

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL SUR DE GUANAJUATO



Comportamiento mecánico experimental y simulado de muestras PLA

Opción 2 Titulación Integral – Tesis Profesional

Elaborada por:

Oswaldo García Guzmán.

Que presenta para obtener el título de:

INGENIERO EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

Asesor:

M.C. Mariano Braulio Sánchez

Uriangato, Gto.

Mayo 2023

“Comportamiento mecánico experimental y simulado de muestras PLA”

Elaborada por:

Oswaldo García Guzmán

Aprobado por..... M.C. Mariano Braulio Sánchez
Jefe de División de Ingeniería En Sistemas Automotrices
Asesor de la tesis profesional

Revisado por..... Ing. Rogelio Orozco Martínez
Docente de la carrera de Ingeniería En Sistemas Automotrices
Revisor de la tesis profesional

Revisado por..... Dr. José Eli Eduardo González Durán
Jefe de División de Ingeniería en Electrónica
Revisor de la tesis profesional



LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Uriangato, Gto. 02 mayo 2023

Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral

M.I José Gabriel Aguilera González
Director Académico
ITSUR
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre de estudiante y/o egresado(a): Osvaldo García Guzmán	
Carrera: Ingeniería en Sistemas Automotrices	Núm. de control: T16120219
Nombre del proyecto: Comportamiento mecánico experimental y simulado de muestras PLA	
Producto: Tesis Profesional	

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestras y nuestros egresados.

ATENTAMENTE

M.C. Mariño Braulio Sánchez
Jefe de División de Ingeniería en Sistemas Automotrices
ITSUR



La comisión revisora ha tenido a bien aprobar la reproducción de este trabajo.

Instituto Tecnológico Superior
del Sur de Guanajuato
COORDINACIÓN INGENIERÍA
EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

M.C. Mariño Braulio Sánchez	Ing. Rogelio Orozco Martínez	Dr. José Eli Eduardo González Durán
Asesor de la Tesis Profesional	Revisor de la Tesis Profesional	Revisor de la Tesis Profesional

c.c.p.- Expediente

Julio 2017

DEPARTAMENTO ACADEMICO	CLAVE:11EIT0002E ISA-EGR-EJ2023/15
---------------------------	---------------------------------------

Uriangato, Guanajuato, 03/mayo/2023

Asunto: Aprobación de impresión de trabajo profesional

C. OSVALDO GARCIA GUZMAN

PRESENTE:

Por medio de este conducto, le comunico a usted que después de haber sido revisado su trabajo bajo la cual se derivó la Monografía Titulada:

**“Comportamiento mecánico experimental y simulado de
muestras PLA”**

La comisión revisora, ha tenido a bien aprobar la impresión de este trabajo.

ATENTAMENTE

*“Excelencia en Educación Tecnológica”
“Tecnología y Calidad para la Vida”*



M.C. Mariano Braulio Sánchez

Jefe de División de Ingeniería en Sistemas Automotrices



Instituto Tecnológico Superior
del Sur de Guanajuato
COORDINACIÓN INGENIERIA
EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

C.c.p Unidad de Servicios Escolares
C.c.p Coordinación de Ingeniería en Sistemas Automotrices
C.C.p Archivo Consecutivo

Resumen.

El objetivo de esta investigación es caracterizar el material PLA, impreso por tecnología de modelado de deposición fundida (FDM), con características específicas de probetas modeladas en un software de elemento finito, bajo dos condiciones de carga: tensión y compresión, para obtener datos que permitan simular componentes estructurales.

Fabricados con los mismos parámetros de impresión han sido construidos y probados; y la tracción, se han determinado las propiedades de compresión y tensión. Las influencias de la sección transversal, se abordan la forma y la longitud del espécimen o muestra sobre la resistencia y el módulo elástico de compresión. Analizando las propiedades mecánicas así obtenidas, se concluye que son diferentes, no son coherentes entre sí, y no reflejan la naturaleza bimodular de este material.

Un modelo de elementos finitos (FE) es se utiliza para verificar estas diferencias, incluida la no linealidad geométrica, para reproducir de manera realista para estas condiciones durante las pruebas físicas. La conclusión principal es que los métodos de prueba utilizados actualmente no garantizar un conjunto coherente de propiedades mecánicas útiles para la simulación numérica, que destaca la necesidad de definir nuevos métodos de caracterización mejor adaptados al comportamiento de FDM.

Palabras clave: PLA, Propiedades del PLA, simulación, modelado, compresión, tensión.

Abstract.

The objective of this research is to characterize the PLA material, printed by fused deposition modeling (FDM) technology, with specific characteristics of specimens modeled in a finite element software, under two load conditions: tension and compression, to obtain data that allow to simulate structural components.

Manufactured with the same printing parameters have been built and tested; and traction, the compression and tension properties have been determined. The influences of cross section, shape, and length of the specimen or sample on strength and elastic modulus of compression are addressed. Analyzing the mechanical properties thus obtained, it is concluded that they are different, are not consistent with each other, and do not reflect the bimodular nature of this material.

A finite element (FE) model is used to verify these differences, including geometric nonlinearity, to realistically reproduce these conditions during physical tests. The main conclusion is that currently used test methods do not guarantee a consistent set of mechanical properties useful for numerical simulation, which highlights the need to define new characterization methods better suited to FDM behaviour.

Keywords: PLA, PLA properties, simulation, modeling, compression, tension.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta esta instancia de mi vida por brindarme salud, bienestar, sabiduría e inteligencia para poder concluir esta etapa de mi vida.

Agradezco a mis padres, mis hermanos, mi novia, mis amigos y compañeros por todo el apoyo que me han brindado en la parte económica, emocional, física y mentalmente para poder haber llegado hasta esta instancia de mi educación ya que sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

También agradezco a mis asesores que estuvieron conmigo a todo momento apoyándome con mi proyecto profesional en la parte experimental y la parte simulada. Agradecer al Instituto Tecnológico superior del sur de Guanajuato por brindarme las herramientas necesarias para poder realizar este proyecto y las instalaciones de este, a todos los docentes que estuvieron en la parte de mi formación y que fueron parte fundamental de este proceso.

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo profesional a la vida, a Dios que me ha permitido estar aquí y en especial a mi madre y mi padre por todo el esfuerzo que han hecho para yo poder realizar este trabajo, apoyarme en todos mis actos y brindarme todo para que yo pueda llegar a superarme, por siempre creer en mí y nunca dejar que me rindiera para poder concluir mis estudios. A mi padre que ya no se encuentra con vida le dedico este trabajo porque sin su apoyo y motivación que me dio cada día de su vida nada hubiera sido posible ya que el me enseñó que el único límite que existe somos nosotros mismos y que si uno mismo no cree en si todas las acciones que realices serán más difíciles y que si vas a realizar algo en tu vida debes ir por todo y trabajar para ser el mejor.

Oswaldo García Guzmán.

Tabla de contenido

Capítulo 1	1
Introducción.	1
Capítulo 2	3
Marco teórico (Antecedentes).	3
Capítulo 3	20
Planteamiento del problema	20
3.1. Identificación.	20
3.2. Justificación.	20
3.3. Alcance.	20
Capítulo 4	22
Objetivos	22
4.1. Objetivos generales.	22
4.2. Objetivos específicos.	22
Capítulo 5	23
Metodología	23
Capítulo 6	33
Resultados	33
Capítulo 7	50
Análisis de Resultados.....	50
Capítulo 8	53
Conclusiones y trabajo a futuro.....	53
Referencias bibliográficas	54

Índice de Figuras.

Figura 1 Tecnologías exitosas de manufactura aditiva a) Estereolitografía (SLA), b) Polyjet, c) Selective Laser Sintering (SLS), d) Direct Metal Laser Sintering (DMLS), e) Three Dimensional Printing (3DP) y f) Electron Beam Melting (EBM)	6
Figura 2 Diagrama esquemático de la producción de PLA vía polímero y lactida [11]	8
Figura 3 PLA Hatchbox.	10
Figura 4 Maquina de ensayos universales ETM-100kN.....	13
Figura 5 Diagrama esfuerzo deformación ingenieriles de una aleación de aluminio [17] ..	17
Figura 6 Impresora 3D Makerbot	19
Figura 7 Diagrama de flujo de la metodología de la investigación	23
Figura 8 Isométrico de probeta tensión [16].....	24
Figura 9 Probeta prismática.....	25
Figura 10 Probeta cilíndrica.....	25
Figura 11 Área de trabajo y definición de parámetros en el software de makerboot	27
Figura 12 Balanza analítica OHAUS	27
Figura 13 Probeta colocada para pruebas de compresión.....	29
Figura 14 Modelado para la simulación.....	30
Figura 15 mallado.....	31
Figura 16 simulación de aplicación de fuerza de tensión.	32
Figura 17 Esfuerzo probeta prismática.....	32
Figura 18 Probetas 100% relleno.	34
Figura 19 Diagrama esfuerzo deformación de probetas al 100% de relleno.....	35
Figura 20 Probetas 100% fracturadas.	36
Figura 21 Probetas 75% de relleno.....	36
Figura 22 Diagrama esfuerzo deformación para probetas al 75 % de relleno	37
Figura 23 Probetas 75% fracturadas.....	38
Figura 24 Probetas 50% de relleno.....	38
Figura 25 Diagrama esfuerzo deformación para probetas al 50% de relleno.	39
Figura 26 Probetas 50% de relleno fracturadas.....	40
Figura 27 Probetas cilíndricas y prismáticas.....	41
Figura 28 Graficas esfuerzo deformación de probetas rectangulares sujetas a compresión a) 100%, b) 75% y c) 50% de relleno.....	42
Figura 29 Graficas esfuerzo deformación de probetas rectangulares sujetas a compresión a) 100%, b) 75% y c) 50% de relleno.....	43
Figura 30 Simulación de las probetas bajo tensión	44
Figura 31 Probetas sometidas a compresión empleando ANSYS student a) cilíndrica, b) prisma rectangular.....	45
Figura 32 Presión aplicada en probeta cilíndrica.....	46
Figura 33 Presión aplicada en probeta prismática.....	46

Figura 34 Probetas cilíndricas y rectangulares sometidas a compresión	47
Figura 35 Probeta simulada final.	48
Figura 36 Diagrama deformación vs tiempo obtenida en ANSYS versión estudiantil.....	49
Figura 37 Diagrama esfuerzo deformación obtenida mediante ANSYS	50
Figura 38 Comparación de los diagramas esfuerzo deformación a) obtenida de forma experimental en el ITSUR, b) reportada en la literatura [25].....	52

Índice de tablas.

Tabla 1 Comparación propiedades fibra/textil de PLA con respecto a PET [11]	10
Tabla 2 Propiedades mecánicas de PLA [16].....	12
Tabla 3 Peso de las probetas de PLA impresas	33

Capítulo 1

Introducción.

La manufactura aditiva (MA) es una de las una rama de los procesos de fabricación de más reciente uso industrial convirtiendo así al método de impresión 3D uno de los más populares en una amplia gama de aplicaciones, reemplazando algunas técnicas convencionales, una de las ventajas más importantes de la impresión 3D es la de fabricar piezas con geometrías muy complejas, acabado semiterminado, menor costo de material, menor consumo energético, menor complejidad del proceso (modelo CAD-Impresión-Instalación) y menor tiempo [1]. El proceso comienza con la identificación de la idea o necesidad la cual se desea resolver, posteriormente se diseña en un software CAD y se envía a la máquina de impresión 3D que imprime físicamente. La fabricación de filamentos fundidos (FFF) es la tecnología AM más económica y sencilla; tiene una eficacia económica comprobada en producciones individuales y pequeña [2]. Las piezas fabricadas mediante esta técnica deben ser evaluadas mecánicamente con la finalidad de conocer sus propiedades e identificar posibles mecanismos de falla. Wilco M.H y col. [3] evaluaron la dependencia de la resistencia a la cedencia con respecto a la velocidad de deformación, los resultados muestran un cambio del comportamiento frágil para muestras en compresión con respecto al comportamiento semidúctil para muestras fabricadas mediante manufactura aditiva, el cambio es atribuido a la fase de procesamiento y la importancia del estrés. Las propiedades mecánicas de un material anisotrópico depende de la orientación de las fibras y/o forma en cómo se realiza la impresión 3D. Verbeeten y Miriam Lorenzo-Bañuelos [4] evaluaron el efecto del ángulo de orientación en la dependencia de la resistencia a la cedencia con respecto a la velocidad de la deformación para materiales fabricados mediante manufactura aditiva empleando PLA, los resultados muestran una dependencia a la orientación molecular y al estiramiento de cadenas poliméricas, provocando propiedades mecánicas anisotrópicas.

Por lo tanto, en el presente trabajo se habla sobre el comportamiento mecánico de un material PLA (ácido poliláctico) que cuenta con características específicas para comprobar su funcionamiento mecánico, las cuales están dadas por el distribuidor del material y con las normas requeridas para la manipulación y validación de este, dicho material se manipula a una temperatura específica dada por los estándares del fabricante, como sus tolerancias y medidas específicas. Para este análisis se tuvo en cuenta que el material fuera de el mismo fabricante y con las mismas especificaciones, utilizando softwares de modelado y de elemento finito. También se usó maquinaria que se encuentra en los laboratorios de el “Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato”, en estos se utilizaron impresoras 3D, basculas y una máquina de ensayos universales con su respectiva computadora.

En la carrera de ingeniería de sistemas automotrices, se están trabando en la parte de diseño mecánico, evaluación experimental y simulado de muestras obtenidas mediante impresión 3D, se espera que el comportamiento experimental y simulado del rendimiento mecánico sea muy similar, debido a que se trabaja con muestras normalizadas por estándares internacionales y el equipo de evaluación cumple con dichos requerimientos.

En el capítulo 2 del proyecto se analizan los conceptos inherentes a la manufactura aditiva (impresión 3D), propiedades mecánicas, así como el estado del arte con respecto a trabajos similares de simulación y evaluación mecánica, en el capítulo 3 se presenta la motivación del proyecto planteamiento del problema alcance del mismo, etc. En el capítulo 4 se dan a conocer los objetivos principales de la investigación, la metodología experimental desarrollada de manera particular, en la cual detalla el proceso de diseño e impresión 3D de probetas estandarizadas, así como el análisis mediante elemento finito, se describe en el capítulo 5, los resultados, así como la discusión y análisis de los mismos se mencionan en el capítulo 6, finalizando con las conclusiones en el capítulo 7.

Capítulo 2

Marco teórico (Antecedentes).

La fabricación aditiva, manufactura aditiva, modelación digital, o simplemente impresión 3D, apareció por primera vez en los años 80, iniciando su desarrollo con las primeras máquinas para estereolitografía (SLA) y el sinterizado selectivo por láser (SLS). En la década de los 90, se desarrollaron otros procesos aditivos innovadores que respondieron positivamente a los desafíos en ese tiempo, lo que tuvo un impacto significativo en los logros comerciales y académicos.

El uso comercial de manufactura aditiva surgió por primera vez en 1987 con la estereolitografía (SLA) de 3D systems, un proceso que solidifica capas delgadas de polímero líquido sensible a la luz ultravioleta (UV) mediante laser. El sistema SLA-1, como sistema de prueba beta, fue la primera máquina AM disponible comercialmente en el mundo y fue precursor de la popular máquina SLA 250, en 1988 3D Systems y CibaGeigy se asociaron en el desarrollo de materiales SL y comercializaron las resinas de acrilato de primera generación. Loctite también entro en el negocio de las resinas SL a fines de la década de 1980, pero permaneció en la industria solo hasta 1993, en la actualidad existen diversas compañías que han buscado implementar mejoras para el proceso de fabricación mediante manufactura aditiva, empleando diferentes tipos de materiales [5].

