso del material, así como la obtención de estructuras estables y con propiedades mecánicas resistentes. De igual manera, experimentar con distintas densidades de infill demostró que resistencia y estabilidad estructural de un tipo de mallado está directamente relacionado con el porcentaje utilizado, por lo que es importante escoger la densidad que mejor se adecúe a las propiedades mecánicas que se requieren de la pieza a diseñar.

Las simulaciones, y cálculos derivados de esta, nos llevó a seleccionar el mallado de trapecioide hexagonal con 40% de infill como la mejor opción de todas las consideradas en esta investigación. Esta estructura presentó la mayor rigidez a la tensión, y la menor rigidez en compresión, resultando en una estructura fácilmente comprimible sin deformarse plásticamente, así como resistente a fuerzas de tensión, propiedades similares al comportamiento de una mama o una prótesis de otro tipo de material.

Como segunda etapa del proyecto, a realizar en el periodo Otoño 2022, se espera llevar a cabo el estudio teórico de pruebas de flexión utilizando SolidWorks. También se espera llevar a cabo la impresión 3D de las probetas ASTM D638 y ASTM D695, con la finalidad de realizar las pruebas de tensión y compresión que fueron simuladas durante este PAP y poder así corroborar los resultados esperados teóricamente.

1.7. Bibliografía y otros recursos

- [1] Y. Tao, J. Shao y S. Q. Shi, «Application of thermoplastic polyurethane/polylactic acid composite filament for 3D-printed personalized orthosis,» *Materials and technology*, vol. 53, n° 1, 2019.

- [2] B. Montejó Maillo, A. B. San Pedro, P. Armisén Bobo, E. Montero Moreno, F. Blayo Haro y J. A. Juanes, «Methodology of custom design and manufacturing of 3D breast prostheses,» 23 Octubre 2020.
- [3] S. P. Hawes, A. Wentworth y A. W. Ma, «Prosthesis Development Utilizing Additive Manufacturing and Low-Cost Electronics,» 2017.
- [4] Ultimaker, «Technical data sheet PLA,» 28 Febrero 2017. [En línea].
- [5] Ultimaker, «Technical data sheet ABS,» 28 Febrero 2017. [En línea].
- [6] NinjaTek, «NinjaFlex® 3D Printing Filament,» Abril 2016. [En línea]. Available: <https://ninjatek.com/wp-content/uploads/NinjaFlex-TDS.pdf>.
- [7] K. Chynbekova y S.-M. Choi, «Flexible Patterns for Soft 3D Printed Fabrications,» *Symmetry*, vol. 11, n° 11, 2019.
- [8] L. Baich, «Impact of Infill Design on Mechanical Strength and Production Cost in Material Extrusion Based Additive Manufacturing,» Youngstown, 2016.
- [9] A. Anupindi y A. Zolfagharian, «Compression Behavior analysis of a 3D printed Honeycomb infill pattern,» *International Journal of Scientific & Engineering*, vol. 11, n° 6, Junio 2020.
- [10] B. Pernet, J. K. Nagel y H. Zhang, «Compressive Strength Assessment of 3D Printing Infill Patterns,» *Procedia CIRP*, vol. 105, 2022.
- [11] M. Heidari, S. Shahbazi y M. Ghodusi, «Evaluation of body esteem and mental health in patients with breast cancer after mastectomy,» *Journal of Mid-life Health*, vol. 6, n° 4, 2015.
- [12] ASTM International, «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics,» 2017.
- [13] ASTM International, «Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics,» 2016.
- [14] M. Alharbi, I. Kong y V. I. Patel, «Simulation of uniaxial stress–strain response of 3D-printed polylactic acid by nonlinear finite element analysis,» *Applied Adhesion Science*, vol. 8, n° 5, Julio 2020.

