

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la

Producción

Comparación tecnológica de patrones de relleno en impresión 3D

por extrusión usando simulación

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Jocelyne Alexandra Acosta Camacho

Anthony Benoni Ramón Vidal

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación a mis padres, mi madre, Martha Vidal, por siempre estar pendiente de mi a lo largo de mi vida, por brindarme su apoyo incondicional, su paciencia y su amor. A mi padre, Nelson Ramón (+), por todas las palabras de ánimo, consejos y valores inculcados para formar el hombre que soy en la actualidad.

Anthony Ramón

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mi extraordinaria mamá, Catalina Camacho, y abuela, Yolanda Castillo, quienes han representado en mi camino una refulgente guía, pues con sus virtudes, sabiduría e inteligencia me han conducido a lograr exitosamente todos mis objetivos, siempre teniendo como pilares fundamentales la integridad, bondad y perseverancia; tanto ellas como mi querida prima Melissa Encalada, Cristina Dávila (+), sobrinos(as), madrina Carmen Camacho, ahijadas Sirel Murillo y Estefanía Calderón, son la motivación que me impulsa a superar mis límites para acercarme cada vez más a mi meta de realización personal y profesional. También lo dedico a mis queridos compañeros politécnicos, profesores, consejeros, coordinadores, amigos, socios, que aportaron no sólo a mi formación académica y profesional sino también a mi crecimiento personal.

Jocelyne A. Acosta Camacho

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a mi profesor tutor Carlos Gabriel Helguero Alcívar, PhD y Francis Loayza, PhD. Sin su habilidad, conocimiento, paciencia y constancia, no hubiésemos logrado culminar este trabajo. Formaron parte importante de esta historia con sus aportes profesionales y académicos. Gracias por sus orientaciones

Anthony Ramón

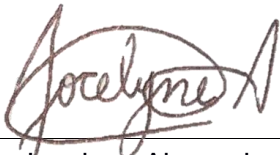
AGRADECIMIENTOS

A través de estas líneas expreso mis más sinceros agradecimientos a Dios y a todas las personas que, a lo largo de mi vida estudiantil, contribuyeron de alguna u otra forma a mi actual logro, obtener mi anhelado título de Ingeniera Mecánica; a continuación, mencionaré a algunas de ellas. A mi mamá y abuelita, mis tías y padrinos, mis amigos de carrera, mis mejores amigos, mis amigas de colegio, mis mentores y profesores Christian Silva, Mario Patiño y Andrea Boero quienes representan modelos a seguir en mi vida profesional; en especial a Carlos Helguero, que con su vasta experiencia y vocación ha sido catedrático, consejero, guía, tutor y amigo durante mis últimos años de carrera, incluyendo en la elaboración de este proyecto de titulación. Además, agradezco a mi querida familia, que ha velado siempre por mi bienestar, apoyándome en los momentos más críticos. A todos los que no han sido mencionados anteriormente, pero sin embargo fueron parte fundamental de mis logros. ¡Gracias desde el fondo de mi corazón!

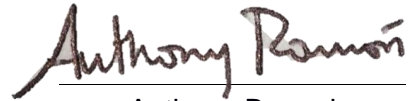
Jocelyne A. Acosta Camacho

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (*nombre de los participantes*) y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Jocelyne Alexandra
Acosta Camacho



Anthony Benoni
Ramón Vidal

EVALUADORES

.....
Ing. Loayza Paredes Francis, PhD.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Ing. Helguero Alcívar Carlos, PhD.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla una comparativa tecnológica de las cualidades físicas y mecánicas de 10 patrones de relleno, 9 comúnmente utilizados para impresión 3D y uno propuesto por los autores. A través de herramientas de simulación, se encontraron las propiedades mecánicas que aporta cada patrón de relleno en un elemento de impresión 3D para así proveer una potencial herramienta al diseñador que permita seleccionar el patrón adecuado de acuerdo con los requerimientos de diseño. Se empleó Inventor Professional, versión estudiantil, para el diseño exterior de las probetas basándose en la norma ISO 527 para ensayos de tensión y la norma ISO 604 para los ensayos de compresión. En las simulaciones de los ensayos, se empleó Inventor Nastran, para el análisis de elementos finitos. Se aplicaron fuerzas fijas para todas las probetas, 9 MPa y 33 MPa para los ensayos de compresión y tensión respectivamente. Curva de Hilbert destacó en tensión, sin embargo, en el ensayo de compresión sus propiedades mecánicas disminuyeron, de manera opuesta a HoneyComb. Patrones de relleno como concéntrico, rectilíneo, HoneyComb y Grid, que presentan en su geometría líneas rectas distribuidas en toda la probeta mostraron un comportamiento promedio tanto en tensión como en compresión, por lo que son patrones que pueden usarse en aplicaciones que requieran resistencia a la tensión y a la compresión simultáneamente. Los patrones de relleno con diseño espiral no proporcionaron buenas características mecánicas frente a estímulos de tensión y compresión.

Palabras Clave: Patrón de relleno, impresión 3D, propiedades mecánicas, ensayo de tensión, ensayo de compresión, optimización.