Sobre un depósito de llenado, sigue una banda donde se encuentra el filamento con el producto y se crea un caparazón con una forma definida con un ángulo de 45°, que se forma por las capas alternas. Los materiales de diseño y fabricación más comercializados para modelado por FDM son: acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), ácido poliláctico (PLA) y poliestireno de alto impacto (HIPS). Para predecir el comportamiento mecánico y/o las propiedades fisicoquímicas de las piezas de FDM, es muy importante comprender dos cosas importantes: las propiedades del material de proceso en el FDM sin procesar (material virgen), y cómo los

parámetros de construcción o diseño en la modelación influyen sobre las propiedades del producto final. La manufactura aditiva podría minimizar los costos de producción y mejorar la eficiencia general en el sector manufacturero. La impresión 3D de polímeros ha hecho importantes desarrollos que llevan a un método rentable y eficiente para producir prototipos de estructuras con geometrías complejas.

Es una tecnología que está en su pleno apogeo; está desarrollándose rápidamente debido a la gran demanda de productos creados a partir de un modelo ya existente, empleando tecnologías completas y entendibles, creado por objetos capa por capa. En aplicaciones de ingeniería, estos prototipos se utilizan para verificar modelos que exhiben un comportamiento particular. Para describir con precisión los prototipos producidos por la impresión 3D, las propiedades del material deben identificarse con precisión y exactitud. En la actualidad, se ha analizado el modelado y la mejora del proceso de impresión, así como los efectos de los diferentes parámetros de impresión en las propiedades de los productos impresos [6].

La tecnología FDM, también conocida como “Fused Deposition Modeling” o “Modelado por Deposición Fundida”, es un proceso de fabricación utilizado en las impresoras 3D con el propósito de fabricar prototipos y producción a pequeña escala. El proceso de fabricación empieza calentando un filamento de materia, la cual al ser derretida es extruida en una plataforma. Cada vez se aplica una capa en la plataforma, la cual desciende y así sucesivamente hasta concluir con la impresión. Es debido a esto que se la clasifica también impresión aditiva. Esta tecnología fue desarrollada por S. Scott Crump a finales de la década de 1980 y comercializada en 1990 por Stratasys Inc. Ahora que ya sabemos cómo es que funciona, es preciso mencionar bajo qué circunstancias se debe utilizar esta tecnología. El FDM puede ser usado cuando una empresa desea crear piezas funcionales para sus propias maquinarias. Esto se ve mucho en la industria automotriz, aérea y minera [7].

Tecnologías actuales de manufactura aditiva

Desde la invención de las técnicas aditivas en tres dimensiones, su uso más extendido hasta hoy se localiza en el prototipado rápido, designado por sus siglas en inglés RP (rapid prototyping). La posibilidad de fabricar prototipos de piezas a partir de modelos 3D diseñados por ordenador sin necesidad de construir caros moldes o matrices acorta y abarata el proceso de diseño de una nueva pieza para cualquier tipo de ensamble o conjunto mecánico. Como resultado de esta reducción temporal y económica en la construcción de un prototipo, se permite un mayor número de iteraciones. Esto significa que los diseñadores tienen libertad para fabricar un mayor número de reproducciones físicas de sus diseños, lo que les permite comprobar su funcionalidad y facilidad de montaje.

Consecuentemente, los errores se minimizan y los costes de desarrollo del producto y tiempos de espera se reducen sustancialmente. Se dice que el RP puede reducir los costes de desarrollo hasta en un 70% y el time-to-market hasta un 90% [8].

Debido a la constante evolución de la manufactura aditiva algunas de las principales técnicas empleadas se mencionan a continuación:

Estereolitografía (SLA): la primera técnica de fabricación aditiva que surgió. Este método emplea como material de fabricación una resina líquida solidificada bajo el efecto de la luz ultravioleta.

Sinterización selectiva por láser (SLS): inventada a finales de la década de los 80 en la Universidad de Texas, este tipo de fabricación aditiva combina un láser con polvo de plástico para crear nuevos objetos.

Modelado por deposición fundida (FDM): popularizado por su fácil y económico manejo, este sistema —patentado como FDM— permite modelar prototipos y producir a pequeña escala.

Inyección de aglutinantes (*Binder Jetting*): consiste en pulverizar un aglutinante líquido sobre un lecho de polvo que luego se solidifica.

PolyJet o Material Jetting: se trata de una máquina constituida por un láser dirigido a un lecho de polvo metálico. Sirve para fabricar prototipos y piezas finales de metal totalmente funcionales en cuestión de días.

Si bien existen múltiples técnicas que hacen uso de metal y plástico para construir objetos capa a capa, cada vez más compañías experimentan con otros materiales, incluso con alimentos [9].

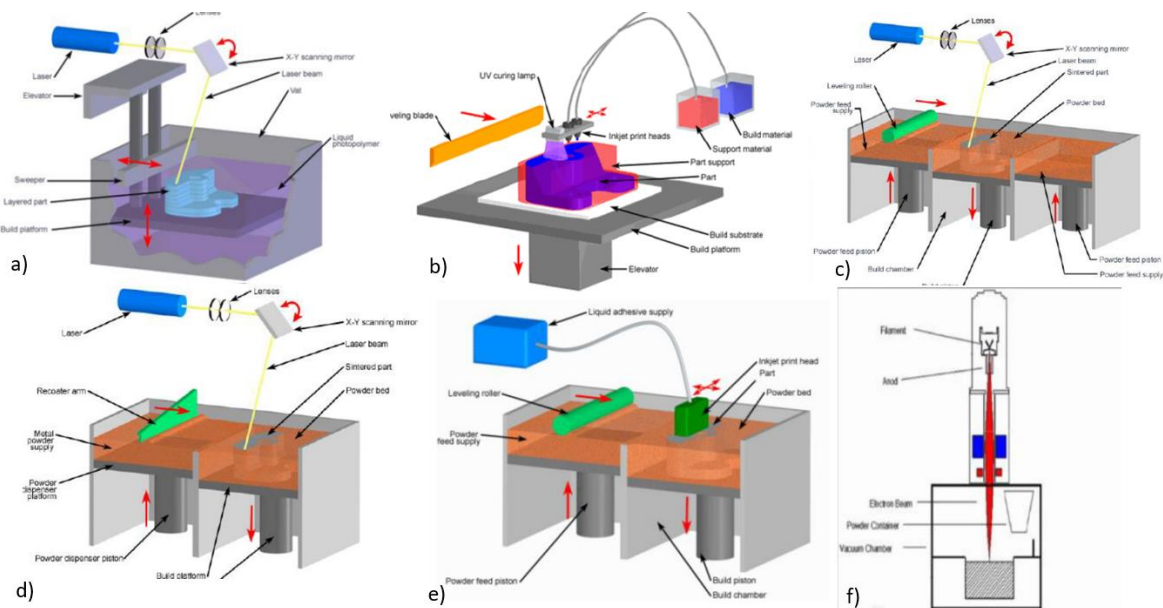


Figura 1 Tecnologías exitosas de manufactura aditiva a) Estereolitografía (SLA), b) Polyjet, c) Selective Laser Sintering (SLS), d) Direct Metal Laser Sintering (DMLS), e) Three Dimensional Printing (3DP) y f) Electron Beam Melting (EBM)

Materiales empleados en la manufactura aditiva

Debido a las diferentes técnicas y procesos de manufactura aditiva, es lógico que se tengan diferentes tipos de materiales, las piezas fabricadas se pueden emplear en diferentes industrias como: aeronáutica, biomédica, automoción, electrónica, construcción, biomédica, automotriz, etc. Entre los materiales que se pueden emplear son los siguientes: metálicos, plásticos, cerámicos y mezclas [10]. En el presente proyecto se empleará como material PLA, por lo tanto, nos enfocaremos a la revisión de este material.

PLA

El ácido poliláctico PLA es uno de los materiales más ampliamente investigado y utilizado debido a que tiene una potencial probado para reemplazar los polímeros petroquímicos convencionales para aplicaciones industriales o como un biomaterial líder para numerosas aplicaciones en medicina, el PLA como principal candidato, es un polímero termoplástico de alta resistencia y alto módulo que se puede fabricar a partir de recursos renovables además de implementar su uso en el campo del envasado industrial o en el mercado de dispositivos médicos biocompatibles/bioabsorbibles. EL PLA fue sintetizado en 1932 por Caroths (DuPont), era solo capaz de producir PLA de bajo peso molecular (Mw) calentando ácido láctico al vacío mientras se elimina el agua condensada el problema en ese momento era aumentar el Mw de los productos; y, finalmente, por polimerización de apertura de anillo de lactida, se sintetizó PLA de alto Mw. Hoy en día, aunque existen múltiples formas de fabricar PLA, ninguna de ellas es simple o fácil de ejecutar. La síntesis de PLA requiere un control riguroso de las condiciones (temperatura, presión y pH), el uso de catalizadores y largos tiempos de polimerización [8]. El PLA se puede preparar tanto por condensación directa de ácido láctico como por polimerización por apertura de anillo (ROP) del dímero cíclico, lactida. La figura 2 muestra la síntesis de PLA vía polímero y lactida, siendo este un proceso exitoso en la fabricación del material.

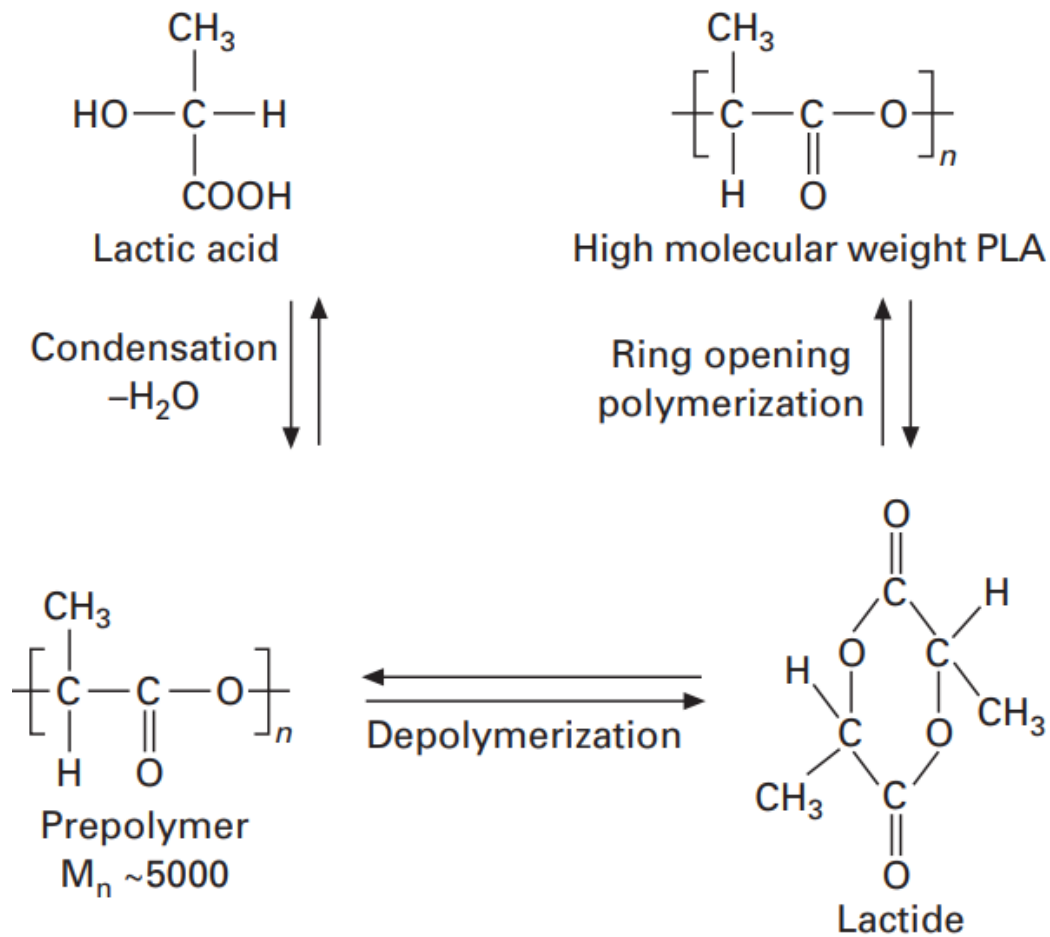


Figura 2 Diagrama esquemático de la producción de PLA vía polímero y lactida [11]

Ventajas del PLA

El PLA está hecho de materias primas renovables, lo cual tiene una huella de carbono reducida en comparación con los plásticos a base de fósiles, pues los cultivos absorben CO₂ cuando crecen y se necesita menos energía para su producción, lo cual produce menos gases de efecto invernadero para producir PLA que el plástico a base de fósiles. El PLA se derrite muy fácilmente porque tiene un punto de fusión más bajo que muchos plásticos a base de fósiles. Es fácil trabajar con PLA y requiere menos energía para transformarse. Es uno de los dos

plásticos más utilizados en la impresión 3D (45% de cuota de mercado), pues es económico, fácil de imprimir y la impresión con este material es libre de humos.

El PLA es compostable, cuando se incinera el PLA, emite menos humos tóxicos que los plásticos a base de aceite. En caso de uso biomédico, el PLA se degrada en ácido no tóxico. Este filamento viene en forma de alambre en un carrete, que se alimenta al cabezal del extrusor de una impresora 3D, donde el plástico se derrite y se deposita en gotas finas en la bandeja de impresión. Este material es translúcido en su forma natural, pero se pueden usar bobinas de filamento teñido para hacer objetos en diferentes colores. Al enfriar, este material se contrae menos que el ABS, lo que le da una buena estabilidad geométrica durante el proceso de fabricación.

La producción de biomateriales por técnicas aditivas de fabricación es abierta a la investigación y se considera un área de oportunidad muy grande, debido a que parece ser la metodología más adecuada en biomedicina para producir piezas 3D personalizadas con estructuras complejas, con respecto al PLA se procesa fácilmente debido a su termoplasticidad lo cual representa una importante ventaja, este polímero se puede procesar mediante moldeo por inyección, extrusión, electrohilado o termoprensado. Sin embargo, todas estas técnicas tienen sus limitaciones cuando lo que se necesita es un estrecho control de la estructura, la forma y la porosidad del material final [12].

La tabla 1 compara las propiedades fibra/textil de PLA y PET, se puede observar que las propiedades son relativamente similares a las del poliéster (PET). Sin embargo, la densidad y el índice de refracción del PLA son más bajos que los de PET, lo cual es muy importante para la industria automotriz, donde se requiere un valor elevado de la resistencia específica, por otra parte, las propiedades de recuperación y absorción de humedad del PLA son superiores a las del PET porque el PLA es más hidrofílico que el PET.

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

Tabla 1 Comparación propiedades fibra/textil de PLA con respecto a PET [11]

Propiedad	Característica	PLA	PET
Recurso	Basado en materias primas	Maíz	petróleo
Física	Gravedad específica	1.25	1.34
	Índice de refracción	1.40	1.58
Drapeado/sensación de la mano	Módulo de flexión (gf cm ² /cm)	0.068	0.122
	Módulo de corte (gf/cm deg)	0.64	1.53
Retención de la intemperie	Retención de tenacidad (%) después de 300 h	95	60
Resistencia a la decoloración	Retención de elongación (%) después de 100 h	100	70

Para el modelado de las muestras se usó un PLA como el que se muestra en la siguiente imagen.



Figura 3 PLA Hatchbox.

Propiedades mecánicas.

El PLA es un material con unas muy buenas características mecánicas, ya que se puede diseñar su estructura para ser viable en diferentes aplicaciones. Los isómeros del PLA (LyD) proporcionan una serie de características diferenciadoras en relación a su estructura. Actualmente, la investigación en el sector médico está utilizando PDLLA amorfos debido a su facilidad para biodesintegrarse en el medio. Por otro lado, los PLLA semicristalinos, debido a la estructura interna que poseen, se utilizan en aplicaciones donde los requerimientos de las propiedades mecánicas son muy elevados. El PLA posee unas propiedades mecánicas muy similares a las de algunos polímeros derivados del petróleo [13]. S.M Mirkhalaf y Fagerström [14] comentan que el módulo de Young determinado de acuerdo a la pendiente en el diagrama esfuerzo deformación en el régimen elástico es de 4400 MPa, la relación de Poisson varía con los valores reportados en la literatura los cuales dependen del proceso de fabricación. Actualmente el PLA posee módulo de Young alrededor de 3500 MPa y una resistencia a tracción de unos 60 MPa. Esto permite atisbar la gran resistencia mecánica que posee este material proveniente de recursos 100% naturales. En relación a las propiedades de flexión, se sigue vislumbrando una alta resistencia mecánica, ya que obtiene valores de resistencia a flexión de unos 100 MPa y un módulo de flexión de entre 4000-5000 MPa. En contraposición, el PLA es un material excesivamente frágil. Posee valores de tenacidad reducidos y un alargamiento a la rotura inferior al 10%.