- [15 T. Reppel y K. Weinberg, «Experimental Determination of Elastic and Rupture Properties of Printed Ninjaflex,» *Technische Mechanik*, vol. 38, n° 1, 2018.
- [16 A. De Leon, A. Calvo y S. I. Molina, «Materials with enhanced adhesive properties based on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)/thermoplastic polyurethane (TPU) blends for fused filament fabrication (FFF),» *Materials and Design*, vol. 182, 2019.
- [17 Autodesk, «Finite Element Analysis Software (FEA SOFTWARE),» [En línea]. Available: [https://www.autodesk.com/solutions/finite-element-analysis#:~:text=Finite%20element%20analysis%20\(FEA\)%20is,the%20way%20it%20was%20designed..](https://www.autodesk.com/solutions/finite-element-analysis#:~:text=Finite%20element%20analysis%20(FEA)%20is,the%20way%20it%20was%20designed..)
- [18 Y. Gonzales, «The Sky is Not the Limit: Mechanical Engineering, Design, and Finite Element Analysis,» [En línea]. Available: <https://engenuityinc.ca/the-sky-is-not-the-limit-mechanical-engineering-design-finite-element-analysis/>.
- [19 B. Croop, «ASTM D638 TYPE IV,» 24 Julio 2014. [En línea]. Available: https://www.datapointlabs.com/Images/Specimens/ASTM_D638_TypeIV.pdf.

1.8. Anexos generales

2. Productos

| | |
|--|---|
| Nombre y código del PAP | PAP4D08 Programa de Desarrollo tecnológico para la sustentabilidad ambiental, energética y alimentaria |
| Nombre del proyecto | Método de evaluación de diferentes mallas en probetas |
| Descripción (qué es, para quién se realizó y para qué es): | Propuesta/Estrategia: Documento que compara teóricamente y con ayuda de simulaciones las propiedades mecánicas de probetas ASTM D638 y ASTM D695, con diferentes tipos y porcentajes de mallado, para su potencial aplicación en una prótesis externa de seno. |
| Autores: | Ana Paulina Veloso Ramirez Israel Vargas Guevara |

Computational Analysis of the Effect of Infill Pattern and Density on the Mechanical Properties of TPU Specimens.

F. Castro^{1,2*}, I. Vargas¹ y P. Veloso¹

¹ Instituto Tecnológico y de estudios superiores de Occidente, Industrial process department, Guadalajara, Mexico

² Tecnológico de Monterrey, school of engineering and science, Guadalajara, Mexico

Fermin.castro@iteso.mx

Abstract

This paper presents a computational analysis of the mechanical properties of TPU specimens, relating the type of infill and its density to said properties. TPU specimens were model in accordance with ASTM D638 and D695 standard tests using SolidWorks. Three types of infill were design and applied to the specimens solids, focusing on hexagonal based structures. Afterwards, finite element analyses (FEA) were performed to simulate tensile and compression tests to approximate the mechanical behavior of the TPU specimens. Mooney-Rivlin model for hyperplastic materials was used based on the experimental properties of 3D printed TPU specimens. Load-displacement curves were obtained for each infill pattern and density, comparing stiffness, maximum load and maximum displacement.

Key words: Compression, Infill, Polyurethane Thermoplastic, Tension.

1. Introduction

Breast cancer is a serious affection among women, affecting 1 out of 8 women worldwide. Detection on initial stages and proper medical care translate on high chances of preserving the breast or breasts without suffering big asymmetries or deformities. In cases where preserving the breast tissue is not an option, mastectomy is performed. Grave consequences of the latter treatment that are often overlooked are psychological, showing decrease of their self-esteems, self-confidence and change of perception of their womanhood, resulting in not only a difficult physical recovery process, but also an emotional one [2, 11].

In search of innovative treatments and technologies, the medical field is constantly changing. One innovative technology that is being use, especially on the orthosis field, is 3D printing, this due to low costs on production and the constant evolution of the materials use; the most used technique of 3D printing is fused deposition modelling (FDM) [1]. The medical field has focused as their main application of 3D printing the production of prosthesis, providing flexible low weight and cost prosthesis, characteristic that are valuable for breast prosthesis [2].

Based on the issue stated above, this paper presents the comparison of different polymers: thermoplastic polyurethane (TPU), polylactic acid (PLA) and acrylonitrile butadiene styrene, followed by computational finite element analysis (FEA) on SolidWorks of diverse hexagonal infills in search of the combination of polymer and infill that exhibits the best mechanical properties to fabricate breasts prosthesis.