ABSTRACT

This study proposes a technological comparison of the physical and mechanical properties of 10 infill patterns commonly used in 3D printing purposes, including one own authorship among them. Each infill pattern's mechanical properties were known by simulating previously designed specimens, providing 3D printers a potential selection tool based on the design requirements. Inventor Professional, student version, was run for the specimens' exterior design, meeting the ISO 527 standard for tension tests and the ISO 604 standard for compression tests. Inventor Nastran was run for the finite element analysis. Fixed forces were applied to the specimens, 9 MPa and 33 MPa for the compression and tension tests, respectively. Hilbert curve stood out in tension; however, in the compression test, its mechanical properties decreased, unlike HoneyComb. Infill patterns such as concentric, rectilinear, HoneyComb, and Grid, which include straight lines in their geometry distributed throughout the specimens, showed an average behavior in both tension and compression stimuli. Hence, those patterns should be used in applications that require resistance to tension and compression simultaneously. The spiral design infill patterns did not provide propitious mechanical characteristics against tension and compression tests.

Keywords: *Infill pattern, 3D printing, mechanical properties, tension test, compression test, optimization.*

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| RESUMEN..... | I |
| ABSTRACT | II |
| ÍNDICE GENERAL | III |
| ABREVIATURAS..... | VII |
| SIMBOLOGÍA | VIII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | IX |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | XI |
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Definición del Problema..... | 1 |
| 1.2 Justificación del proyecto | 2 |
| 1.3 Objetivos | 3 |
| 1.3.1 Objetivo General | 3 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 3 |
| 1.4 Marco teórico..... | 4 |
| 1.4.1 Marco Legal | 4 |
| 1.4.2 Manufactura Aditiva (AM) | 4 |
| 1.4.3 Proceso de impresión 3D..... | 5 |
| 1.4.4 Modelado por deposición fundida (FDM) | 5 |
| 1.4.5 Parámetros de impresión | 7 |
| 1.4.6 Propiedades mecánicas..... | 9 |
| 1.4.7 Curvas esfuerzo-deformación | 10 |
| 1.4.8 Criterio de Von Mises..... | 11 |
| 1.4.9 Índice de resistencia mecánica para patrones de relleno ensayados | 11 |
| CAPÍTULO 2..... | 12 |

| | | |
|-----------------|--|----|
| 2. | Metodología | 12 |
| 2.1 | Delimitación de la necesidad identificada | 12 |
| 2.2 | Diseño del experimento | 12 |
| 2.2.1 | Determinar los objetivos del experimento | 12 |
| 2.2.2 | Categorizar los requerimientos en grupos | 14 |
| 2.2.3 | Jerarquización de los requerimientos | 14 |
| 2.2.4 | Casa de la calidad | 15 |
| 2.2.5 | Descripción de las alternativas | 16 |
| 2.2.6 | Matriz de decisión | 17 |
| 2.2.7 | Selección de las alternativas..... | 17 |
| 2.3 | Caracterización de la simulación de ensayos..... | 18 |
| 2.3.1 | Ensayo de compresión: Diseño de probetas | 18 |
| 2.3.2 | Determinación de propiedades de compresión: módulo de compresión.... | 18 |
| 2.3.3 | Determinación de propiedades de compresión: resistencia a la compresión | 19 |
| 2.3.4 | Ensayo de tracción: Diseño de probetas | 19 |
| 2.3.5 | Determinación de propiedades de tracción: módulo de elasticidad | 20 |
| 2.3.6 | Determinación de propiedades de tensión: resistencia a la tensión | 21 |
| 2.4 | Diseño detallado..... | 21 |
| 2.4.1 | Dimensionamiento de probetas de ensayo de compresión y tensión | 21 |
| 2.4.2 | Selección de patrones de relleno..... | 21 |
| 2.4.3 | Diseño de los patrones de relleno en las probetas | 22 |
| 2.4.4 | Determinación teórica de porcentaje de relleno por patrón | 22 |
| 2.5 | Simulación de ensayos de tensión y compresión | 25 |
| 2.5.1 | Parámetros de simulación | 26 |
| CAPÍTULO 3..... | | 28 |
| 3. | Resultados Y ANÁLISIS | 28 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | Diseño exterior de modelos tridimensionales de probetas | 28 |
| 3.2 | Diseño interior de modelos tridimensionales de probetas | 30 |
| 3.2.1 | Probetas según norma ISO 527 para ensayos de tensión al 20% de relleno | 30 |
| 3.2.2 | Probetas según norma ISO 604 para ensayos de tensión para determinar módulo de compresión al 20% de relleno | 32 |
| 3.2.3 | Probetas según norma ISO 604 para ensayos de tensión para determinar resistencia a la compresión al 20% de relleno | 34 |
| 3.3 | Cálculo de dimensiones de patrones de relleno al 20% | 36 |
| 3.3.1 | Validación de porcentajes de relleno de probetas resultantes | 37 |
| 3.4 | Parámetros de entrada para simulación | 40 |
| 3.5 | Simulaciones | 40 |
| 3.5.1 | Resumen de resultados por probeta | 42 |
| 3.5.2 | Resumen de resultados de ensayo de tensión en probetas con norma ISO 527 | 72 |
| 3.5.3 | Resumen de resultados de ensayo de compresión en probetas con norma ISO 604 para módulo de compresión | 73 |
| 3.5.4 | Resumen de resultados de ensayo de compresión en probetas con norma ISO 604 para resistencia a la compresión | 74 |
| 3.6 | Comparación gráfica de resultados | 75 |
| 3.7 | Gráficas de comparación de resultados | 76 |
| 3.8 | Comparación de tiempos de impresión y cantidad de material | 78 |
| 3.9 | Análisis de costos | 79 |
| 3.9.1 | Activos tangibles | 79 |
| 3.9.2 | Activos intangibles | 80 |
| 3.9.3 | Costo mano de obra | 81 |
| 3.9.4 | Costo del proyecto | 82 |
| 3.10 | Análisis de resultados | 82 |