En la literatura se cuenta con información la cual intenta determinar el comportamiento mecánico experimental y simulado de muestras PLA [14], [15]. En el presente proyecto se emplearon muestras estandarizadas obtenidas mediante impresión 3D evaluándose mecánicamente mediante una máquina de ensayos universales, comprobando su rendimiento mecánico en ANSYS versión estudiantil.

Tabla 2 Propiedades mecánicas de PLA [16]

Propiedad	Unidades	Valor
Elongación a la ruptura	%	7.0
Temperatura de fusión T_m	°C	130-230
Módulo de corte, G	MPa	1287
Módulo de elasticidad	MPa	3500
Dureza Rockwell	Hr	88
Resistencia a la cedencia σ_y	MPa	70
Resistencia a la flexión	MPa	106
Resistencia última a la tensión	MPa	73
Módulo de Young	GPa	2.7-1.6

Máquina de ensayos universales.

La máquina de ensayo universal es un instrumento de laboratorio capaz de imprimir fuerzas de varios tipos y diferentes intensidades sobre los materiales. Se define como universal debido a la amplia gama de posibles usos, pero en el pasado se conocía más simplemente como "máquina de tracción" o "dinamómetro" la maquina usada para el análisis del material es como la que se muestra en la siguiente Ilustración. Durante el ensayo de tracción se puede obtener información importante de los materiales evaluados como: el módulo de elasticidad, el límite elástico, el limite de cedencia, la resistencia máxima a la fractura, la región de transición, así como el punto de fractura, todos estos valores son de suma importancia debido a que el diseño mecánico debe considerar estos valores para la fabricación de componentes estructurales y funcionales [17], [18].



Figura 4 Máquina de ensayos universales ETM-100kN

En cuanto a las características constructivas, las máquinas universales varían mucho según el modelo y es imposible resumir de forma exhaustiva todas las versiones del mercado. Una de las diferencias fundamentales, como se anticipó, es la construcción del marco con una o dos columnas. Las máquinas universales de una sola columna son más raras y tienen un uso más limitado.

Finalmente, las máquinas de ensayo universales se pueden distinguir por la intensidad de la fuerza desarrollable de la máquina, que puede variar desde unos cientos de N hasta 1000 o más kN.

Pruebas de tensión

El ensayo de tensión es un ensayo mecánico de materiales que se usa en la industria y en la investigación para determinar propiedades mecánicas e información relacionada con la resistencia, ductilidad y tenacidad de los materiales que sufren un esfuerzo de tensión uniaxial. Este ensayo es usado para obtener información útil para selección de materiales, control de calidad, diseño de piezas y de herramientas, evaluar causas de fallas de materiales, etc.; se le puede realizar a la materia prima usada en la industria, como el alambón, o a piezas, como una leva.

Tome la probeta de la dimensión especificada y consulte la norma de acuerdo con el material seleccionado para consideraciones adicionales.

Forma y dimensiones de la probeta: la forma y dimensiones de la probeta dependen de la forma y dimensiones del producto del cual se tomará la muestra del material. Los productos de sección transversal uniforme y también las probetas fundidas pueden ser sometidas a ensayo sin maquinado. Si el producto se suministra en rollos, se debe tener cuidado al enderezar la probeta para no alterar sus propiedades.

Resistencia a la tensión. El esfuerzo que se obtiene en la fuerza aplicada más alta es la resistencia a la tensión (S_{Rt}), la cual es el esfuerzo máximo en la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles. Este valor también se conoce como resistencia máxima a la tracción. En muchos materiales dúctiles, la deformación no permanece uniforme. En algún punto, una región se deforma más que las otras y ocurre un gran decrecimiento local en el área de la sección transversal (figura 6-7). A esta región deformada de manera local se le llama "cuello". La resistencia a la tensión es el esfuerzo al que comienza la estricción en los metales dúctiles. En la prueba de compresión los materiales se abultarán; por lo tanto, la estricción sólo se observa en una prueba de tensión.

Compresión

Las pruebas de compresión permiten a los fabricantes evaluar la integridad y/o seguridad de los materiales, componentes y productos durante varias fases del proceso de fabricación, por lo tanto, las aplicaciones potenciales pueden variar desde las pruebas de resistencia del parabrisas de un automóvil hasta las pruebas de resistencia de las vigas de concreto utilizadas en la construcción.

Los materiales que exhiben alta resistencia a la tracción tienden a exhibir baja resistencia a la compresión, así mismo, los materiales de alta resistencia a la compresión tienden a presentar una baja resistencia a la tracción, por lo tanto, las pruebas de compresión a menudo se utilizan en materiales frágiles como el concreto, metales, plásticos, cerámicas, materiales compuestos y materiales corrugados como el cartón, estos materiales se utilizan a menudo en una capacidad de carga, donde su integridad bajo las fuerzas de compresión es fundamental.

Resistencia a la compresión definitiva

La máxima resistencia a la compresión de un material es el valor del esfuerzo de compresión alcanzado cuando el material falla por completo. Cuando los materiales frágiles alcanzan su máxima resistencia a la compresión, son aplastados y la carga cae drásticamente.

Los materiales con mayor ductilidad (la mayoría de los plásticos) no se rompen, sino que continúan deformándose hasta que la carga ya no se aplica a la muestra, sino entre las dos placas de compresión.

La prueba mide qué tan favorable es al medir la fuerza cuando se comprime al 65% de su grosor original, por ejemplo, los ingenieros que inspeccionan los asientos automovilísticos especifican el valor de deflexión de la fuerza de indentación de la espuma que desean en su producto final, y el departamento de

fabricación realizarán la prueba varias veces por turno para garantizar que todos los asientos que se fabrican tengan la misma sensación de suavidad y soporte.

Diagrama de esfuerzo deformación

La prueba o ensayo de tensión es de uso recurrente, dado que las propiedades que se obtienen pueden aplicarse al diseño de distintos componentes. Dicha prueba mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Los resultados obtenidos de la prueba son muy importantes para el área de diseño. El valor del esfuerzo crítico necesario para iniciar la deformación plástica se conoce como límite elástico del material. En los materiales metálicos, por lo general es el esfuerzo que se requiere para que se inicie el movimiento de las dislocaciones, o deslizamiento. En el caso de los materiales poliméricos, este esfuerzo corresponde al desenredado de las cadenas de las moléculas de polímero o al deslizamiento de las cadenas entre sí. El límite proporcional se define como el nivel de esfuerzo sobre el cual la relación entre el esfuerzo y la deformación es no lineal. El valor del esfuerzo que corresponde a la intersección de esta línea y la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles se define como la resistencia a la fluencia compensada, también enunciada con frecuencia como la resistencia a la fluencia.

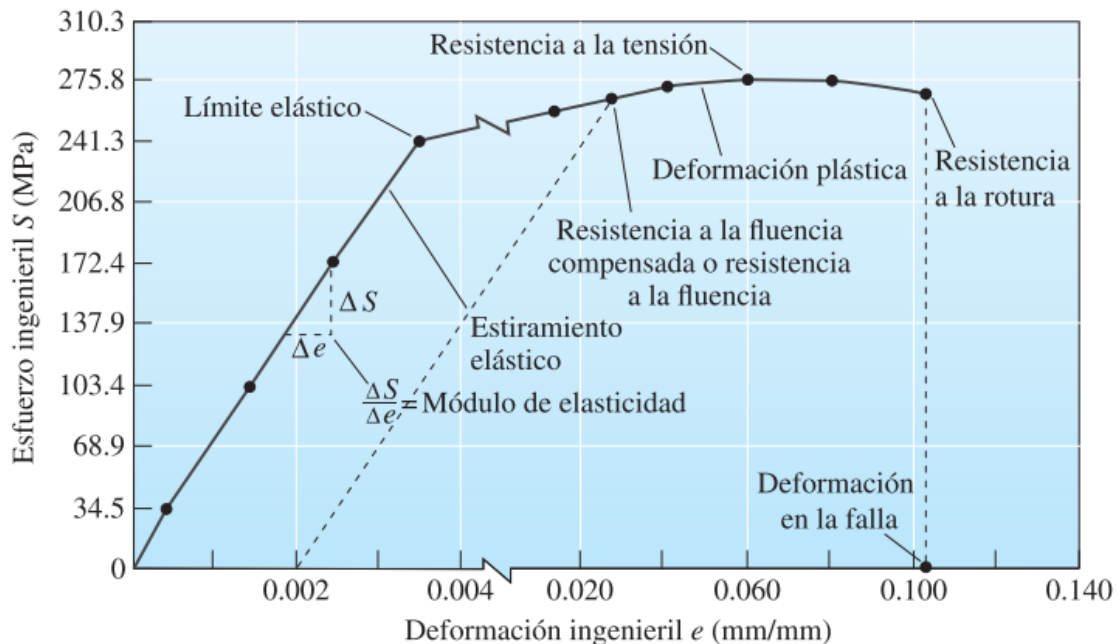


Figura 5 Diagrama esfuerzo deformación ingenieriles de una aleación de aluminio [17]

Softwares empleados para modelado y simulación.

La simulación proporciona numerosas ventajas debido a que permite determinar de forma precisa información asociada a los fenómenos referente a los materiales a analizar, se espera que en los próximos años se produzcan mayores avances en esta área, en la literatura se emplean diversos softwares que permiten la simulación mecánica de diferentes probetas [1], [19], [20].

SolidWorks

SolidWorks es un software tipo CAD, de diseño mecánico, que utilizando un entorno gráfico basado en Microsoft Windows permite de manera intuitiva y rápida la creación de Modelos sólidos en 3D, Ensamblajes y Dibujos. Se basa en el modelado paramétrico, reduciendo el esfuerzo necesario en modificar y crear variantes en el diseño, ya que las cotas y relaciones usadas para realizar operaciones se almacenan en el modelo.

SolidWorks, proporciona un software de diseño de fácil uso y poderosas herramientas para los ingenieros y diseñadores, permitiéndoles cubrir todo el

proceso (crear, validar, comunicar y gestionar) de desarrollo de producto, asegurándose de que este es correcto antes de fabricarlo. De esta manera es posible conseguir costes de fabricación más bajos y acelerar la introducción de productos en el mercado debido a la mejora en el flujo de información y comunicación del diseño de estos en toda la empresa, además de entre sus proveedores y clientes [21].

ANSYS

El software de análisis estructural ANSYS nos permite resolver problemas complejos de ingeniería estructural y tomar decisiones de diseño mejores y más rápidas. Con las herramientas de análisis de elementos finitos (FEA), podemos personalizar y automatizar soluciones para sus problemas de mecánica estructural y parametrizarlos para analizar múltiples escenarios de diseño. Podemos conectarnos fácilmente a otras herramientas de análisis de física para lograr una fidelidad aún mayor. El software de análisis estructural ANSYS se utiliza en todos los sectores y podemos optimizar el diseño de sus productos y reducir los costes de las pruebas físicas.

Impresora 3D Maketbot.

MakerBot Print le ofrece la manera más fácil de preparar, obtener una vista previa, administrar y monitorear sus archivos de impresión 3D. Con MakerBot Print, puede importar archivos de diseño y mejorar su configuración para obtener resultados de impresión 3D óptimos. MakerBot Print también incluye compatibilidad con archivos CAD nativos para que pueda optimizar la preparación de la impresión. Además, puede controlar y monitorear sus impresoras 3D con transmisiones de cámaras en vivo y actualizaciones de estado de impresión bajo demanda.

La usada para generar las muestras se muestra a continuación en la imagen.



Figura 6 Impresora 3D Makerbot

Capítulo 3

Planteamiento del problema

- 3.1. Identificación.** El objetivo de este trabajo es conocer a detalle el comportamiento del material PLA para usos mecánicos los cuales son sometidos a trabajos mecánicos reales y lograr conocer las características necesarias que debe tener dicho material para tener un mejor desempeño dentro del área mecánica y poder aprovechar al máximo las propiedades que tiene este material y reducir costos a la hora de fabricar piezas de este material y recaudar la mayor cantidad de datos posibles para poder realizar en manera más significativa piezas de mayor magnitud de este material .
- 3.2. Justificación.** Este análisis tiene como finalidad el encontrar un material más viable para su de manera comercial y tener en cuenta los parámetros y las normas y el uso de maquinaria especial para manipular dicho material.
- 3.3. Alcance.** En este punto se pretende comparar de manera experimental y simulada el comportamiento del material de estudio, para con ello tener un análisis más concreto de la eficacia del material para futuros usos en la industria.

Capítulo 4

Objetivos

Diseñar probetas para realizar el análisis mecánico de las muestras PLA para recabar información sobre su comportamiento mecánico al ser sometido a esfuerzos mecánicos y con ello obtener resultados de manera digital y simulada.

- 4.1. **Objetivos generales.** Encontrar el máximo aprovechamiento del material PLA para usos mecánicos y diseñar probetas con el mayor rendimiento mecánico para su análisis concreto y mejor uso del material para usos mecánicos para reducir costos.
- 4.2. **Objetivos específicos.** Comprobar mediante pruebas mecánicas la resistencia del material sometido a esfuerzos de tensión y compresión.

Capítulo 5

Metodología

Este trabajo se realizó dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior Del Sur de Guanajuato (ITSUR), donde con ayuda de las herramientas con las que cuenta la institución se pudo llevar a cabo dicho trabajo de investigación. El proyecto de investigación se realizó mediante el siguiente diagrama de flujo.

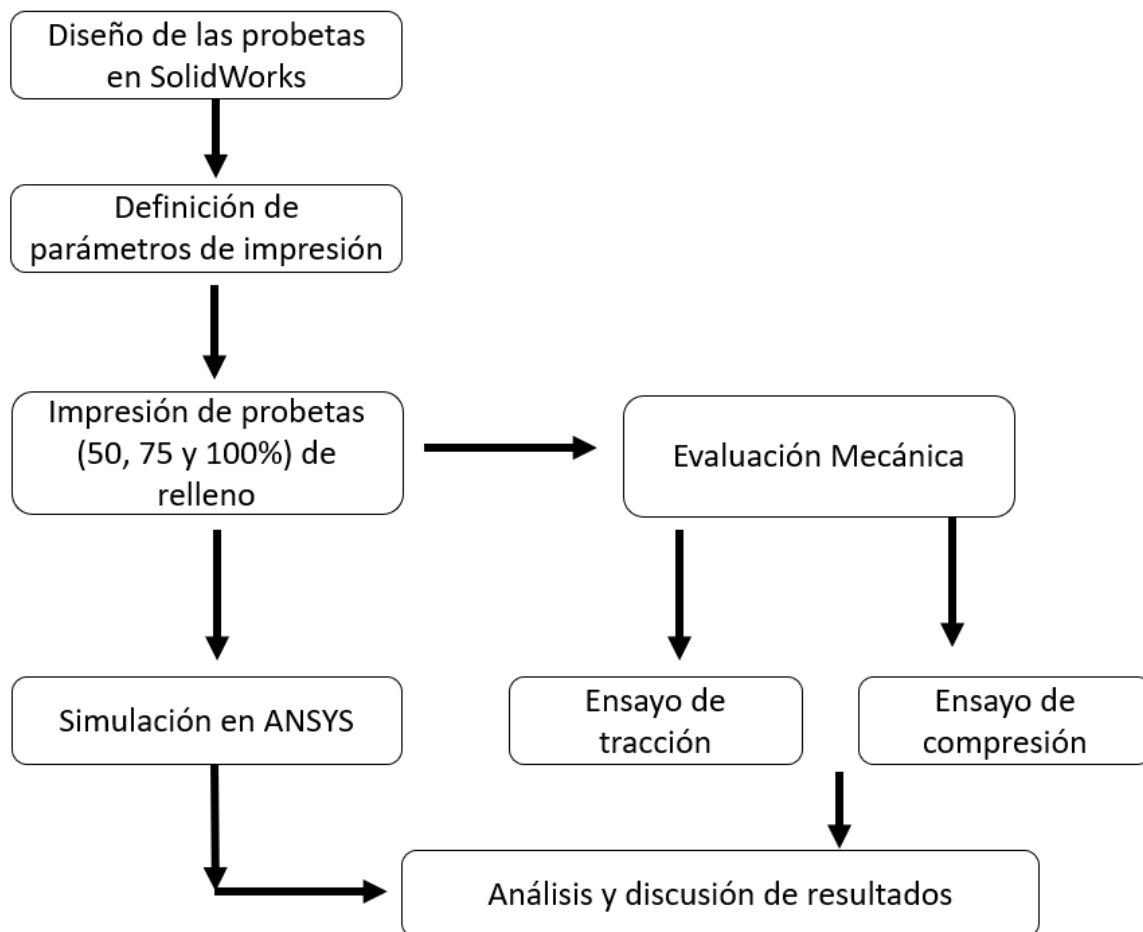


Figura 7 Diagrama de flujo de la metodología de la investigación

Primeramente se consideró la norma ASTM D638 [16] con la finalidad de diseñar y fabricar probetas estandarizadas, las medidas específicas para el modelado de las probetas que fueron sometidas a tensión, esto para tener un mejor desempeño de las mismas para ser analizadas posteriormente.