2. Methodology

2.1 Material properties

Thermoplastic polyurethane, in comparison with other types of 3D filaments, has a lower young's modulus, which makes it ideal for prosthesis applications [3]. According to the Ninjaflex Technical Data Sheet and presented in *Table 1*, mechanical properties of TPU are:

Table 1. Mechanical properties for TPU.

| TPU | |
|----------------------------|------------------------|
| Tensile Modulus | 12 MPa |
| Tensile Strength, Ultimate | 26 MPa |
| Tensile Strength, Yield | 4 MPa |
| Density | 1190 Kg/m ³ |
| Elongation at Yield | 65% |
| Elongation at Break | 660% |

Note: Mechanical properties taken from Ninjaflex [6].

2.2 Modeling of testing specimens

Following the ASTM D638 and ASTM D695 standard test methods, tensile and compressive specimens were modeled in SolidWorks.

For tensile test specimens, ASTM D638 standard test method is followed, using a type IV specimen, with the shape and dimensions reflected on *Figure 1* and *Table 2* respectively.

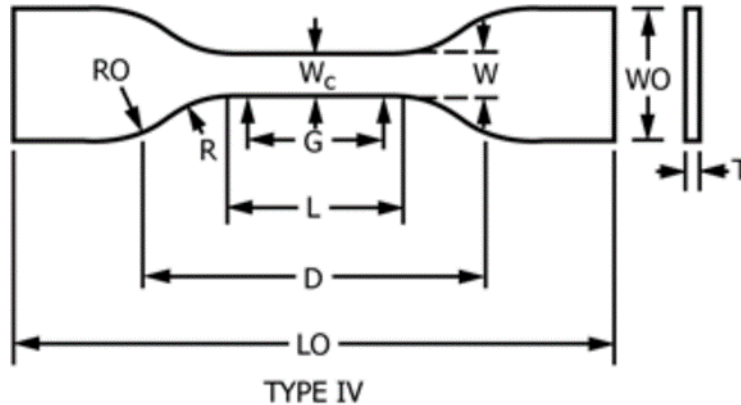


Figure 1. ASTM D638 type IV diagram [12].

Table 2. Specimen dimensions for Thickness, T, mm(in) [12].

| Dimensions (see drawing) | Type IV | Tolerances |
|------------------------------------|-----------|----------------|
| <i>W</i> —Width of narrow section | 6 (0.25) | ±0.5 (±0.02) |
| <i>L</i> —Length of narrow section | 33 (1.30) | ±0.5 (±0.02) |
| <i>W0</i> —Width overall | 19 (0.75) | + 6.4 (+ 0.25) |

| | | |
|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| <i>LO</i> —Length overall | 115 (4.5) | no max (no max) |
| <i>G</i> —Gage Length | 25 (1.00) | ± 0.13 (± 0.005) |
| <i>D</i> —Distance between grips | 65 (2.5) | ± 5 (± 0.2) |
| <i>R</i> —Radius of fillet | 14 (0.56) | ± 1 (± 0.04) |
| <i>RO</i> —Outer radius (Type IV) | 25 (1.00) | ± 1 (± 0.04) |

According to the standard test method, specimens must have a thickness of 3.2 ± 0.4 mm, measure that was also included in the CAD design.

Likewise, compression tests specimens are elaborated following the ASTM D695 standard test method, that indicates the usage of a cylinder or a square prism whose length must be twice its diameter. For this analysis, a square prism is going to be use, having measures of 25.4 mm x 25.4 mm x 50.8 mm, as shown on *Figure 2* [13].

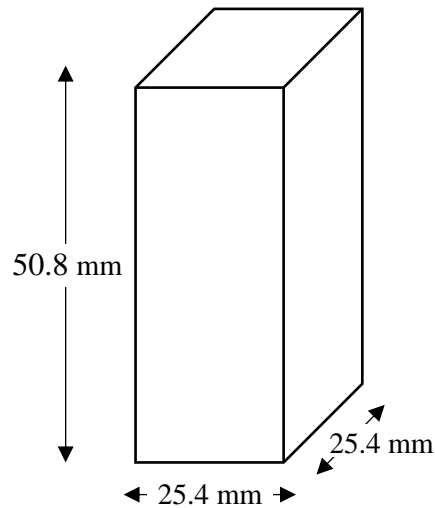


Figure 2. ASTM D695 specimens diagram.