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 4..... | 85 |
| 4. Conclusiones Y RECOMENDACIONES..... | 85 |
| 4.1 Conclusiones..... | 85 |
| 4.2 Recomendaciones..... | 87 |
| BIBLIOGRAFÍA | |
| APÉNDICES | |

ABREVIATURAS

| | |
|-------|--|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CADD | Computer-Aided Design and Drafting |
| FEA | Finite Element Analysis |
| STL | STereoLithography |
| SI | Sistema Internacional de unidades |
| RAM | Random Access Memory |
| PLA | PolyLactic Acid |
| USD | United States dollar |
| 3D | Tres Dimensiones |
| ISO | Internacional Organization for Standardization |
| FDM | Fused Deposition Modeling |
| CAM | Computer-Aided Manufacturing |
| CAE | Computer Aided Engineering |
| PCB | Printed Circuit Boards |

SIMBOLOGÍA

| | |
|-----------------|----------------------------|
| Su | Sin unidades |
| Kg | Kilogramo |
| g | Gramo |
| mg | Miligramo |
| mm | Milímetro |
| mm ² | Milímetro cuadrado |
| mm ³ | Milímetro cúbico |
| in | Pulgada |
| in ² | Pulgada cuadrada |
| in ³ | Pulgada cúbica |
| Pa | Pascales |
| MPa | Megapascales |
| Gpa | Gigapascales |
| lb | Libra |
| W | Watt |
| Btu | Libra por pulgada cuadrada |
| J | Joule |
| K | Kelvin |
| °C | Grado Celsius |
| °F | Grado Fahrenheit |
| R | Ranking |
| GB | GygaBite |
| Hz | Hertz |
| GHz | Gigahertz |
| s | Segundo |
| h | Hora |
| \$ | United States dollar |
| BTU | British Thermal Unit |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Proceso de impresión 3D | 5 |
| Figura 1.2 Impresora 3D de modelado por deposición fundida | 6 |
| Figura 1.3 Demostración de los porcentajes de relleno que puede tener una pieza impresa | 8 |
| Figura 1.4 Diagrama esfuerzo-deformación | 10 |
| Figura 2.1 Flujograma de trabajo..... | 13 |
| Figura 2.2 Esquema de probeta utilizada para ensayos de tracción según la norma ISO 527 | 20 |
| Figura 3.1 Mapa de distribución de esfuerzos de Von Misses en probeta ISO 527 con patrón de relleno Honeycomb..... | 28 |
| Figura 3.2 Vista tridimensional de probeta para ensayos de tensión según norma ISO 527 | 29 |
| Figura 3.3 Vista tridimensional de probetas para ensayos de compresión (a) para determinar el módulo de compresión y (b) para determinar la resistencia a la compresión | 29 |
| Figura 3.4 Interior de probeta con patrón de relleno Concéntrico..... | 30 |
| Figura 3.5 Interior de probeta con patrón de relleno Curva de Hilbert..... | 30 |
| Figura 3.6 Interior de probeta con patrón de relleno Honeycomb..... | 30 |
| Figura 3.7 Interior de probeta con patrón de relleno Rectilíneo..... | 30 |
| Figura 3.8 Interior de probeta con patrón de relleno Wiggle..... | 30 |
| Figura 3.9 Interior de probeta con patrón de relleno Triangular..... | 31 |
| Figura 3.10 Interior de probeta con patrón de relleno Grid..... | 31 |
| Figura 3.11 Interior de probeta con patrón de relleno Octagrama Espiral | 31 |
| Figura 3.12 Interior de probeta con patrón de relleno Giroide | 31 |
| Figura 3.13 Interior de probeta con patrón de relleno Modelo Espol | 31 |
| Figura 3.14 Interior de probeta con patrón de relleno Concéntrico..... | 32 |
| Figura 3.15 Interior de probeta con patrón de relleno Curva de Hilbert..... | 32 |
| Figura 3.16 Interior de probeta con patrón de relleno Honeycomb..... | 32 |
| Figura 3.17 Interior de probeta con patrón de relleno Rectilíneo..... | 32 |
| Figura 3.18 Interior de probeta con patrón de relleno Wiggle..... | 33 |
| Figura 3.19 Interior de probeta con patrón de relleno Triangular..... | 33 |
| Figura 3.20 Interior de probeta con patrón de relleno Grid..... | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.21 Interior de probeta con patrón de relleno Octagrama Espiral | 33 |
| Figura 3.22 Interior de probeta con patrón de relleno Giroide | 34 |
| Figura 3.23 Interior de probeta con patrón de relleno Modelo Espol | 34 |
| Figura 3.24 Interior de probetas con patrón de relleno (a)Concéntrico (b)Curva de Hilbert (c)Honeycomb (d)Rectilíneo (e)Wiggle (f)triangular (g)Grid (h)Octagrama espiral (i)Giroide (j) Modelo Espol | 36 |
| Figura 3.25 Animación de magnitudes de cargas aplicadas en ensayos de tensión y compresión | 40 |
| Figura 3.26 Mapa de tensiones de Von Misses para probetas ISO 527 | 75 |
| Figura 3.27 Mapa de tensiones de Von Misses para probetas ISO 604 | 75 |
| Figura 3.28 Mapa de tensiones de Von Misses para probetas ISO 604 | 76 |
| Figura 3.29 Índices de resistencia calculados para a) tensión y b) compresión | 77 |
| Figura 3.30 a) Módulo de elasticidad y b) Módulo de compresión calculados | 78 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1 Propiedades del PLA en sus valores unitarios métricos e imperiales | 9 |
| Tabla 2.1 Requerimientos del desarrollo del proyecto..... | 14 |
| Tabla 2.2 Ponderación de los factores de influencia para la matriz de decisión..... | 16 |
| Tabla 2.3 Descripción detallada de las alternativas de desarrollo del proyecto | 16 |
| Tabla 2.4 Matriz de decisión de las alternativas propuestas | 17 |
| Tabla 2.5 Dimensión de probetas para ensayos de compresión según la norma ISO 604 | 18 |
| Tabla 2.6 Dimensión de probetas para ensayos de compresión según la norma ISO 604 | 18 |
| Tabla 2.7 Dimensión de probetas utilizadas para ensayos de tracción según la norma ISO 527 | 20 |
| Tabla 2.8 Códigos de patrones de relleno seleccionados para estudio..... | 22 |
| Tabla 2.9 Modelos matemáticos para dimensionamiento de patrones..... | 24 |
| Tabla 2.10 Propiedades físicas del PLA..... | 27 |
| Tabla 3.1 Volúmenes resultantes al 20% de relleno con una tolerancia de $\pm 0.25\%$ | 38 |
| Tabla 3.2 Parámetros de malla insertado en el software de simulación Inventor Nastran | 40 |
| Tabla 3.3 Resumen de resultados del patrón HoneyComb ISO 527 | 42 |
| Tabla 3.4 Resumen de resultados del patrón HoneyComb ISO 604 | 43 |
| Tabla 3.5 Resumen de resultados del patrón HoneyComb ISO 604 | 44 |
| Tabla 3.6 Resumen de resultados del patrón Grid ISO 527 | 45 |
| Tabla 3.7 Resumen de resultados del patrón Grid ISO 604 | 46 |
| Tabla 3.8 Resumen de resultados del patrón Grid ISO 604 | 47 |
| Tabla 3.9 Resumen de resultados del patrón Octagram spiral ISO 527 | 48 |
| Tabla 3.10 Resumen de resultados del patrón Octagram spiral ISO 604 | 49 |
| Tabla 3.11 Resumen de resultados del patrón Octagram spiral ISO 604 | 50 |
| Tabla 3.12 Resumen de resultados del patrón Triangular ISO 527 | 51 |
| Tabla 3.13 Resumen de resultados del patrón Triangular ISO 604 | 52 |
| Tabla 3.14 Resumen de resultados del patrón Triangular ISO 604 | 53 |
| Tabla 3.15 Resumen de resultados del patrón Rectilíneo ISO 527 | 54 |
| Tabla 3.16 Resumen de resultados del patrón Rectilíneo ISO 604 | 55 |