Se modelaron 9 probetas con las medidas como la las mostradas a continuación.

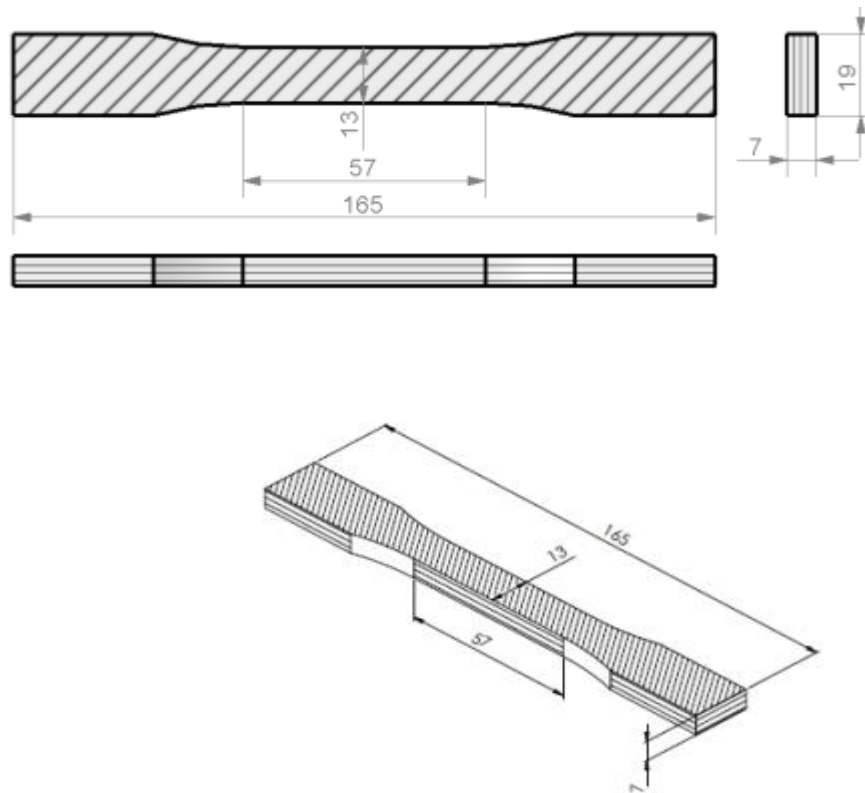


Figura 8 Isométrico de probeta tensión [16].

Posteriormente se modelaron 3 probetas en forma de prisma para el análisis de compresión con las medidas mostradas en la siguiente ilustración.

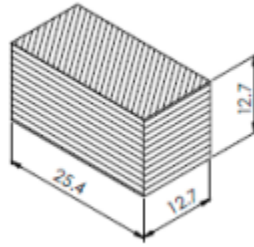


Figura 9 Probeta prismática.

Por último, se modelaron 3 probetas más de forma cilíndrica para el análisis a compresión a continuación se muestran sus medidas.

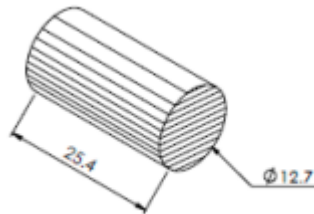


Figura 10 Probeta cilíndrica.

En segunda parte las medidas de las probetas se llevaron al software de modelado llamado SolidWorks para llevar a cabo el modelado digital de las probetas. Generando principalmente un croquis con las medidas anteriormente mostradas en las ilustraciones, para luego extruirlas con el espesor señalado para obtener el modelo en tercera dimensión.

Una vez teniendo las probetas de forma digital se cambiaron de tipo de archivo SolidWorks al requerido para poder llevarlo al tipo de archivo que puede leer a la impresora 3D Makerbot modelo replicator, para añadir los parámetros necesarios y los aspectos a analizar, como la cantidad de relleno y la posición en la que se imprimieron las probetas, a continuación se muestra cómo se imprimieron las probetas en la impresora 3d que se encuentra en uno de los laboratorios del ITSUR la cual se utilizó para imprimir las 15 probetas.

Parámetros de impresión

Los parámetros de impresión son factores de gran importancia a considerar debido a que juegan un rol muy importante en las propiedades mecánicas finales de las piezas fabricadas mediante impresión 3D, diversos estudios se han enfocado al análisis de estos factores, Secundino Ramos [22]. Estudio la reducción de tiempos de impresión y su importancia en el rendimiento mecánico, determinando que la calidad de la pieza a imprimir tiene una relación directa con el tiempo de impresión, ya que a mayor calidad el tiempo de procesamiento es mayor, esto es debido a que al incrementar la velocidad y consecuentemente reducir el tiempo de impresión, se originan efectos no deseados en las piezas.

En el presente proyecto los parámetros de impresión fueron los siguientes: prestación de calidad de impresión alta, temperatura de extrusión 215°C, velocidad de recorrido 150 mm/s, velocidad de recorrido en el eje z= 23mm/s, velocidad de impresión 40 mm/s, primera capa de impresión 30 mm/s, porcentaje de relleno 50%, 75% y 100%, altura de la capa de relleno 0.30 mm, se utilizó filamento de 1.75 mm de diámetro, en material PLA.

La figura 11 muestra la colocación de las probetas en el software de makerboot con la finalidad de llevar a cabo la impresión.

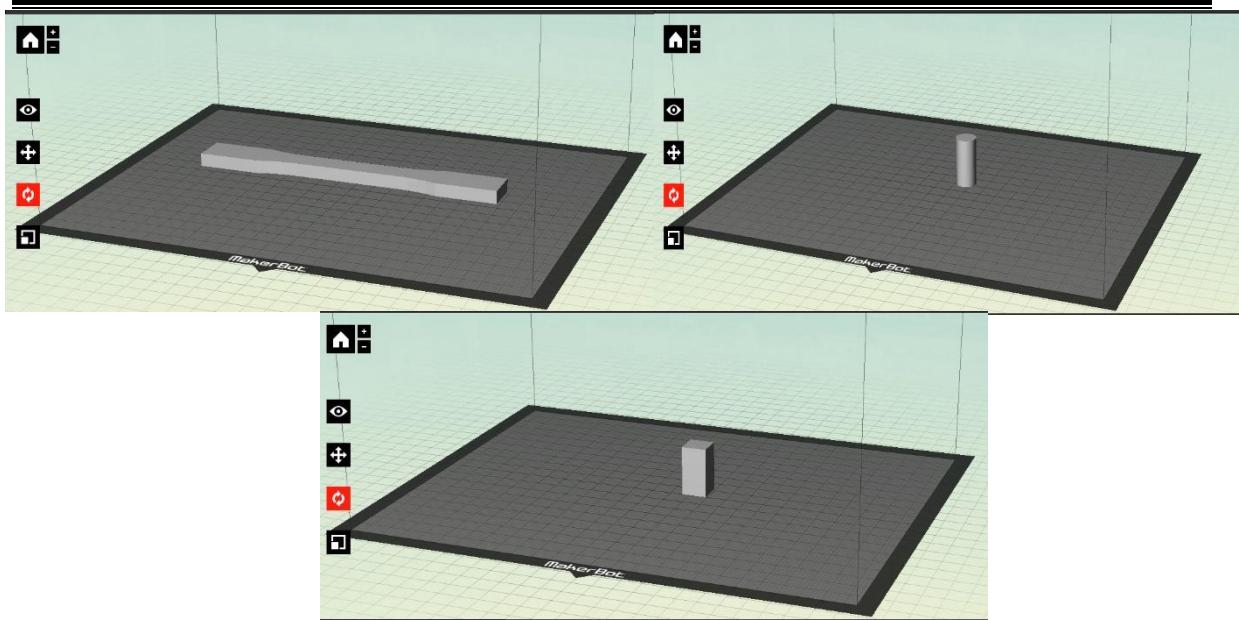


Figura 11 Área de trabajo y definición de parámetros en el software de makerboot

Una vez ya impresas las probetas se determinó el peso de las probetas mediante una balanza analítica marca OHAUS (0.00g).



Figura 12 Balanza analítica OHAUS

Caracterización mecánica

Las probetas diseñadas y fabricadas fueron evaluadas mediante una máquina de ensayos universales modelo ETM-100KN, la cual se encuentra en las instalaciones del instituto, todas las probetas se ensayaron a temperatura ambiente, una carga constante de 5.0 KN y una velocidad de deformación de 5 mm/s fueron aplicadas y es con respecto a la norma ASTM D638 [16]. Las probetas se colocaron en la maquina y fueron sujetas con la ayuda de unas mordazas y fueron cargando progresivamente aplicando en los especímenes hasta la falla y las cargas resultantes se anotan para cada uno de las probetas, obteniendo así la carga de tracción para cada probeta.

Con respecto a la prueba de compresión las probetas se colocaron en la parte inferior de la máquina y se fue aplicando de manera gradual la carga hasta que el material colapso obteniendo para ambos casos la gráfica esfuerzo deformación.

En el laboratorio también se encuentra la máquina de ensayos universales, la cual cuenta con un software especializado para arrojar datos mecánicos sobre las muestras. Todas las muestras fueron sometidas a esfuerzos mecánicos como se muestra a continuación en las siguientes ilustraciones. La figura 13 muestra la aplicación experimental del ensayo de flexión y compresión.

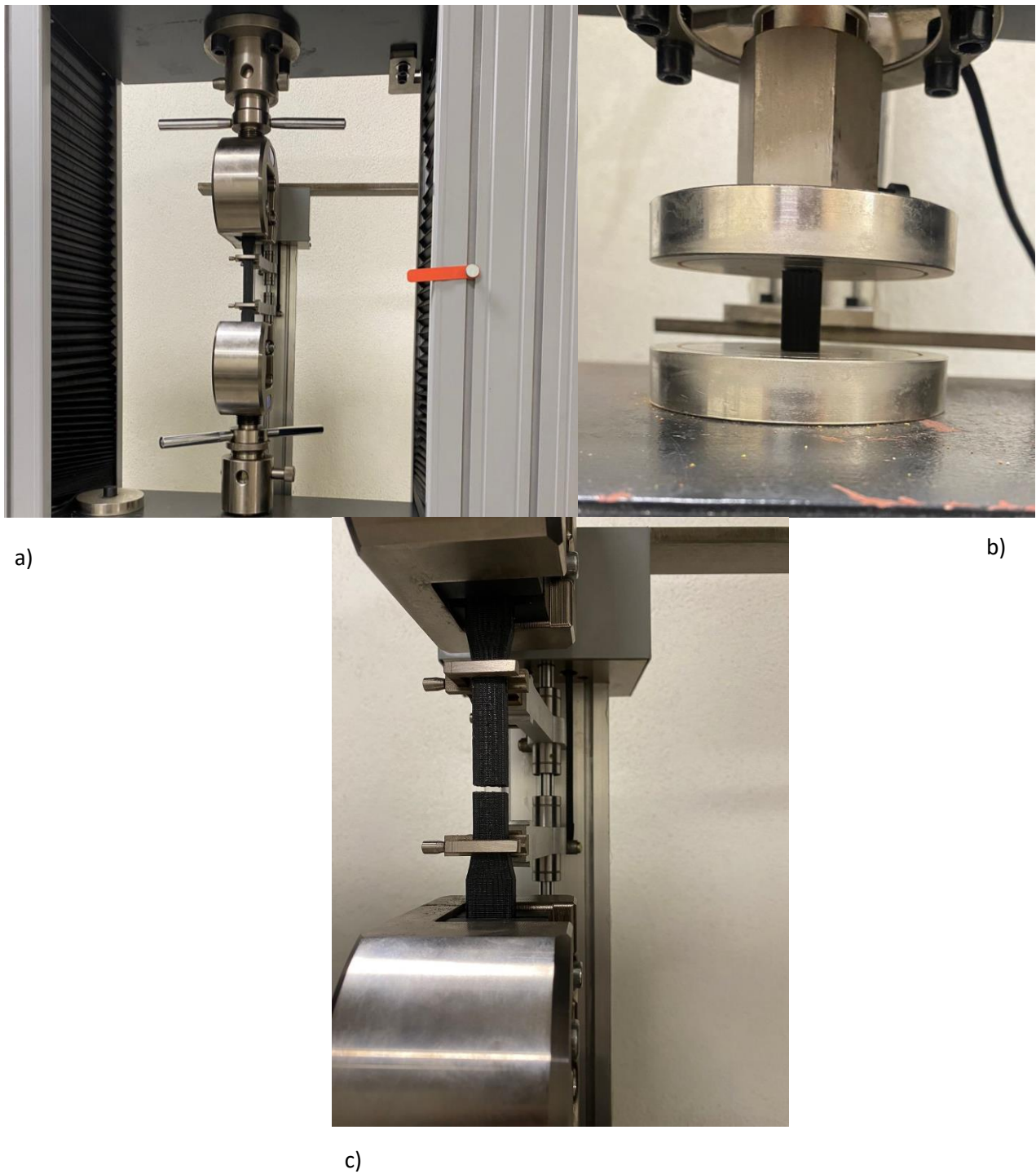


Figura 13 Probeta colocada para pruebas de compresión.

Una vez realizadas las pruebas de tensión y compresión los datos arrojados se analizaron para posteriormente llevarlos al software de simulación donde se

realizó la comparación de los datos para corroborar que se trata de datos correctos y encontrar con cuales de las características con las que se realizaron las probetas son las más adecuadas para el trabajo mecánico.

Simulación.

En la parte de la simulación, se llevó el archivo de modelado Solidworks a un archivo apto para ser manipulado en el software de simulación ANSYS. En el cual principalmente se añadieron las propiedades mecánicas del material PLA al software de simulación para tener las mismas características o las más parecidas que el material que ese uso experimentalmente, posteriormente se revisó que las características de las probetas fueran idénticas para tener los resultados más acertados.

Como primera parte para la simulación se llevó la probeta digital al software de simulación en el área de modelado para revisar que todas sus características como medidas y propiedades fueran iguales como se muestra a continuación.