Using the filled pattern tool on SolidWorks, infills shown in *Figure 3* where modeled, and using volume approximations, infills density of 20%, 40% and 60% where obtained, resulting in 9 specimens for the tensile test and 9 specimens for the compression test.

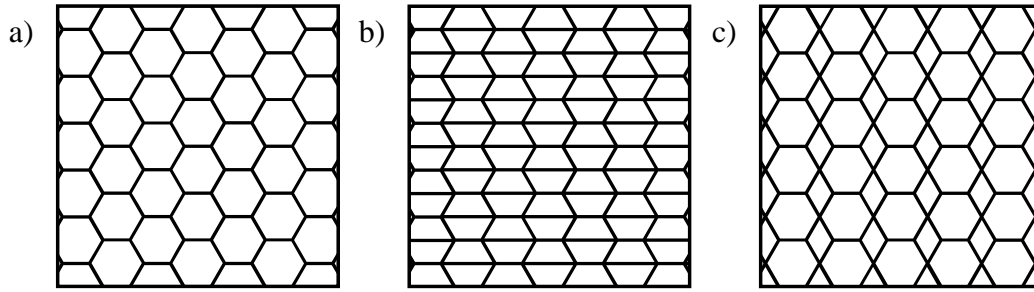


Figure 3. Types of hexagonal based infills: a) Homogeneous Hexagonal, b) Non-Homogeneous Hexagonal and c) Hexagonal Trapezoid.

Ampliando en la elaboración de las probetas y los infills, en un croquis se diseñaron los patrones a repetir para crear los infills, como se ilustra en *Figure 4* , utilizando ecuaciones se variaron el tamaño de los patrones manteniendo así un espesor de pared de 1 mm, siendo este independiente de porcentaje de infill.

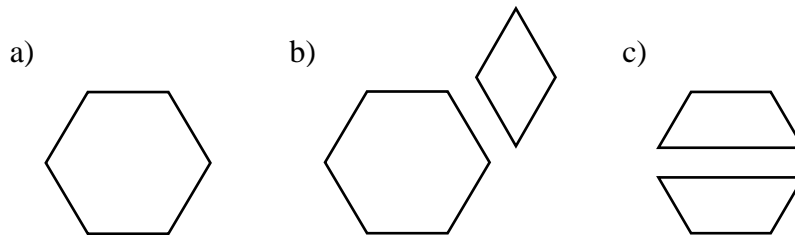


Figure 4. Patterns for a) Homogeneous Hexagonal, b) Non-Homogeneous Hexagonal and c) Hexagonal Trapezoid.

Utilizando la herramienta patrón de mallado, se generaron las mallas en la superficie de las probetas, que posteriormente se restaron de los sólidos principales y resultaron en probetas con infills de porcentaje variable. Finalmente, se modificó iterativamente el tamaño de los patrones para obtener los infills deseados para cada uno de los tipos de mallado.

2.3 Finite Element Simulation

Después de realizar pruebas preliminares y analizar datos experimentales sobre el TPU, se llegó a la conclusión de que el TPU es un material hiperelástico, por lo que el modelo más adecuado para utilizar en la simulación fue el modelo de Mooney-Rivlin. Se obtuvieron las constantes del modelo, $\mu_1 = 0.77$ MPa y $\mu_2 = 2.94$ MPa, y se introdujeron en el programa, permitiendo así una aproximación más precisa del comportamiento de este material [15].

Para llevar a cabo la prueba mecánica de compresión se utilizaron las probetas ASTM D695 previamente construidas en SolidWorks. Se estableció en la base del prisma una geometría de sujeción fija, y en la cara superior, con ayuda de la función de carga remota, se ejerció la fuerza, esto con la finalidad de simular la carga uniforme que ejercería una maquina universal de ensayos sobre la probeta en una prueba física de compresión.