| | |
|--|----|
| Tabla 3.17 Resumen de resultados del patrón Rectilíneo ISO 604 | 56 |
| Tabla 3.18 Resumen de resultados del patrón Wiggle ISO 527 | 57 |
| Tabla 3.19 Resumen de resultados del patrón Wiggle ISO 604 | 58 |
| Tabla 3.20 Resumen de resultados del patrón Wiggle ISO 604 | 59 |
| Tabla 3.21 Resumen de resultados del patrón Curva de Hilbert ISO 527 | 60 |
| Tabla 3.22 Resumen de resultados del patrón Curva de Hilbert ISO 604 | 61 |
| Tabla 3.23 Resumen de resultados del patrón Curva de Hilbert ISO 604 | 62 |
| Tabla 3.24 Resumen de resultados del patrón Giroide ISO 527 | 63 |
| Tabla 3.25 Resumen de resultados del patrón Giroide ISO 604 | 64 |
| Tabla 3.26 Resumen de resultados del patrón Giroide ISO 604 | 65 |
| Tabla 3.27 Resumen de resultados del patrón Concentrico ISO 527 | 66 |
| Tabla 3.28 Resumen de resultados del patrón Concéntrico ISO 604 | 67 |
| Tabla 3.29 Resumen de resultados del patrón Concéntrico ISO 604 | 68 |
| Tabla 3.30 Resumen de resultados del patrón Modelo Espol ISO 527 | 69 |
| Tabla 3.31 Resumen de resultados del patrón Modelo Espol ISO 604 | 70 |
| Tabla 3.32 Resumen de resultados del patrón Modelo Espol ISO 604 | 71 |
| Tabla 3.33 Resumen de resultados de ensayo de tensión para cada probeta. | 72 |
| Tabla 3.34 Resumen de resultados de ensayo de compresión para cada probeta obtenidos a través de la probeta larga. | 73 |
| Tabla 3.35 Resumen de resultados de ensayo de compresión obtenidos a través de la probeta corta. | 74 |
| Tabla 3.36 Comparación de tiempos de impresión y longitud de filamento empleado de probetas ISO 604 | 78 |
| Tabla 3.37 Resumen de costos de activos tangibles del proyecto | 80 |
| Tabla 3.38 Resumen de costos de activos intangibles del proyecto | 81 |
| Tabla 3.39 Resumen de costos de mano de obra | 82 |
| Tabla 3.40 Costo total del proyecto | 82 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Problema