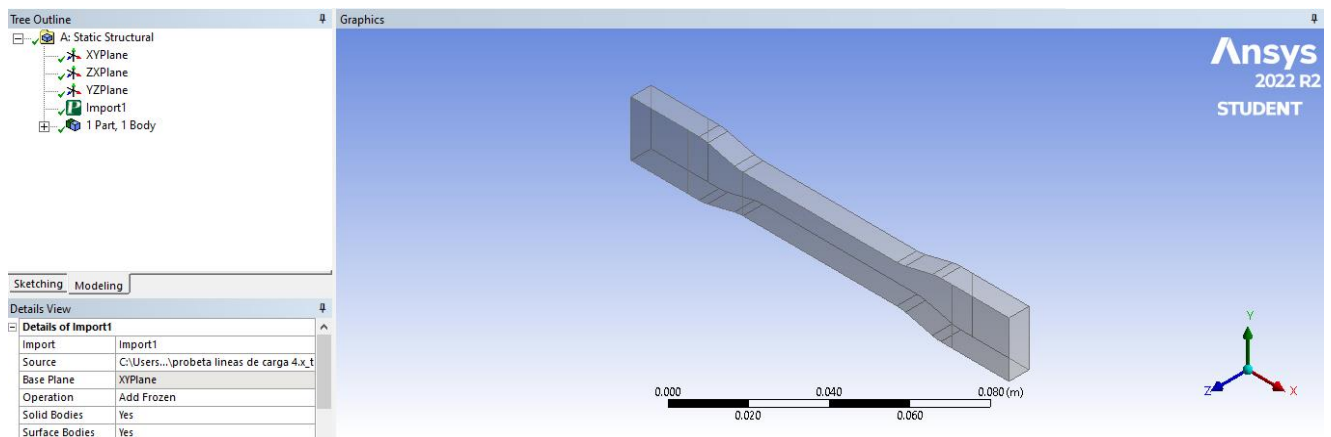


Figura 14 Modelado para la simulación.

Enseguida ya en el software de simulación se lleva a cabo la generación del mallado de la probeta de tensión para seccionar la probeta en partes y nodos para un mejor análisis como se muestra en la siguiente ilustración.

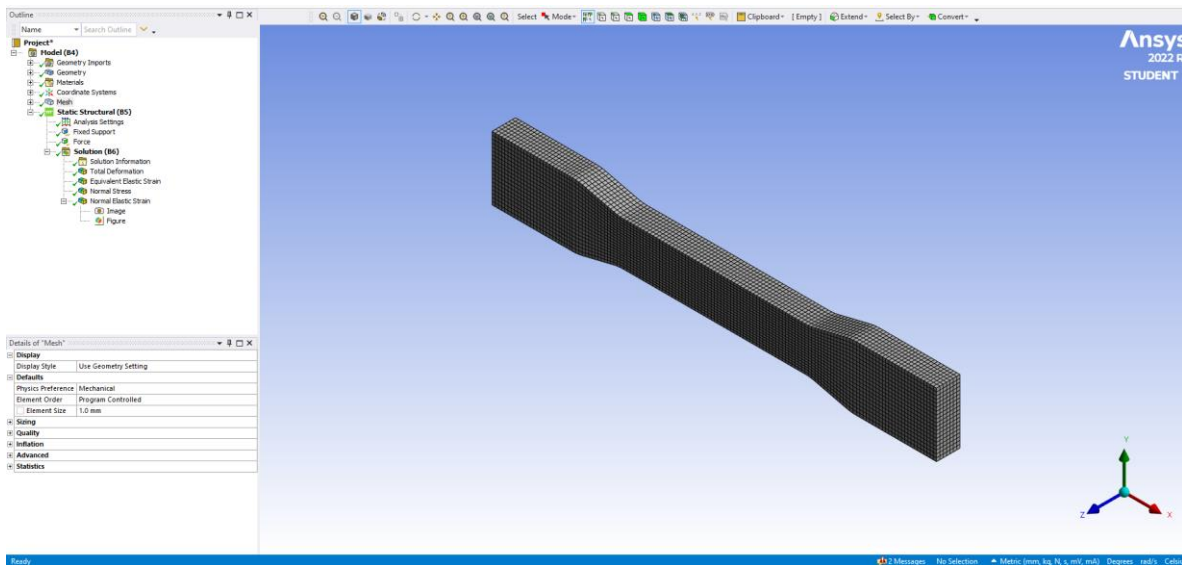


Figura 15 mallado

Posteriormente se añadieron las condiciones de frontera las cuales fueron un soporte fijo para simular la parte fija donde experimentalmente la probeta estaba sujeta y otra simulando la fuerza de tensión ejercida por la máquina la cual se tomó de los valores que están dentro de la gráfica de esfuerzo deformación de los datos obtenidos de manera experimental y la fuerza se tomó dentro del rango en la que se buscó el módulo de elasticidad que fue de 1KN, estas condiciones de frontera se añadieron mediante unas líneas de apoyo marcadas en las probetas digitales simulando las mordazas con las que estaba sujeta la probeta en la máquina.

La figura 16 representa la forma en cómo se colocaron los soportes en los extremos de la probeta para el ensayo de tensión. Se indica de color azul y rojo la posición de los soportes, la figura 17 muestra la forma en cómo se simuló el ensayo de compresión para muestras cilíndricas y prisma rectangular, como se observa en la parte inferior va el soporte y la carga de compresión se coloca en la parte superior.

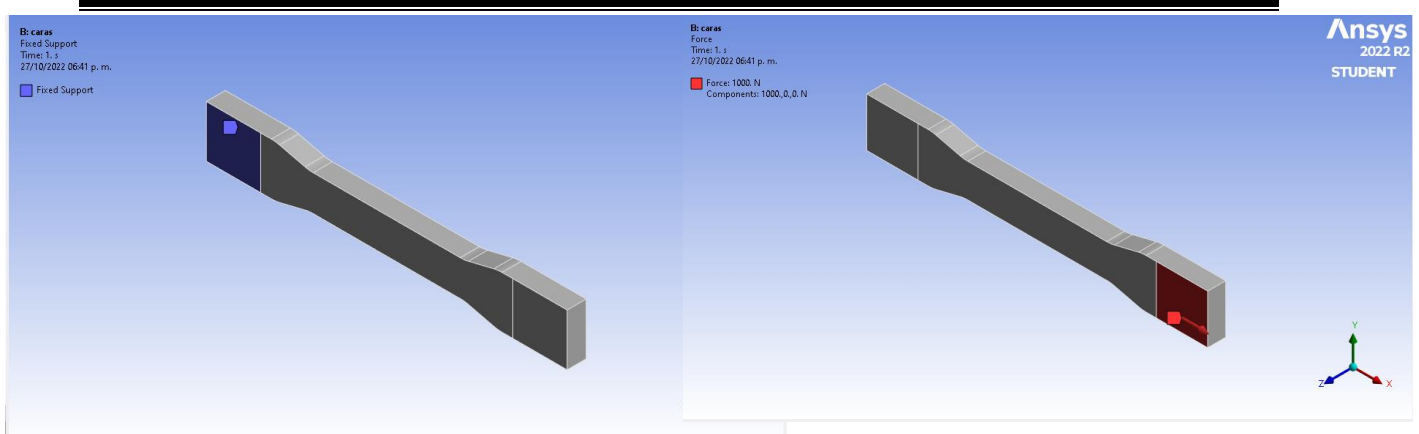


Figura 16 simulación de aplicación de fuerza de tensión.

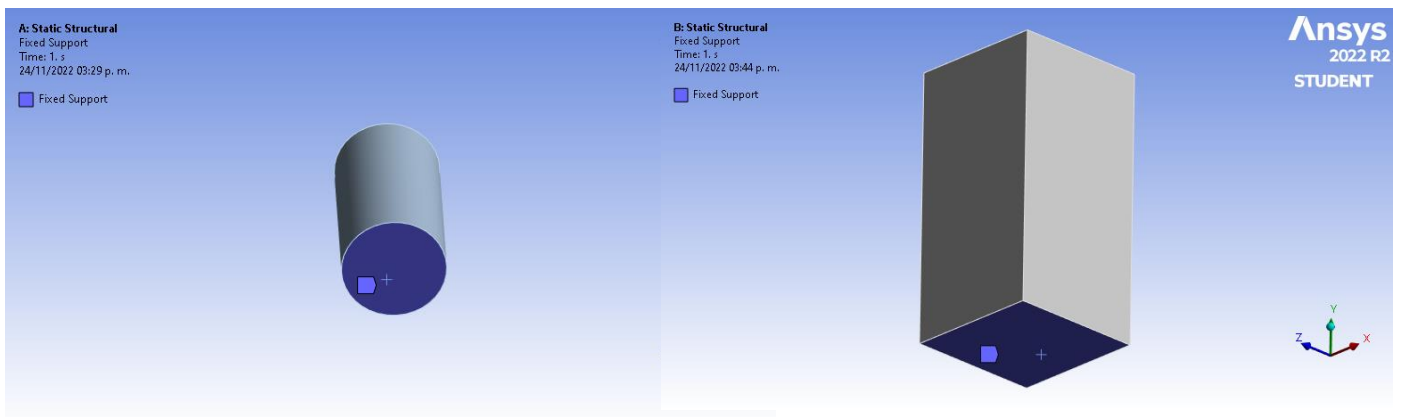


Figura 17 Esfuerzo probeta prismática.

Capítulo 6

Resultados

La densidad de cada probeta tiene un rol muy importante en sus propiedades mecánicas por lo tanto y con la finalidad de obtener una relación real entre el peso estimado mediante makerboot y el peso real de las probetas, se determino el peso mediante el uso de una balanza analítica los cuales se presentan en la tabla número 3. Como se puede observar existe una mínima variación entre cada una de las probetas, a pesar de que todas fueron impresas con el mismo material y con los mismos parámetros, el peso fue de 20.072 a 20.705 con una diferencia de 0.633gr. La diferencia puede ser asociada a que no se desprendió todo el material de la muestra, es decir si se empleo soporte e incluso la base.

Tabla 3 Peso de las probetas de PLA impresas

Probetas y cantidad de relleno.	Peso probeta 1	Peso probeta 2	Peso probeta 3
Probetas 100% relleno.	20.157gr	20.072gr	20.705gr
Probetas 75% relleno.	18.0gr	18.1gr	19.2gr
Probetas 50% relleno.	14.7gr	14.4gr	16.2gr
Probetas prismáticas.	4.4gr	3.9gr	3.3gr
Probetas cilíndricas	3.6gr	3.1gr	2.5gr

La figura 18 muestra el resultado del proceso de impresión, se puede observar que la forma es de acuerdo a lo que se esperaba, la calidad de las muestras de PLA son buenas en cuanto a las dimensiones, líneas bien definidas, trazo de impresión correcto, etc, a diferencia de otros trabajos reportados en la literatura [1], se tiene un buen control con respecto a la calidad de impresión. En cada proceso se realizaron 3 pruebas iniciales las cuales contenían 3 probetas, 2 impresas de forma horizontal y una más en forma vertical, dichas probetas están realizadas con un 100% de relleno de material PLA.



Figura 18 Probetas 100% relleno.

Las cuales fueron sometidas a una prueba de tensión en el laboratorio de impresos en el ITSUR en una máquina de tensión en la cual se llevaron hasta su punto de fractura y se obtuvieron los siguientes datos.

Los resultados arrojaron una gráfica de esfuerzo-deformación (figura 19) del material sometido a tensión los cuales se usaron para obtener el módulo de elasticidad para después ese valor usarlo para la simulación, a las muestras se les

aplico una fuerza transitoria de 0.05KN cada 0.5s hasta llegar a la fractura de las probetas.

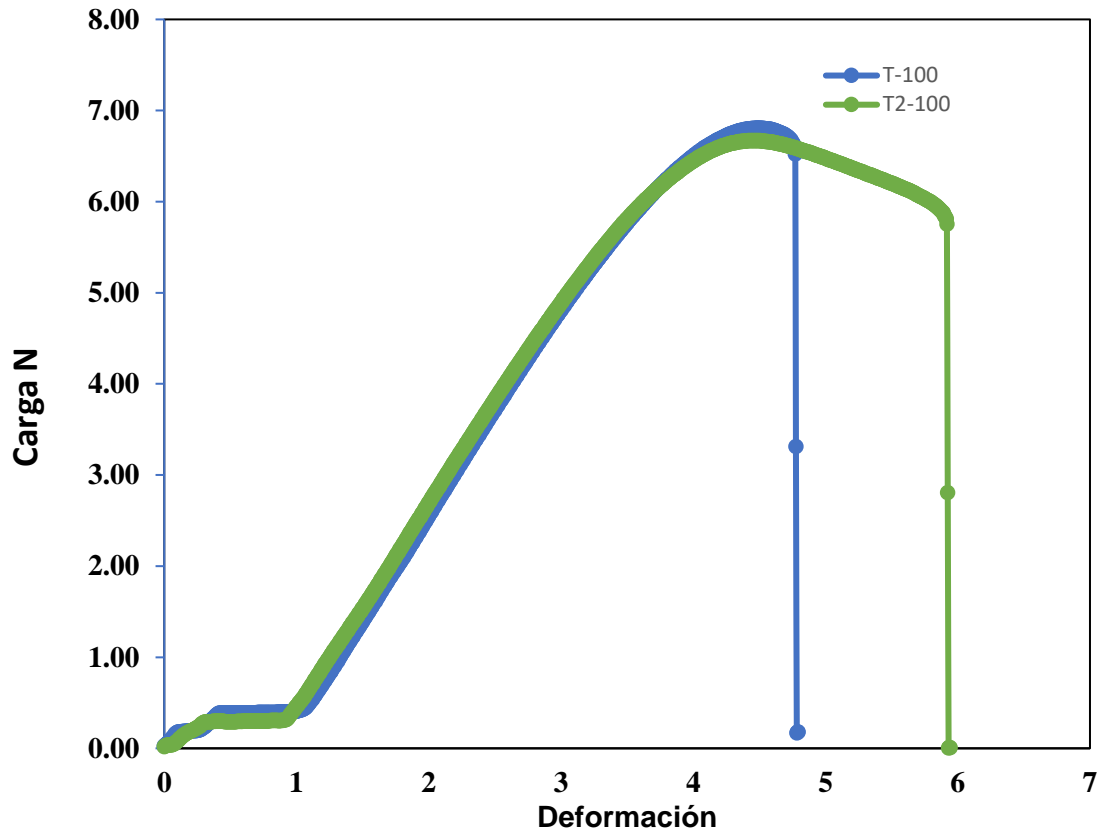


Figura 19 Diagrama esfuerzo deformación de probetas al 100% de relleno

Se sometieron las 3 probetas a una fuerza de tensión hasta llegar al punto de la fractura para así obtener los datos correspondientes para el análisis, se puede notar que las probetas 1 y 2 su comportamiento es similar ya que fueron impresas de la misma manera y en la misma posición, la probeta numero 3 tuvo un comportamiento diferente a las 2 primeras ya que por la forma en la que fue impresa sus fibras internas se encontraron en una posición más fácil de fracturar, esto se debió a que las fibras se encontraron en la misma dirección a la que fue ejercida la fuerza. Y el tiempo al que fue aplicada la fuerza transitoriamente fue estandarizado por una norma ISO y se notó que al tiempo en el que sucedió la fractura es considerable para los datos encontrados.



Figura 20 Probetas 100% fracturadas.

En el caso de las probetas con el 100% de relleno se puede ver que la fractura de las probetas fue cerca de la parte media de la misma.

En segundo lugar, se realizaron nuevamente 3 pruebas con 3 probetas las cuales están realizadas con un 75% de relleno de material PLA.



Figura 21 Probetas 75% de relleno.

Las probetas 1 y 2 de igual manera fueron impresas en la misma posición y la probeta 3 fue impresa de manera diferente, los resultados de esfuerzo-deformación fueron entregados en forma de gráficas y se muestran a continuación.