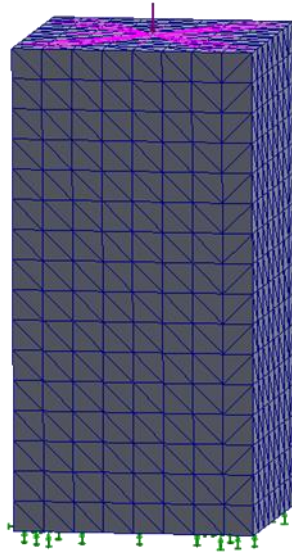


Figure 5. Fixed geometry and remote load for the compression test simulation.

Para la prueba mecánicas de tensión se utilizaron probetas ASTM D638, repitiendo un proceso similar al de la prueba de compresión, se estableció la geometría fija y la dirección del vector de fuerza. En la se observa el acomodo de la geometría y la fuerza de tensión para llevar a cabo la prueba mecánica.

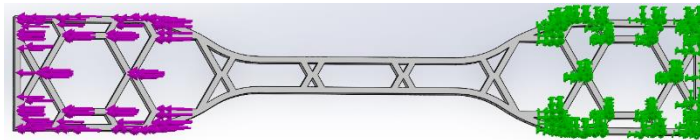


Figure 6. Fixed geometry and remote load for the simulation of the tensile test.

Con el objetivo de obtener simulaciones realistas, se apegó a la metodología establecida en la normativa ASTM D638, que se observa en la *Figure 1*, llevando así una correcta prueba de tensión, dejando un espacio de 65 mm entre las sujeciones (mordazas) como se establece en la *Table 2*, presentada con anterioridad.

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: Al momento de desarrollar este proyecto lo primero a realizar fue contextualizarnos con respecto al tema, investigar sobre el tema en general, ¿Qué es el cáncer de mama? ¿Qué

sienten las personas que viven este proceso? Sin duda es un tema del cual antes de este proyecto, tenía el mínimo entendimiento. Después de leer al respecto, fui comprendiendo no solo que cambios físicos sufren, sino también como de forma emocional este suceso afecta su vida, como se visualizan a ellas mismas, como aprenden nuevamente a presentarse ante la sociedad sin sentirse juzgadas o diferentes, porque a pesar de poder utilizar prótesis, el aprender a sentir esa confianza ante los demás a pesar de ellas estar conscientes que a sus mismos ojos son diferentes.

Aunque directamente no tuve ninguna clase de acercamiento con personas que han vivido una mastectomía, al leer sobre lo que significa pasar por algo así y como lo van afrontando las diferentes perspectivas, de alguna forma hice cierta conexión, no estoy viviendo lo que ellas sí, pero eso no me detiene a poder empatizar y posteriormente ayudar. En general, la forma de lograr involucrarme de manera adecuada al proyecto fue la educación al respecto del tema, siendo sumamente importante y esto me permitió establecer la mentalidad adecuada para el proyecto.

Uno de los sentimientos que despertó en mí el desarrollo de este proyecto, fue la tristeza de comprender lo que viven más allá las mujeres que la mera mastectomía, ya que no solo fue la realización de la problemática que es, sino que tampoco había caído en cuenta que esta situación no solo lo viven mujeres que cuentan con la economía para estos procedimientos, muchas personas de escasos recursos también lo viven y no cuentan con el acceso para procedimientos como prótesis internas o la compra de prótesis externas que las ayuden a recuperar partes de su vida como las relaciones interpersonales o la devolución de una parte de su autoestima y sentido de feminidad.

A partir de reflexionar, considero que lo que sentí y se decidió a lo largo de proyecto estuvo tanto de la mano con mis creencias como con mi razonamiento, mis creencias me permitieron empatizar con la problemática y querer desarrollar un producto que en verdad ofrezca algo y no sea solamente un producto para vender, y mi razonamiento me ayudo a tomar elecciones en términos de materiales y comprender que se estaba obteniendo y cuál era la mejor opción,

fue un proceso en conjunto y no se pudo llevar a cabo cosas por mera creencia o por mero razonamiento.