En los últimos años el crecimiento de la industria de la impresión tridimensional (3D) ha sido exponencial y se ha extendido a través de muchos de los campos de ingeniería, lo que ha hecho de esta tecnología una potencial herramienta cada vez más accesible (G. & R., 2014), sin embargo, los tiempos de impresión, siguen representando un limitante al momento de realizar manufactura a gran escala. Con el objetivo de reducirlos y optimizar costos, algunos procesos de impresión 3D realizados a partir de técnicas como extrusión, generan sólidos huecos a través de superficies geométricas, no obstante, estos presentan algunas debilidades como poca resistencia o, en algunos casos, se vuelve imposible imprimirlos sin un soporte interior debido a sus geometrías y a la naturaleza de esta técnica. (3Dnatives, 2022)

En ciertos casos, el interior hueco del objeto impreso es rellenado con distintos patrones denominados “infill” para proveer ciertos beneficios como rigidez al sólido resultante, mayor estabilidad, o mejor estética. (Blanco, 2019)

Sin embargo, actualmente se encuentran disponibles una gran cantidad de patrones de relleno que permiten generar una estructura interior en la pieza manufacturada, relleno con material desde valores por encima del 0% hasta cercanos al 100% del volumen interior de cada elemento. Cada uno de estos patrones posee características estructurales distintas. (Goldschmidt, 2021)

Este proyecto propone simular distintos patrones de relleno representativos, incluyendo uno propuesto, y compararlos entre sí para clasificarlos de acuerdo con la resistencia mecánica que aportan al objeto o pieza impreso en 3D, usando técnicas de análisis de elementos finitos y dibujo asistido por computadora para simular ensayos de tensión y compresión en probetas diseñadas a partir de estándares internacionales para experimentos de este tipo. Esto permitirá definir una posible guía en la selección del patrón más adecuado para cada aplicación del diseño, dado que es un tema muy poco

explorado hasta la actualidad por lo que no existe mucha información al respecto.

El **impacto social** del presente trabajo radica en la promoción de la cultura de impresión 3D dentro del contexto en el que se desarrolla que generan los resultados obtenidos, puesto que en la actualidad, es una herramienta aun escasamente aplicada en la industria manufacturera del país, a pesar de superar ventajosamente algunos aspectos de otras técnicas de manufactura populares, entre estos, el **económico**, por cuanto las propiedades resultantes permitirán seleccionar con mayor precisión el patrón propio para satisfacer las necesidades del diseño, optimizando tiempo y materiales de impresión que se traducen en costos al momento de la fabricación. Consecuentemente, impactará positivamente en el **aspecto ambiental** debido al ahorro antes mencionado.

El presente proyecto no tiene implicaciones en las áreas de **seguridad y bienestar, aspecto cultural y salud pública** pues es netamente de aporte técnico y científico a la industria manufacturera, de investigación y educación. Este proyecto, de ser validado a través de otros métodos, ofrece resultados de impacto **global** puesto que proporciona una herramienta para optimizar una práctica mundialmente utilizada en manufactura aditiva, la impresión 3D, a través de la comparación de propiedades mecánicas y físicas de los patrones de relleno comúnmente utilizados incluyendo un nuevo patrón propuesto, permitiendo al diseñador seleccionar efectivamente el patrón que se ajuste a sus prioridades.

1.2 Justificación del proyecto

A menudo, la impresión 3D se emplea para generar piezas que se podrían obtener a partir de otras técnicas de fabricación en las que, a pesar de generar el mismo resultado exterior del objeto, el resultado interior puede ser completamente diferente.

Una importante ventaja de la impresión 3D es que las piezas pueden presentar distinto porcentaje de relleno interior, a diferencia de piezas obtenidas a partir de manufactura sustractiva. Desde el punto de vista de la producción en masa, esto reduce el material, los costes, el tiempo de fabricación y el peso del producto final.

Sin embargo, actualmente se encuentran disponibles una gran cantidad de patrones de relleno que permiten generar una estructura interior en la pieza manufacturada, relleno con material desde valores por encima del 0% hasta cercanos al 100% del volumen interior de cada elemento. Cada uno de estos patrones posee características estructurales distintas. (Goldschmidt, 2021)

El desarrollo de este proyecto permitirá conocer las propiedades mecánicas y físicas que aporta determinado patrón de relleno en el diseño de un elemento de impresión 3D, de tal forma que se ofrezca al diseñador una herramienta útil para seleccionar el patrón de relleno adecuado en función de los requerimientos y restricciones de este.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Comparar diez tipos de patrones de relleno de impresión 3D convencionales, incluyendo dentro de ellos un nuevo patrón propuesto, mediante simulación computarizada de ensayos efectuados en probetas diseñadas a través de dibujo asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés), para analizar su comportamiento frente a cargas unidireccionales tanto en tensión como en compresión y determinar así sus propiedades mecánicas y físicas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las probetas conforme a los ensayos de tensión y compresión estandarizados.
- Caracterizar las probetas para impresión 3D con los diferentes patrones al 20% de relleno, incluyendo el patrón propuesto.
- Diseñar probetas adecuadas para impresión 3D utilizando un software de dibujo computarizado (CAD).
- Simular los ensayos de tensión y compresión con una herramienta de análisis de elementos finitos (FEA).
- Comparar las propiedades mecánicas resultantes de los patrones de relleno.
- Mostrar los hallazgos obtenidos de manera gráfica.