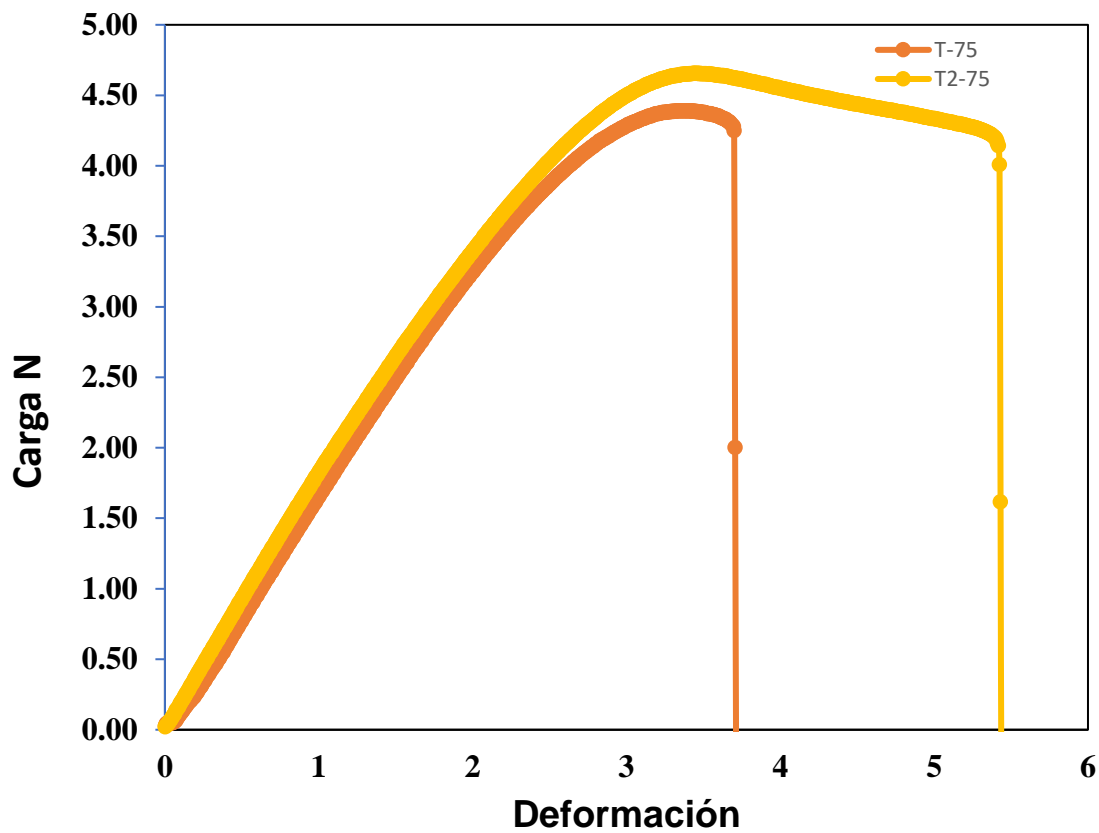


Figura 22 Diagrama esfuerzo deformación para probetas al 75 % de relleno

En esta segunda parte con las probetas de 75% de relleno se observó que el comportamiento de las probetas fue similar la variación en cuestión a las probetas de 100% de relleno es que el tiempo en el que se llegó a la fractura de estas, esto se debió a que las fibras del material estaban menos comprimidas y esto facilito el desprendimiento y la posición de la grieta que genero fue en una posición diferente a la de las probetas con 100% de relleno como se muestra enseguida.



Figura 23 Probetas 75% fracturadas.

En la tercera parte del análisis se realizaron 3 nuevas probetas las cuales se realizaron con un 50% de relleno del material PLA los resultados del análisis se muestra a continuación con las gráficas correspondientes.



Figura 24 Probetas 50% de relleno.

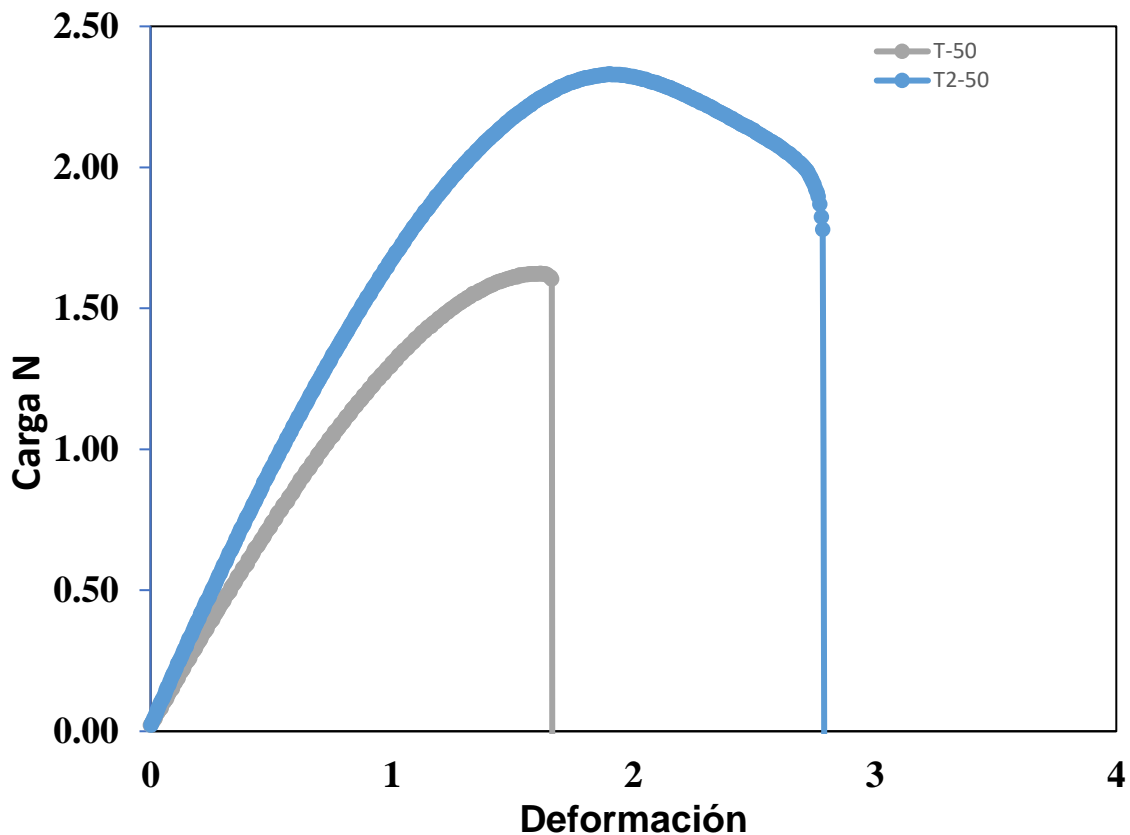


Figura 25 Diagrama esfuerzo deformación para probetas al 50% de relleno.

En el resultado de estas pruebas se observó que al aplicar la fuerza a menor tiempo el material comenzó a ceder y se comenzó a fracturar de manera más rápida y por lo tanto el comportamiento de las gráficas fue creciendo de manera más rápida ya que su fractura se generó a un menor tiempo, esto se debió a que las fibras de la probeta estaban mucho más separadas y por lo tanto en las muestras se pudo notar el desprendimiento de las fibras ya que en estas muestras se podían observar más huecos y por lo tanto su resistencia fue mucho menor, a continuación se puede notar como las fibras estaban más desprendidas.



Figura 26 Probetas 50% de relleno fracturadas.

Como era de esperarse la densidad del relleno afecta directamente la resistencia mecánica de las piezas impresas en 3D. Los cambios en la densidad puede provocar cambios en la estructura de forma micro y macroestructural [1]. La figura 27 muestra una comparación del comportamiento mecánico de las muestras evaluadas.

En la segunda parte de la investigación se crearon de manera específica con las medidas necesarias para el análisis 6 muestras las cuales 3 son de un prisma cubico y 3 más de una forma cilíndrica como se muestran a continuación.

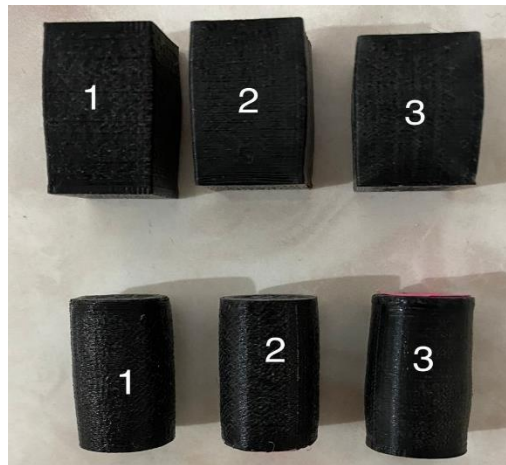


Figura 27 Probetas cilíndricas y prismáticas.

La primera muestra contiene un 100% de material PLA en su diseño, la segunda muestra contiene un 75% de relleno de material y la tercera muestra contiene un 50% de relleno de material.

En estas muestras se puede observar que todas las muestras sufrieron una deformación la cual fue realizada por la presión que se le ejerce por la máquina de ensayos universales. Se le aplicó una carga transitoria la cual generó las siguientes gráficas de Carga-tiempo las cuales muestran cómo se comportaron las probetas de acuerdo con la carga que se le aplicó en este caso fue de 0.05MPa cada 0.5s transitoriamente. La figura 28 muestra la comparación entre cada una de las probetas evaluadas, las cuales dependen del porcentaje de relleno (100%, 75% y 50%, respectivamente) al igual que en la prueba de tensión, se puede observar que conforme el porcentaje de relleno se incrementa, la resistencia a la compresión también se incrementa de forma significativa.

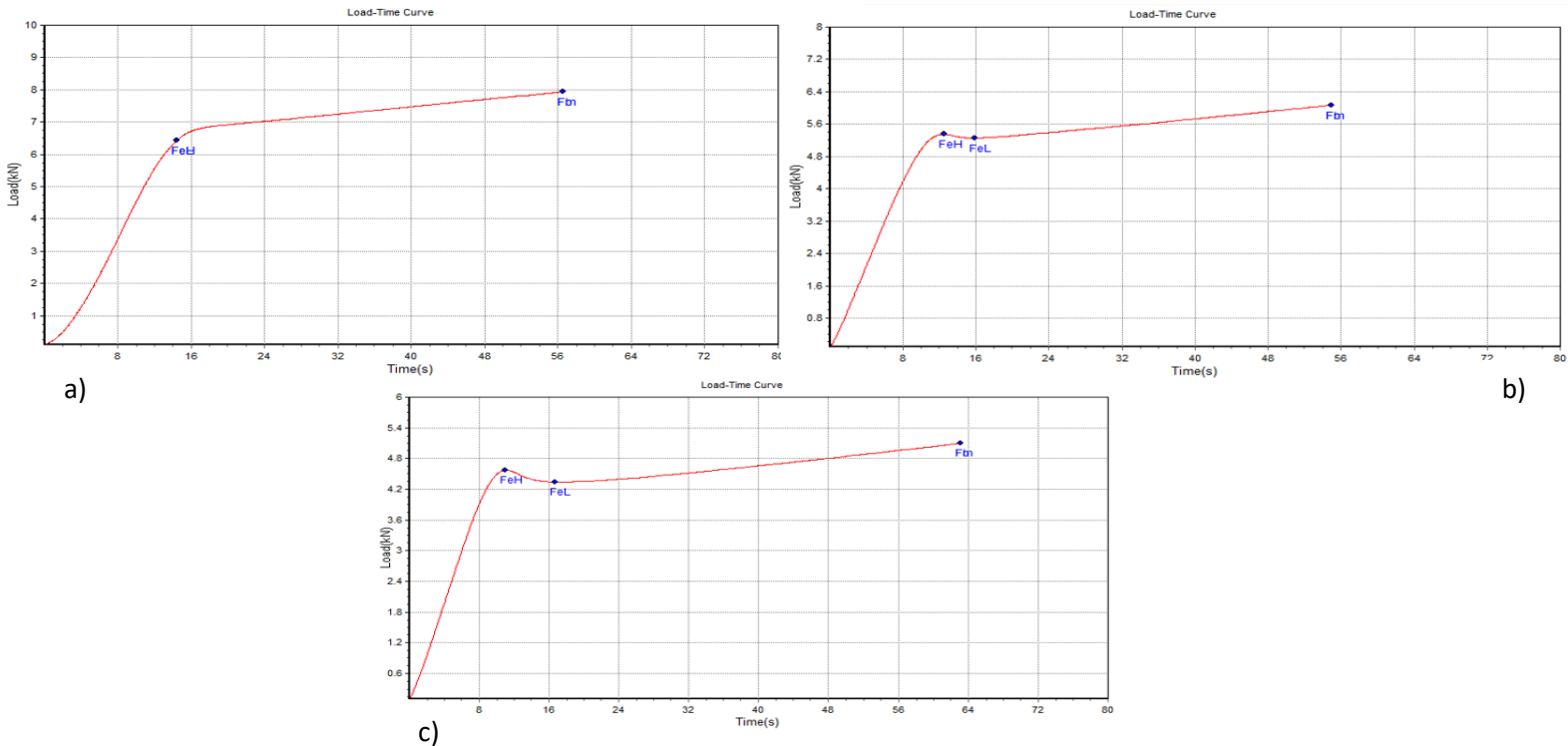


Figura 28 Graficas esfuerzo deformación de probetas rectangulares sujetas a compresión
a) 100%, b) 75% y c) 50% de relleno

En estas graficas se puede observar que la probeta con mayor cantidad de relleno soporto más carga en función del tiempo de aplicación de la carga, y por lo tanto sufrió una menor deformación, también se puede observar que con el 100% del material la curva que genera el análisis tiende a ser lineal por lo tanto una vez que llega a cierta deformación se requiere mucha más carga para seguirla deformando.

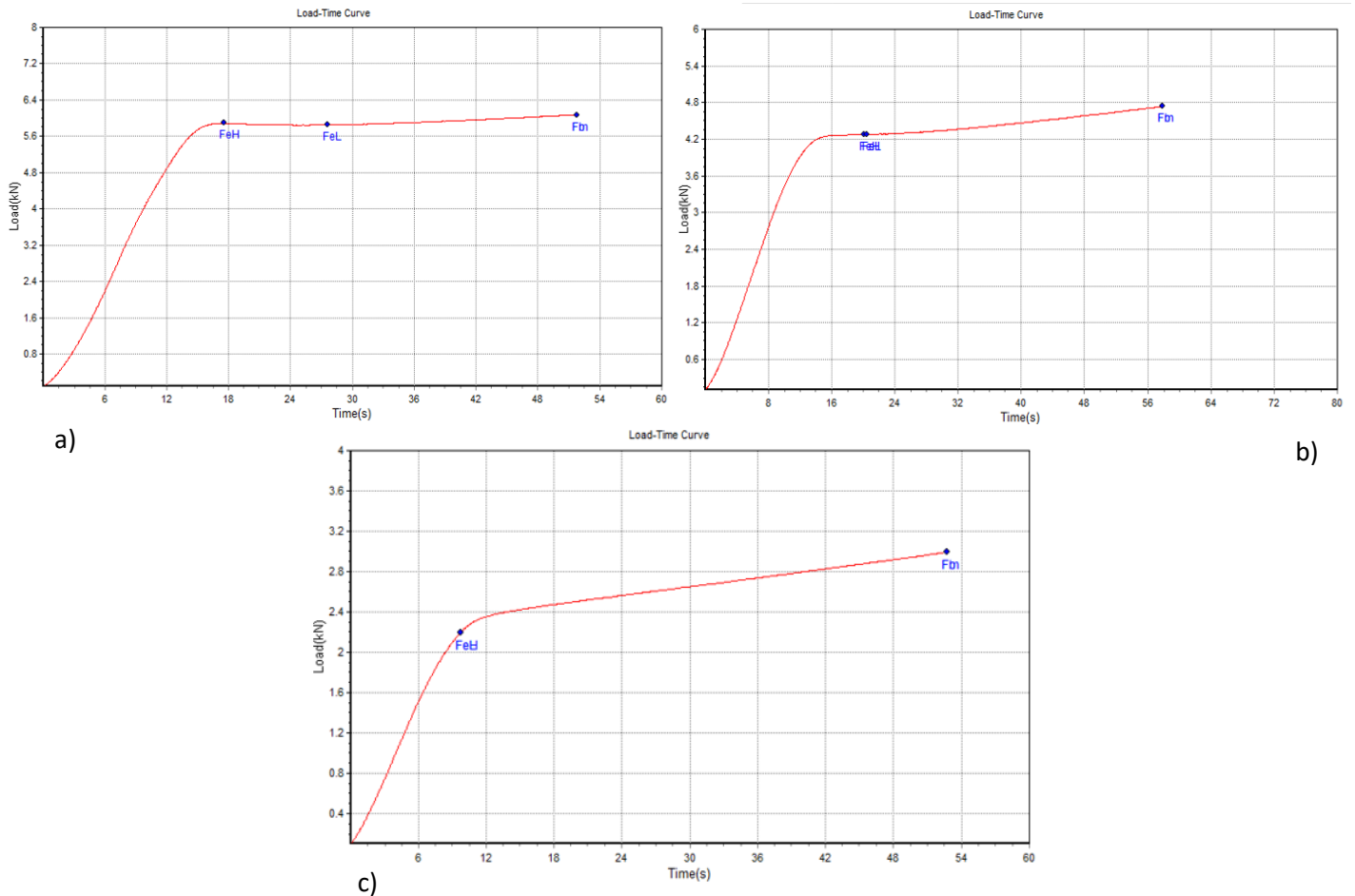


Figura 29 Graficas esfuerzo deformación de probetas rectangulares sujetas a compresión
a) 100%, b) 75% y c) 50% de relleno

Con el análisis de las gráficas de las probetas prismáticas y las cilíndricas se puede observar que dependiendo de la forma en cuanto al modelado de las probetas se observa que con la misma carga aplicada la deformación fue mayor en las probetas prismáticas, pero soportaron más carga antes de llegar a su punto de la deformación. Las curvas esfuerzo deformación logradas durante la prueba muestran un comportamiento similar a las que se reportan en la literatura

Una vez con los datos recabados los datos experimentales de las muestras PLA se llevó a cabo la exportación de los datos de una sola probeta, se tomó la probeta

1 con el 100% de relleno como referencia para llevar a cabo los datos de la simulación.