A raíz de mi profesión, ingeniería en nanotecnología, e independientemente del amplio campo de aplicaciones que se tiene, en términos de aportaciones éticas y sociales, en mi opinión permite ofrecer soluciones que faciliten la vida de las personas, pero siempre buscando un balance ético, puesto que, sin este balance varias soluciones pueden afectar más que ayudar, y si uno decide perder esta perspectiva, ¿en verdad se está ayudando? Un ejemplo puede ser el desarrollo de nuevos tratamientos médicos contra el cáncer, donde se busca atacar a las células dañinas, sin la perspectiva ética, con solo ver que las ataca se implementaría, pero por ética más estudios se deben realizar para asegurar que las células viables no se están dañando en el proceso. Soluciones se pueden dar, a mi parecer no se debe separar en éticos y sociales, todo desarrollo de soluciones tiene su parte ética, aunque esta no sea fácilmente visible a primera vista.

Israel: A pesar de no estar involucrados con el diseño o fabricación de la prótesis, desde el principio nos fue claro cuál sería la aplicación potencial de este proyecto. Al investigar sobre la dificultad física y emocional de una enfermedad como el cáncer de mama y el duelo que conlleva perder una parte de tu cuerpo como consecuencia de una mastectomía, logré empatizar con las personas afectadas y entendí que mi posición como profesional me brinda la oportunidad de traer perspectivas ajenas a mí al campo de la ciencia, y buscar y desarrollar soluciones a problemas con los que, si bien personalmente no he tenido contacto directo, muchas personas padecen y sufren a diario.

Mi interacción con la problemática fue meramente por medio de investigación, pero eso no significó que la información que leí no fue suficiente para empatizar con las personas afectadas y darme cuenta de que al desarrollar productos, es nuestra responsabilidad, sobre todo productos con tanta importancia física y emocional como lo es una prótesis, tomar en cuenta como factor primordial la satisfacción de las personas a las que está destinado.

A mi parecer, mi perspectiva sobre el proyecto cambió como respuesta a mis creencias, puesto que a pesar de que los resultados no arrojaron la opción más económica, personalmente creo que lo más importante es encontrar las opciones más adecuadas para obtener una prótesis realista y fácil de usar, dentro de las posibilidades del proyecto, a pesar de que esto comprometa el costo, pues creo el proyecto no sólo debe estrictamente satisfacer la problemática, sino hacer todo lo posible para desarrollar el mejor producto para las personas que lo necesitan.

La existencia de mi carrera abre un gran debate ético sobre sus consecuencias ambientales y sociales, puesto que, si bien sus aplicaciones inmediatas representan avances científicos innegables, temas como el daño que provocan las nanopartículas a la salud de las personas o el efecto de nanoestructuras como contaminantes de suelo no están bien estudiados o simplemente no son de interés general. A pesar de que las cuestiones éticas puedan ralentizar o incluso detener una investigación o aplicación nanotecnológica, es de suma importancia tener todas las implicaciones éticas que pueda conllevar un proyecto claras desde un principio, pues el avance de la ciencia no debe realizarse a costa de las personas o el planeta.

3.2 Aprendizajes logrados

Paulina: Hubo varios aprendizajes al llevar a cabo este proyecto.

Un aprendizaje fue conectar los temas visto en la materia de ciencia de materiales y lo que se pedía en el desarrollo del proyecto, comprendiendo que se tenía que realizar y como se debería realizar, y es aquí donde se presentó el primer reto para mí, como voy a llevar a cabo en un programa una simulación de una prueba mecánica (tensión y compresión). Para completar este primer reto, se investigó sobre SolidWorks en general, como se realizan pruebas mecánicas en metales, entender que modelos se usan en estas pruebas y los casos en que se deben de utilizar, conectando así la idea de realizar la prueba mecánica como lo hacen en metales, pero con el debido modelo de simulación, en este caso fue el de Mooney-Rivlin.