- Proporcionar una guía para la selección del patrón de relleno en función de las características mecánicas y físicas requeridas por el diseñador de piezas fabricadas a partir de impresión 3D.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Marco Legal

Se hace uso de las siguientes normas vigentes para ensayos con materiales plásticos que se tomarán en cuenta al momento de elaborar las probetas que serán ensayadas:

- ISO 527-2:2012 e ISO 527-1:2012 en la cual se detallan las condiciones y detalles necesarios para realizar ensayos de tracción para moldeo y extrusión en plásticos, el tamaño de las probetas, sus correspondientes medidas y demás datos necesarios para realizar en ensayo se redactan en el capítulo 2 de metodología (Internacional Organization for Standardization, ISO, 2012). La norma facilita ecuaciones para obtener de manera cuantitativa valores de módulo de tensión y resistencia a la tensión de las probetas sometidas al análisis.
- ISO 604-2002 en la cual se detallan condiciones las condiciones y detalles necesarios para realizar ensayos de compresión en plásticos. El tamaño de las probetas, sus correspondientes medidas y demás datos necesarios para realizar en ensayo se redactan en el capítulo 2 de metodología La norma facilita de ecuaciones necesarias para obtener propiedades mecánicas de las probetas ensayadas que permiten conocer el módulo de compresión y la resistencia a la compresión. (Internacional Organization for Standardization, ISO, 2002)

1.4.2 Manufactura Aditiva (AM)

La Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM) define a la Manufactura Aditiva (AM) como un proceso ingenieril en el cual un material, el cual puede ser hierro o plástico se funde para producir objetos partiendo de datos obtenidos de modelos 3D producidos por softwares de diseño asistido (CAD) o mediante escaneo el escaneo de una pieza u objeto, por

lo general capa sobre capa, lo que le diferencia de la metodología de manufactura sustractiva. (Kareem & Prawin, 2022)

1.4.3 Proceso de impresión 3D

El proceso de impresión está definido por varios pasos a cumplir para lograr tener un producto impreso similar al diseñado mediante un software CAD. A continuación, se muestran en la Figura 1.1 los pasos a seguir para realizarlo.

Descripción y planteamiento del problema

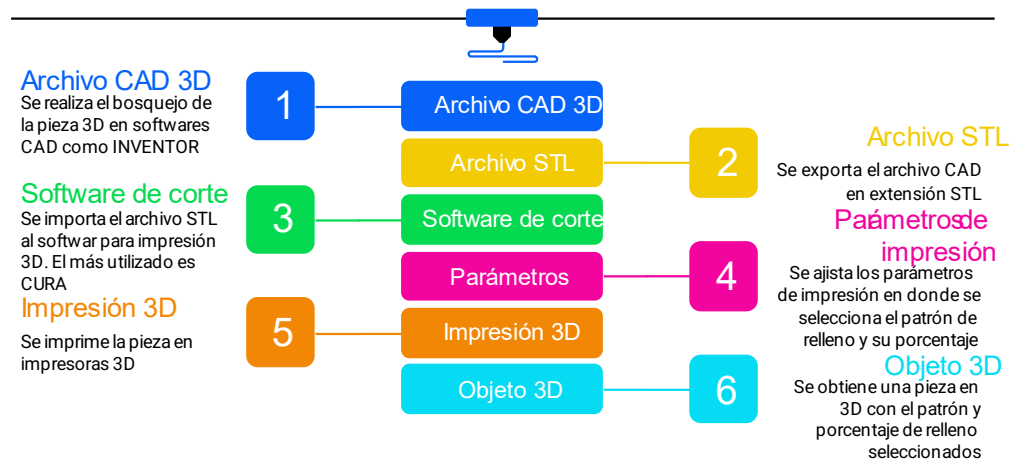


Figura 1.1 Proceso de impresión 3D
[Elaboración propia]

1.4.4 Modelado por deposición fundida (FDM)

Más conocido como modelado por deposición fundida o tecnología FDM consiste en el depósito de material fundido sobre una superficie plana que está en constante movimiento. “Este modelado tiene un sistema de arrastre que permite al momento que el material ingrese con un flujo, no sea interrumpido la deposición capa a capa” (Pacheco Carpio , 2019).

De acuerdo a Beyerlein , Sophian ; Aboushama, Mostafa “La tecnología FDM sigue siendo vulnerable cuando se trata de sus propiedades mecánicas. Reforzar los polímeros parece ser una solución factible cuando se trata de mejorar sus propiedades” (Beyerlein , Sophian ; Aboushama, Mostafa, 2020) (pág. 9).

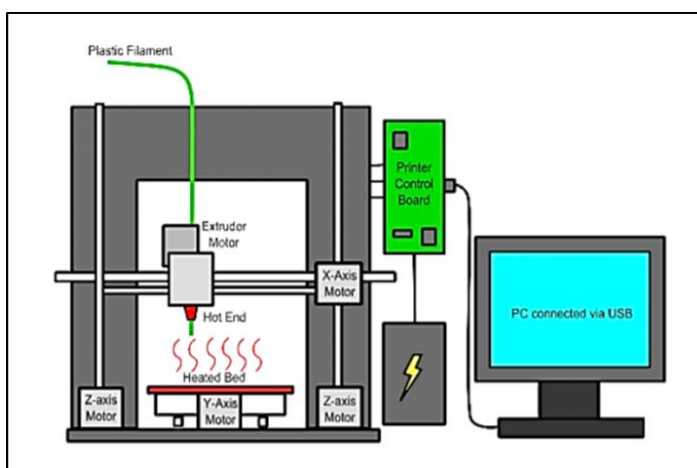
Mejorar las características de la resistencia mecánica por otro lado conduciría a resultados no deseados. Las propiedades mecánicas se ven afectadas por varios factores relacionados con el proceso de parámetros.