De acuerdo con los datos encontrados en la tabla 7 mostrada anteriormente, se tomó un tramo de la curva para extraer los datos para obtener los datos de la pendiente para obtener el módulo de elasticidad para añadirlo a las propiedades del material en la simulación.

Los datos necesarios para la generación del material en el software se le debe añadir 2 datos necesarios que son el módulo de Young y el radio de Poisson los cuales previamente fueron mostrados en la tabla 1, se tomó un rango de datos desde 2 a 4 que fueron los datos que se tomaron de la curva.

En la parte simulada se le aplico 1KN hasta 2KN transitoriamente y con el tiempo de 0.05s tal cual como en el análisis experimental fijo de fuerza para analizar en general el comportamiento de la probeta de manera digital como se muestra a continuación.

Como parte final de la simulación se pidieron datos de esfuerzo, tensión y deformación.

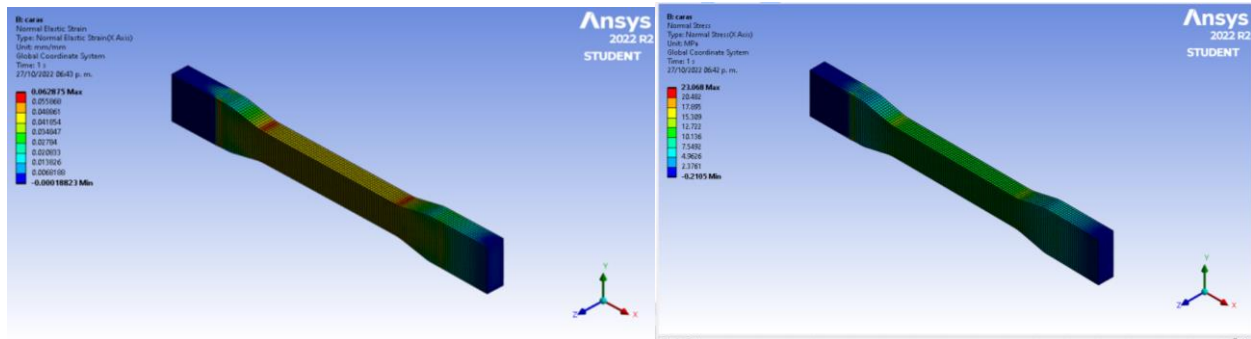


Figura 30 Simulación de las probetas bajo tensión

Para la simulación de las pruebas de compresión se realizó el mismo proceso, pero con las probetas adecuadas y con los archivos modelados previamente.

Como primera parte se llevaron nuevamente las probetas por separado a el editor del modelo.

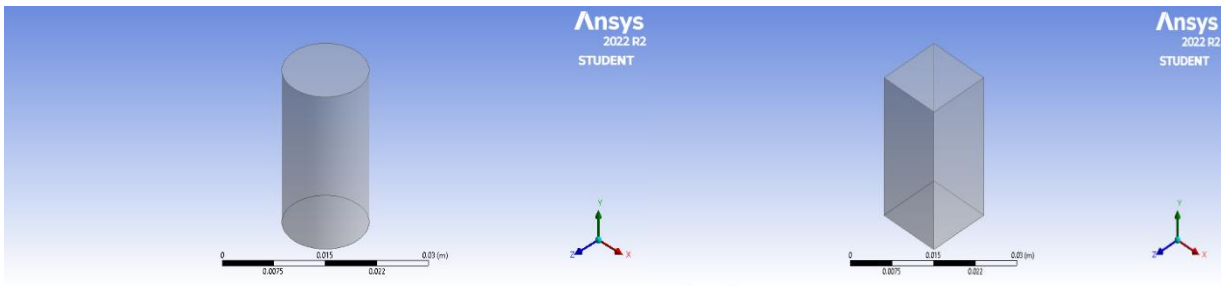


Figura 31 Probetas sometidas a compresión empleando ANSYS student a) cilíndrica, b) prisma rectangular

Se añadieron las condiciones de frontera de ambas probetas.

En este caso se le aplicó una fuerza de presión en la parte superior, que simuló la fuerza ejercida de la máquina de ensayos universales. Esta fuerza se tomó de los resultados encontrados de manera experimental de acuerdo con la pendiente donde se tomaron los valores para obtener el módulo de elasticidad y dentro del rango de datos se tomó un dato intermedio para tomar el valor de la presión ejercida.

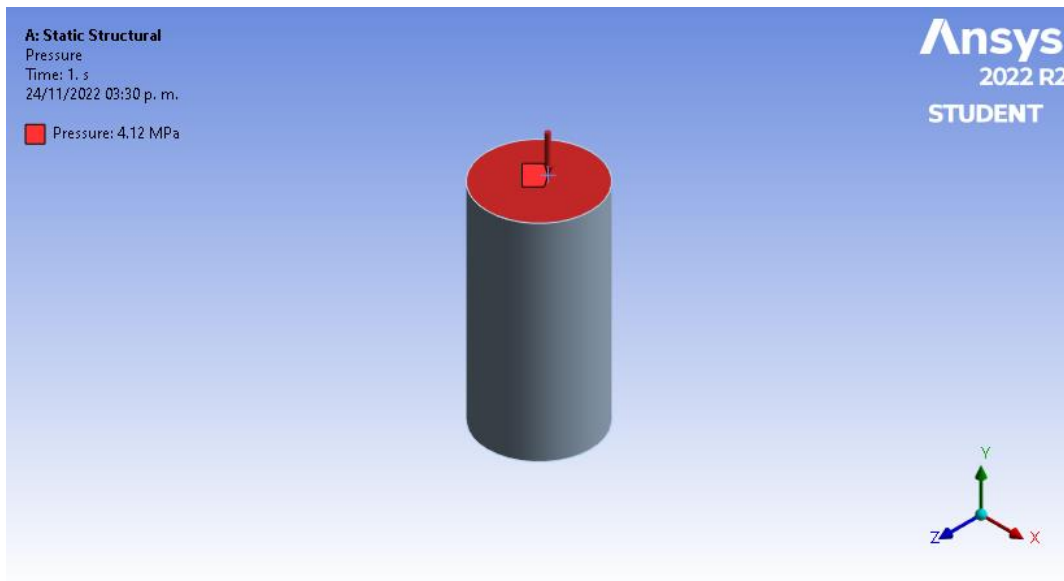


Figura 32 Presión aplicada en probeta cilíndrica.

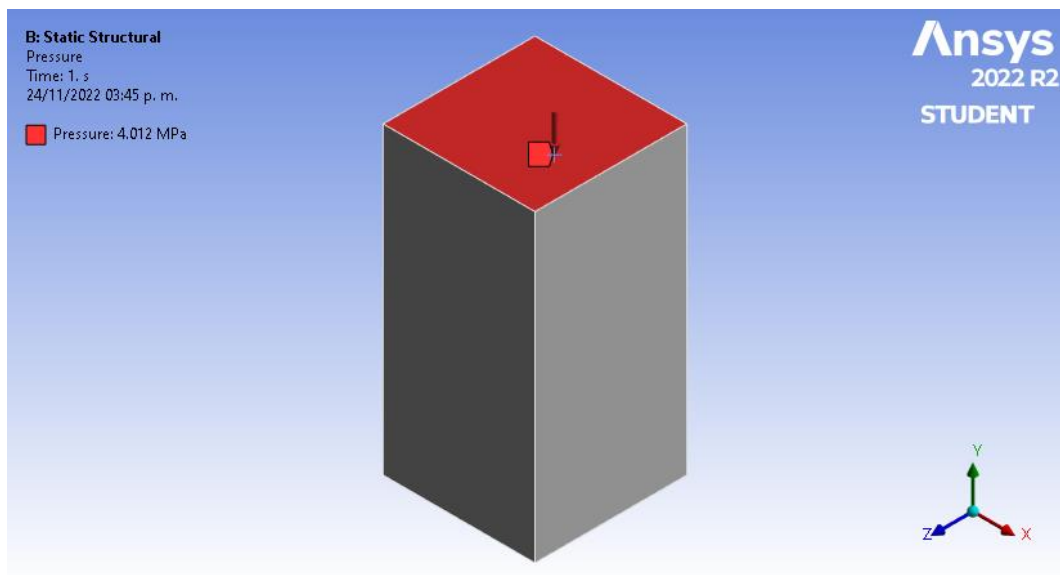


Figura 33 Presión aplicada en probeta prismática.

Por último, se obtuvieron los datos de esfuerzo y deformación los cuales se muestran enseguida.

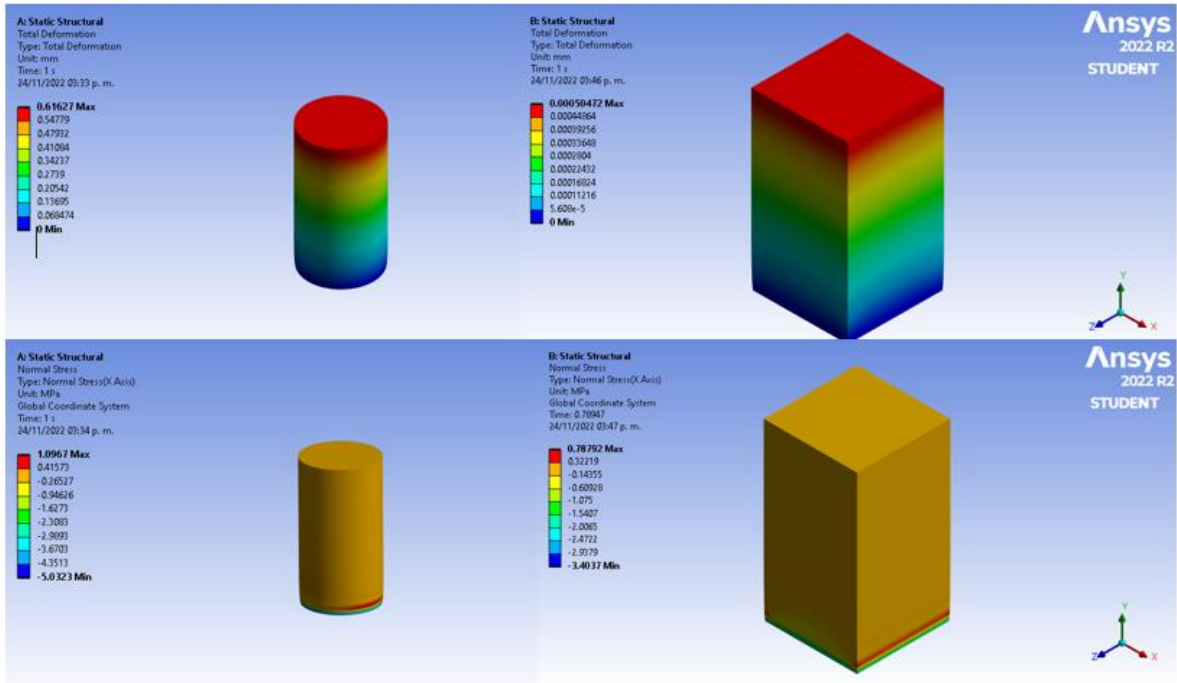


Figura 34 Probetas cilíndricas y rectangulares sometidas a compresión

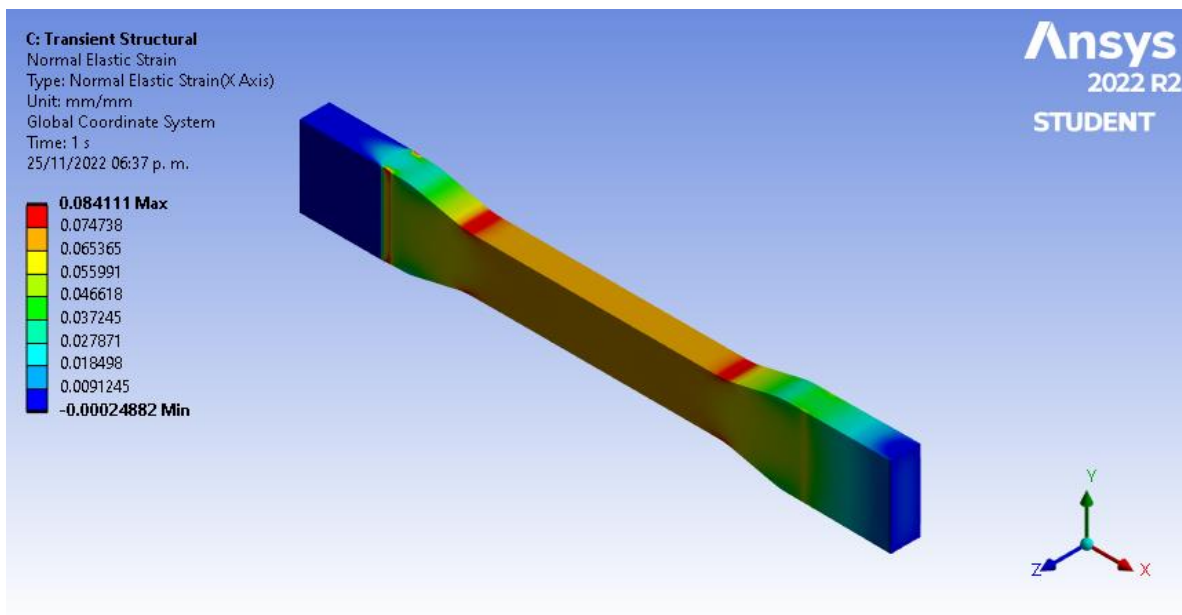


Figura 35 Probeta simulada final.

En la probeta mostrada en la ilustración 35 se muestra el esfuerzo de tensión al que fue sometida, los colores muestran del máximo hasta el mínimo de los valores de la tensión. En los colores rojos se muestra el área donde con las especificaciones dadas para la simulación es donde se sufre el mayor daño la probeta. En la siguiente grafica se muestran los valores de deformación total que sufrió la probeta.