Otro aprendizaje fue como conectar los resultados que estaban arrojando estas simulaciones con algo visual o tangible, siendo aquí donde se investigó sobre la rigidez y como a partir de

gráficos de deformación se podían obtener estos valores, así como comprendiendo que significaban. El momento en que comprendí que estaba entendiendo lo que se estaba haciendo, así como que era capaz de llevarlo a cabo correctamente fue cuando se realizó la simulación con el modelo de hiperelasticidad de Mooney-Rivlin, ya que finalmente se conectó el proceso de simular una prueba mecánica y entender los modelos de simulación y como este era el adecuado para lo que se estaba desarrollando.

En términos profesionales, me permití ampliar mis aprendizajes un poco más afuera de lo que encierra ser ingeniero en nanotecnología, utilizando nuevos programas del que tenía nulo conocimiento previo, dándome más competencia profesional. En lo social, aprendí a empatizar más allá de lo que en mi vida personal vivo, existen un sinnúmero de situaciones que simplemente no he vivido y eso no es una razón para cegarme al respecto, así como expandir mis horizontes hacia dónde puedo aportar. Finalmente, en el aspecto personal estoy aprendiendo a manejar mejor mis tiempos, no dejar que el estrés detenga la productividad y el potencial que puedo ofrecer, de igual forma, mejorar la forma en que me comunico para así permitir que mis ideas tengan un mayor alcance.

Israel: El desarrollo proyecto requirió habilidades y conocimientos que no poseía antes de comenzar. Al nunca haber trabajado en un proyecto que involucrara una problemática social, la primera competencia que desarrollé fue la de informarme y contextualizar el objetivo y alcance del proyecto. No me di cuenta lo importante que era entender lo más posible el problema que se está abordando, hasta que me di cuenta de que cada decisión que se toma en el proyecto afecta el resultado final y, en consecuencia, afecta a la respuesta a la problemática que se presentará al final de éste.

Al iniciar el proyecto, otra habilidad en la que tuve que trabajar fue en el uso de softwares de simulación, específicamente SolidWorks, programa con el que no había tenido oportunidad de trabajar antes. El momento de mayor dificultad fue cuando, una vez elaboradas las simulaciones, me fue imposible interpretar los resultados o saber qué tipo de gráfica se estaba buscando para poder realizar comparaciones. Sin embargo, investigando, relacionando

conceptos teóricos y las herramientas del programa, fui capaz de darme cuenta cómo obtener finalmente las curvas que fueron presentadas como los resultados de este proyecto.

En lo social, aprendí lo importante que es no olvidar las implicaciones que tiene un proyecto, y siempre hacer lo posible para que las decisiones que se tomen sean como respuesta a las problemáticas que éste aborda, y no sólo guiarse por datos, sino también utilizar el sentido común y la empatía para ponerse en el lugar de las personas afectadas por la problemática, y tratar de tener sus sentimientos en cuenta para desarrollar un producto que les ayude.

Profesionalmente, me di cuenta de que el no tener conocimientos sobre un tema o sobre el uso de un software no es impedimento para entrar a un proyecto fuera de tu área profesional. A mi parecer, este proyecto presentó un buen reto, que me obligó a investigar y experimentar mucho en temas en los que tenía poco o nulo conocimiento, y esto me sirvió para ampliar mi rango de habilidades y darme cuenta de que los aprendizajes universitarios no están confinados al plan de estudio de la carrera, sino que siempre se pueden extender el área de conocimiento y volver la experiencia aún más enriquecedora.

Finalmente, en el área personal, la organización de tiempos fue un aspecto clave en este proyecto, debido a la corta duración de éste. Me fue necesario ser capaz de administrar el tiempo disponible, pues una buena parte del proyecto se llevo a cabo utilizando equipo del ITESO. Por tanto, tuve que ajustarme a los horarios disponibles y sacar el mayor provecho de las horas utilizadas en el campus, balanceando también la frustración de no conocer el programa que estoy utilizando y evitando en la medida de lo posible que el estrés o cansancio afecte negativamente mi rendimiento.