“En un experimento que se realizó en ABS (P400), se investigó el efecto de los parámetros el proceso de impresión sobre el comportamiento mecánico de piezas FDM; la orientación de la impresión, la temperatura de impresión, el ángulo de trama, etc, todo esto influye en la mecánica de propiedades de la pieza de prototipo rápido” (Beyerlein , Sophian ; Aboushama, Mostafa, 2020).

En la actualidad varios fabricantes le dieron atención a las impresiones 3D en fibras continuas.

En este proceso se deposita el material por capas para realizar la pieza. El material usado en este modelado viene en forma de rollos, este se introduce a un proceso de extrusión que es fundido por un calefactor.

El cabezal extrusor puede generar 3 movimientos “x”, “y”, “z”. El movimiento en el eje “y” es generado por la base calefactora donde se depositan los materiales “x” y “z”



**Figura 1.2 Impresora 3D de modelado por deposición fundida
[Pacheco Carpio , 2019]**

“La ventaja de esta tecnología se debe a que está al alcance de cualquier persona, no necesita mucho espacio y requiere de una baja potencia. Su

instalación puede ser realizada en ambientes no industriales” (Pacheco Carpio , 2019, págs. 24-25).

1.4.5 Parámetros de impresión

1.4.5.1 Espesor de capa

El espesor de capa corresponde al grosor de cada capa de filamentos que deposita la boquilla extrusora y está relacionado con el diámetro de la boquilla de la impresora 3D. Este parámetro define la resolución del eje Z además del número de capas que compone a la pieza impresa, el acabado que tendrá el objeto y sus propiedades mecánicas; cuanto mayor sea la altura da cada capa, menor calidad tendrá la pieza, y menor será el tiempo de impresión.

Este parámetro debe estar relacionado con el diámetro de la boquilla, si la altura de la capa es menor que el 50% o 60%, la calidad de la pieza se verá afectada. Con una capa de 0.3 mm se encuentran las mejores propiedades mecánicas para impresión (Cervera Ruiz & Blanco Díaz , 2002).

1.4.5.2 Densidad de relleno

Es la cantidad de material colocado en estructura impresa, no considera la porción de vacío. La densidad del relleno es muy importante para la resistencia de este, así también como la estructura y el peso de la impresión.

“La densidad de relleno se expresa en decimales, 0.1 para un 10% de relleno y 0.9 para un 90%. De cualquier manera, se puede configurar al 0% para realizar piezas huecas y al 100% para obtener piezas rellenas. Cuanto mayor porcentaje sea el relleno, mayor será la cantidad de impresión y el tiempo” (Rodríguez , 2017)

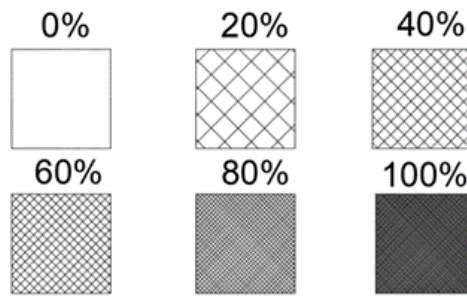


Figura 1.3 Demostración de los porcentajes de relleno que puede tener una pieza impresa [Pacheco Carpio , 2019]

1.4.5.2 Patrón de relleno

De acuerdo con 3D natives se entiende como patrón de relleno a la estructura interna que debe tener una pieza impresa en todas sus capas, a excepción de la superior e inferior. Estos patrones pueden ser de tipo rectilíneo, panel de abeja, concéntrico, triangular, rectangular, etc. Tienen la finalidad de adaptarse a la pieza que se va a imprimir” (3Dnatives, 2022).

Otro parámetro, es el porcentaje del relleno que se va a incluir en el interior, para ello, existen diferentes tipos de estructuras o geometrías disponibles de los cuales se ha seleccionado nueve patrones representativos para analizar en este documento con un porcentaje de relleno del 20%, valor seleccionado aleatoriamente de entre los porcentajes más representativos en la impresión 3D.

En el documento se analiza las propiedades mecánicas que brinda cada uno de los patrones de relleno, esto permitirá que lector pueda seleccionar el tipo de patrón de relleno que más se adecue al uso para el que está destinada su impresión 3D.

El porcentaje de relleno es calculado por medio de métodos iterativos en el caso de patrones con geometrías complejas y a través de modelos matemáticos en geometrías simples, usando como punto de partida una aproximación al área superficial ocupada por cada uno de los patrones individuales. Un ejemplo detallado del cálculo se muestra en el Capítulo 2.

1.4.5.3 PLA

El PLA (ácido poli láctico) es un biopropileno termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Puede obtenerse por dos vías: de manera química o mediante biotecnología. Es utilizado en la industria de manufactura aditivo porque ofrece numerosas propiedades tanto físicas como mecánicas, principalmente destaca su biocompatibilidad, que le permite ser utilizado en implantes o prótesis humanas. (Serna & Albán , 2011)