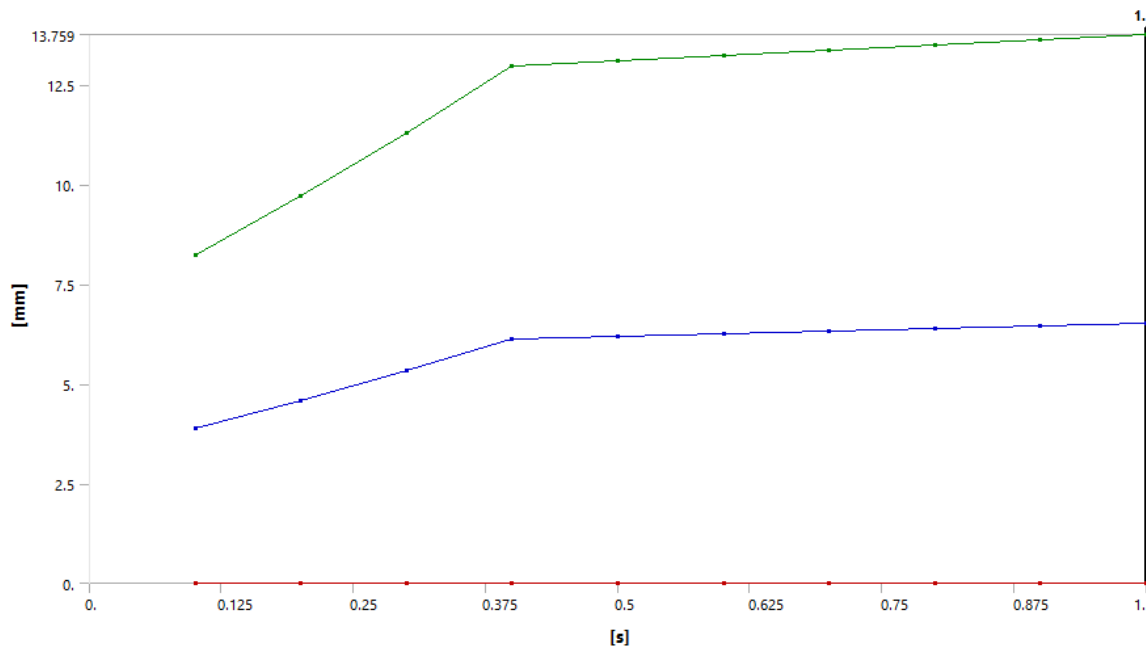


Figura 36 Diagrama deformación vs tiempo obtenida en ANSYS versión estudiantil

En la tabla anterior arrojo valores de la deformación en milímetros en función del tiempo esto para corroborar que los datos obtenidos de manera experimental fueran correctos o similares.

Capítulo 7

Análisis de Resultados

Con los datos obtenidos de manera experimental y simulada, se analizó que la máquina de ensayos universales del ITSUR arroja resultados generales para el análisis completo de las muestras, los valores obtenidos en la simulación se pueden analizar puntualmente a lo largo de todas las probetas. Por lo que el análisis de las probetas experimentalmente y sus valores se encontraron en el rango de los valores estándares que arroja el software.

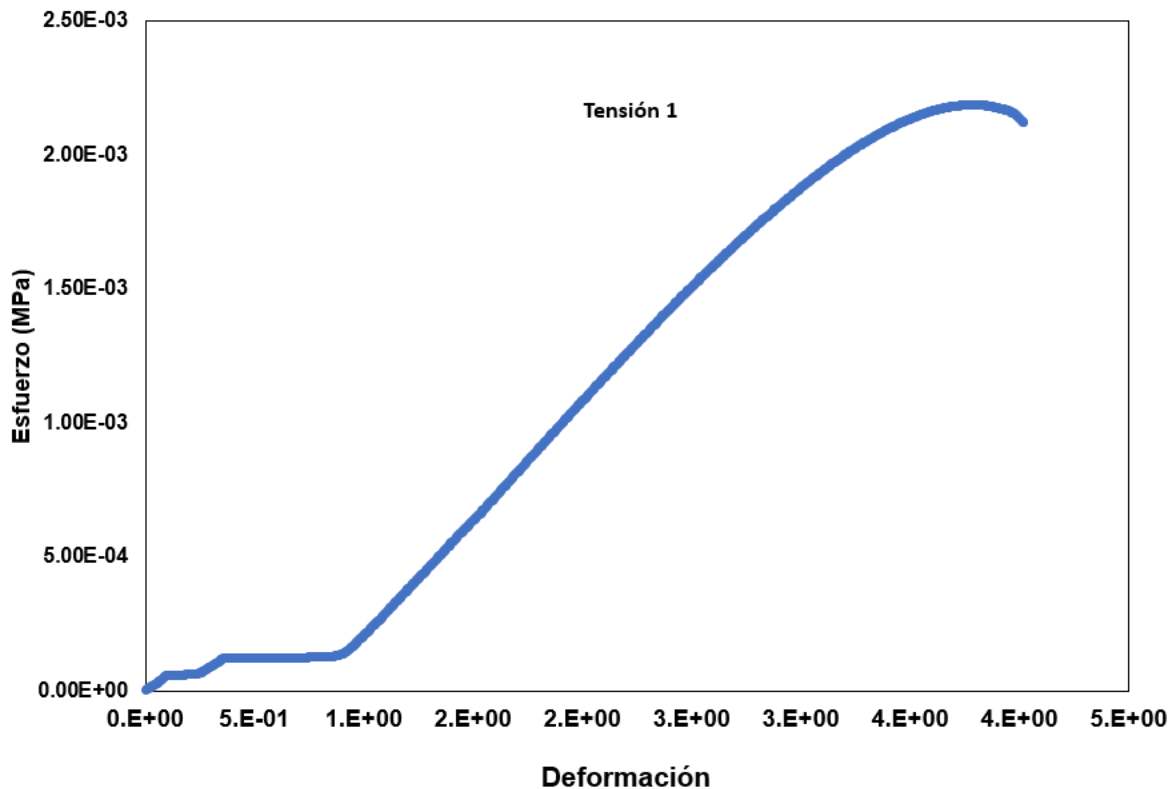


Figura 37 Diagrama esfuerzo deformación obtenida mediante ANSYS

Comparando la gráfica de la figura 37 la cuál fue obtenida mediante ANSYS, con respecto a la figura 19 obtenida de forma experimental se puede observar que existe una buena similitud, esto es debido a que en el software se configuraron todas las características y propiedades asociadas al material de estudio. El comportamiento mecánico es muy similar al observado por Chamil Abeykoon [1] quienes estudiaron probetas de PLA y ABS los valores obtenidos fueron de 42 MPa para el PLA y 25 MPa para el ABS.

Nagendra G. Tanikella [23] estudiaron el comportamiento mecánico de piezas funcionales empleando impresoras 3D de código abierto, las pruebas muestran que la resistencia a la tracción de una muestra impresa depende en gran medida de la masa de la muestra para todos los materiales, concluyendo que la calidad del material juega un rol muy importante para el rendimiento mecánico. Jun Nakajima y col. [24] modificaron la estructura de piezas impresas con el uso de filamento fundido observando que al modificar dicha tanto la capacidad de carga como el alargamiento de las piezas se puede mejorar significativamente, para ello variaron el tamaño de la hendidura y el grosor de las propiedades de tracción, los especímenes con una combinación de capas impresas a lo largo y transversal a su longitud mostraron la mayor resistencia a la rotura por tracción y el porcentaje de elongación de rotura (2,43 MPa y 183 %, respectivamente).

Para el caso de la resistencia a la compresión W. Förster y col. [25] estudiaron la manera en como el relleno de los componentes brindan estabilidad a los componentes fabricados mediante manufactura aditiva, para ello emplearon esferas huecas en un empaque hexagonal cerrado, con la característica que el contacto entre las esferas se modela como una intersección, los valores del ensayo de compresión se utilizaron para la calibración del modelo de simulación, obteniendo una buena concordancia con el enfoque de ablandamiento parcial. Dichos resultados son muy similares a los obtenidos en el presente trabajo. La figura 38 muestra una comparación entre los resultados obtenidos en nuestra investigación y el realizado por Förster y colaboradores.

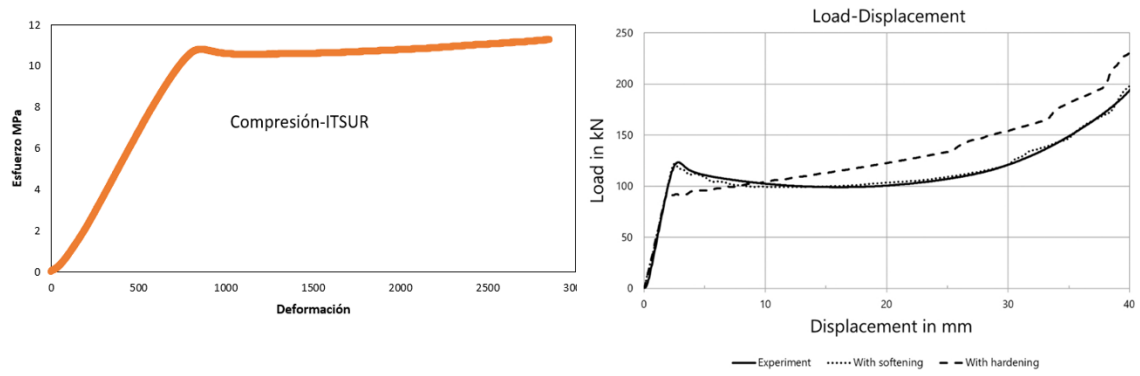


Figura 38 Comparación de los diagramas esfuerzo deformación a) obtenida de forma experimental en el ITSUR, b) reportada en la literatura [25]

Capítulo 8

Conclusiones y trabajo a futuro

Las probetas fueron diseñadas y fabricadas de manera exitosa y con base a la norma ASTM D638, las probetas fueron impresas a diferentes porcentajes de relleno 100%, 75% y 50% las cuales tienen buena calidad de impresión.

Los parámetros de impresión como velocidad de depositación de filamento, temperatura de boquilla, patrón de relleno y tipo de material son clave del proceso de impresión sobre las propiedades físicas y mecánicas de las probetas impresas en 3D.

Los resultados obtenidos de manera experimental fueron correctos, pero no se encontraron dentro del área que se deseaba analizar, los datos se encontraron en un lugar donde no fue el más alarmante de las probetas de tensión que cuentan con mayor rendimiento.

Las probetas prismáticas y cilíndricas de igual manera arrojaron datos generales, pero en este caso si cumplieron con los resultados que se deseaba encontrar.

Como trabajo a futuro se buscará analizar nuevas probetas de manera experimental en los puntos más críticos de las probetas de tensión ya que se conocen los lugares donde están situados los puntos más críticos de análisis y para así poder añadir todos los datos posibles para poder llegar a un análisis completo. Por el momento se sigue trabajando en ello ya con algunos resultados de manera simulada y con los puntos de análisis ya encontrados para posteriormente llevar a cabo todo el proceso de impresión y llevar a cabo las pruebas de tensión de nuevas probetas. También se buscará aplicar un análisis transitorio para las probetas de compresión a esto añadiéndole más datos de carga y tiempo para tener un análisis más concreto ya que por el momento solo se obtuvieron resultados generales.

Referencias bibliográficas

- [1] C. Abeykoon, P. Sri-Amphorn, and A. Fernando, "Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 3, no. 3, pp. 284–297, 2020, doi: 10.1016/j.ijlmm.2020.03.003.
- [2] R. Torre, S. Brischetto, and I. R. Dipietro, "Buckling developed in 3D printed PLA cuboidal samples under compression: Analytical, numerical and experimental investigations," *Addit. Manuf.*, vol. 38, no. December 2020, p. 101790, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2020.101790.
- [3] W. M. H. Verbeeten, M. Lorenzo-Bañuelos, and P. J. Arribas-Subiñas, "Anisotropic rate-dependent mechanical behavior of Poly(Lactic Acid) processed by Material Extrusion Additive Manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 31, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2019.100968.
- [4] W. M. H. Verbeeten and M. Lorenzo-Bañuelos, "Material Extrusion Additive Manufacturing of Poly(Lactic Acid): Influence of infill orientation angle," *Addit. Manuf.*, vol. 59, no. May, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.103079.
- [5] W. Reports, "History of Additive Manufacturing," *Hist. Addit. Manuf.*, pp. 1–24, 2017, doi: 10.4018/978-1-5225-2289-8.ch001.
- [6] "Análisis de las propiedades fisicoquímicas de materiales poliméricos para re-uso en impresiones 3D – CienciAcierta." <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2018/09/09/analisis-de-las-propiedades-fisicoquimicas-de-materiales-polimericos-para-re-uso-en-impresiones-3d/> (accessed Apr. 25, 2023).
- [7] "¿Qué es la tecnología FDM?" <https://fablab.esan.edu.pe/blog/que-es-la-tecnologia-fdm> (accessed Apr. 25, 2023).
- [8] A. J. Albuquerque, "Optimización y caracterización de piezas de PLA fabricadas mediante técnicas aditivas," Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
- [9] "Fabricación aditiva: impresión 3D en manufactura - Mecalux.com.mx." <https://www.mecalux.com.mx/blog/fabricacion-aditiva> (accessed Apr. 25, 2023).
- [10] "Materiales de fabricación aditiva, ¿cuáles son? | Mint." <https://mintforpeople.com/noticias/materiales-fabricacion-aditiva/> (accessed Apr. 25, 2023).
- [11] M. Mochizuki, *Synthesis, properties and structure of polylactic acid fibres*, vol. 1. Woodhead Publishing Limited, 2009. doi:

- 10.1533/9781845696504.2.257.
- [12] A. Ferrández-Montero, M. Lieblich, R. Benavente, J. L. González-Carrasco, and B. Ferrari, "Study of the matrix-filler interface in PLA/Mg composites manufactured by Material Extrusion using a colloidal feedstock," *Addit. Manuf.*, vol. 33, no. February, p. 101142, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101142.
- [13] J. C. García, "Reducción de la fragilidad de formulaciones industriales de ácido poliláctico – PLA mediante el empleo de técnicas de mezclado y compatibilización," p. 243, 2018.
- [14] S. M. Mirkhalaf and M. Fagerström, "The mechanical behavior of polylactic acid (PLA) films: fabrication, experiments and modelling," *Mech. Time-Dependent Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 119–131, 2021, doi: 10.1007/s11043-019-09429-w.
- [15] S. Farah, D. G. Anderson, and R. Langer, "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review," *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 107, pp. 367–392, 2016, doi: 10.1016/j.addr.2016.06.012.
- [16] S. Anand Kumar and Y. Shivraj Narayan, *Tensile testing and evaluation of 3D-printed PLA specimens as per ASTM D638 type IV standard*, no. January 2019. Springer Singapore, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-2718-6_9.
- [17] D. R. Askeland and W. J. Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales*, Séptima Ed., vol. 12, no. 1. México, D.F: Cengage Learning, 2010. [Online]. Available: <http://latinoamerica.cengage.com>
- [18] J. Newell, *Ciencia de Materiales Aplicaciones en Ingeniería*, Primera Ed. México: Alfaomega, 2010.
- [19] T. Lim, H. Cheng, W. Song, J. Lee, S. Kim, and W. Jung, "Simulated and experimental investigation of mechanical properties for improving isotropic fracture strength of 3D-printed capsules," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 16, 2021, doi: 10.3390/ma14164677.
- [20] J. S. Bergström and D. Hayman, "An Overview of Mechanical Properties and Material Modeling of Polylactide (PLA) for Medical Applications," *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 44, no. 2, pp. 330–340, 2016, doi: 10.1007/s10439-015-1455-8.
- [21] D. System, "Solidworks." Alemania, 2019.
- [22] S. R. Lozano, "Tesis para obtener el grado de Doctor en Tecnología 'Becado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología,'" *Tesis*, 2019.
- [23] N. G. Tanikella, B. Wittbrodt, and J. M. Pearce, "Tensile strength of

- commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing,” *Addit. Manuf.*, vol. 15, no. 2010, pp. 40–47, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.03.005.
- [24] J. Nakajima, K. Fayazbakhsh, and Y. Teshima, “Experimental study on tensile properties of 3D printed flexible kirigami specimens,” *Addit. Manuf.*, vol. 32, no. October 2019, p. 101100, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101100.
- [25] W. Förster, T. Pucklitzsch, D. Dietrich, and D. Nickel, “Mechanical performance of hexagonal close-packed hollow sphere infill structures with shared walls under compression load,” *Addit. Manuf.*, vol. 59, no. August, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.103135.