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

Paulina

| Categorizar los elementos, si es un conocimiento, una habilidad, una actitud, | Competencia | | Evidencia | Relevancia/Fortaleza* | Competencias al final del PAP | Competencias potencializadas |
|---|---------------|--|--|---|--|--|
| | 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. | Aprendizaje del uso de SolidWorks | Mejoro la habilidad de realizar el desarrollo de investigaciones |
| 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. | Comprender que es la constante de rigidez | Mejoro mi habilidad de eficientar tareas y tiempos | |
| 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. | Realizar simulaciones de pruebas mecánicas de compresión y tensión | Mejoro mi habilidad de trabajar en equipo | |
| 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. | Realizar una presentación con los debidos lineamientos | Mejoro mi comunicación con los demás | |
| Física y matemática avanzada | | Haber cursado satisfactoriamente cursos como Variable compleja, Mecánica cuántica, Algebra lineal, etc. en ITESO | Permite solucionar problemas de nivel de complejidad alto así como desarrollar una mejor lógica matemática que se puede aplicar en la resolución de otros problemas. | Aprender cómo funciona la impresión 3D | Practique ser autodidacta | |

| | | | | | | |
|--|-------------|--|---|---|--|--|
| | | 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. | | |
| | 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 | | |
| | Actitudes | Proactiva | Al estar trabajando en equipos y en mi empleo | 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 equipos y en mi empleo | Permite comunicar las 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 observe 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 nuevas habilidades, como lo son las simulaciones en SolidWorks, entender y utilizar el programa mencionado fue una parte importante del proyecto, sin el debido desarrollo del conocimiento y habilidad del programa no habría existido manera de concretar exitosamente el proyecto. Actitudes como la comunicación y el ser autodidacta fueron de suma importancia para aprender lo necesario, así como dialogar con mi compañero de equipo para obtener los mejores resultados posibles.

Israel:

| | Competencia | Evidencia | Relevancia/Fortaleza* | Competencias al final del pap | Competencias potencializadas | |
|---|---------------|---|---|---|---|---|
| Categorizar los elementos, si es un conocimiento, una habilidad, una actitud, | Conocimientos | Comprensión de los parámetros físicos de los materiales | Clase previa | Escoger materiales adecuados con base en sus propiedades físicas y su aplicabilidad al proyecto | Sensibilización ante las problemáticas sociales | Entendimiento y aplicación de temas de ciencia de materiales. |
| | | Diseño en 3D | Diseño de modelos previos en programas de CAD | Modificar la estructura de las probetas para realizarles ensayos | Diseño de CAD en SolidWorks | Manejo del tiempo. |
| | | Realización de ensayos de materiales | Experimentos realizados en clase | Entender los resultados obtenidos por estas pruebas para escoger el material y estructura óptimos | Elaboración de simulaciones en SolidWorks | |
| | | Dominio de inglés | Certificación | Obtener fuentes bibliográficas de otros países | Implementación correcta de ensayos de tensión y compresión. | |
| | Habilidades | Uso de software de simulación | Proyectos previos | Simular pruebas físicas a las probetas para evaluar su desempeño | Redacción correcta de un artículo científico. | |
| | | Investigación | Presentar una cantidad considerable de fuentes de información | Adquirir un contexto del estado del arte tan completo como sea posible | | |
| | | Redacción de reportes correctamente | Utilizar la información recopilada para | Evitar tantas correcciones como sea posible, para mejorar el flujo de trabajo del proyecto | | |

| | | | | | | |
|--|-----------|---------------------|--|---|--|--|
| | | | completar el reporte | | | |
| | | 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 | Llevar un control de los tiempos asignados para el proyecto | | |
| | | 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 | | |

Realizando este apartado, me doy cuenta de que al principio del PAP tenía nociones de lo que sería necesario saber y aprender para el desarrollo de este proyecto, pero al finalizarlo me fue evidente de que se requirió mucho más trabajo del esperado para llegar al nivel teórico, en el caso de los conocimientos necesarios, y al técnico, en el uso del programa SolidWorks. Sin embargo, el desconocimiento de estos ámbitos, así como el corto tiempo

disponible, me motivó a tomar el reto no sólo de entender lo necesario, sino ir más allá y e informarme lo necesario para obtener el mejor desempeño que como equipo pudiéramos ofrecer. Mis actitudes con respecto al proyecto también mejoraron, pues fue necesario el respeto y una vía de comunicación clara para garantizar el desarrollo exitoso del proyecto.