Tabla 1.1 Propiedades del PLA en sus valores unitarios métricos e imperiales [Serna & Albán , 2011] [Suteja & Soesanti, 2019]

| Propiedades | Valor – unidad (métrica) | Valor – unidad (imperial) |
|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Conductividad térmica | 0.13 W/ (m*K) | 1.73871E-06 Btu/ in-sec-F |
| Calor específico | 1200 J/Kg-oC | 0.286615 Btu/lb-F |
| Coefficiente de expansión térmica | 41 x 10 – 6 m/m-K | 1/F 23x10-6 in/inR |
| Comportamiento | Isotrópico | Isotrópico |
| Modelo de Young | 3.45 Gpa | 500380.2 psi |
| Coefficiente de poisson | 0.39 | 0.39 |
| Módulo de corte | 2.4 Gpa | 348091 psi |
| Densidad | 1.24 g/cc | 0.04479784 lb/in3 |
| Módulo elástico | 66 MPa | 9572.49 psi |
| Resistencia a tracción | 3027 MPa | 439029.2 psi |
| Fuerza compresiva | 93.8 MPa | 13600 psi |

1.4.6 Propiedades mecánicas

Resistencia mecánica

Corresponde al valor del esfuerzo máximo al que ocurre la ruptura que caracteriza la resistencia del material, pues indica la magnitud de la fuerza máxima que puede ser aplicada sobre un área definida de material sin que ocurra la ruptura. Por ejemplo, en el caso de la resistencia a la tracción también conocido como resistencia a rotura, es un valor característico para evaluar el comportamiento de resistencia. Se define como es esfuerzo de tracción mecánico máximo (Cervera Ruiz & Blanco Díaz , 2002).

La resistencia a la tracción se determina mediante el ensayo de tracción para materiales mecánicos con la norma ISO 527 para plásticos y composites, mientras que la resistencia a la compresión puede ser determinado a través de la norma ISO 604.

Módulo de elasticidad

Se lo define como la pendiente de la recta que se presenta al inicio de una curva esfuerzo-deformación en su zona elástica. Parámetro ampliamente usado en la Ingeniería y que relaciona la rigidez de un material cuando es sometido a cargas de tensión, se entiende que mientras su módulo de elasticidad sea mayor, tanto en tensión como en compresión, el objeto de análisis será más rígido. (Smith , 2006)

1.4.7 Curvas esfuerzo-deformación

Tomando en cuenta los elementos estructurales es necesario determinar su rigidez y resistencia, sus propiedades se pueden evaluar de muchas formas siendo la más común el uso de una barra la que es sometida a una presión axial para así registrar la fuerza que se aplicó y el alargamiento producido, estos valores al ser graficados para un análisis forman los conocidos diagramas de deformación y esfuerzo (Pacheco Carpio , 2019). Los diagramas son parecidos si hablamos del mismo material, aunque de manera general ha de permitir la agrupación de materiales en dos categorías con sus respectivas propiedades para denominarlos en materiales dúctiles o materiales frágiles.

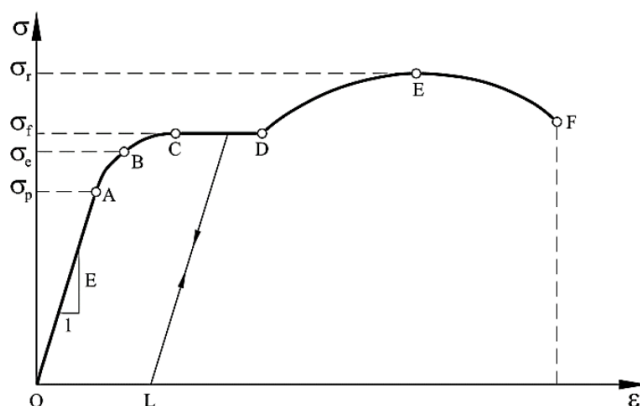


Figura 1.4 Diagrama esfuerzo-deformación
[Cervera Ruiz & Blanco Díaz , 2002]

1.4.8 Criterio de Von Mises

El criterio de Von Mises conocido también como el criterio de la máxima energía de distorsión, es un criterio que permite identificar la resistencia estática, es decir el material no cederá en determinado punto siempre y cuando la energía de distorsión por unidad de volumen en el punto no supere la energía de distorsión por unidad de volumen determinado (Smith , 2006). El criterio puede expresarse mediante la ecuación 1.1.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - (\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx}) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1.1)$$

1.4.9 Índice de resistencia mecánica para patrones de relleno ensayados

Debido a limitantes del experimento, no es posible simular con exactitud la ruptura de las probetas en su esfuerzo máximo de tensión o compresión, por lo tanto, este proyecto define un índice de resistencia mecánica para los patrones de relleno ensayados, evaluando y comparando el esfuerzo máximo al que llegan los especímenes cuando se les aplica un esfuerzo que se encuentra dentro de la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación del PLA. Una mayor descripción del modelo matemático propuesto para determinar este índice se presenta en la sección de metodología en el capítulo 2.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos planteados, considerando las herramientas disponibles para el desarrollo de este estudio, se desarrolló la metodología descrita en esta sección. En la Figura 2.1 se muestra el flujograma de trabajo utilizado inicialmente para establecer las actividades que se desarrollarían para alcanzar los resultados esperados.

2.1 Delimitación de la necesidad identificada

La información disponible sobre el comportamiento de los diferentes patrones de relleno existentes hasta la actualidad, utilizados en impresión 3D, es insuficiente y en su mayoría no se encuentra respaldada ni verificada por organismos científicos de prestigio. Además, la mayoría de estos estudios sólo consideran patrones de uso frecuente ignorando patrones más elaborados.

Se requiere desarrollar un experimento para evaluar y comparar las características de los patrones de relleno existentes en dos y tres dimensiones cumpliendo los estándares internacionales vigentes a la fecha para ensayos de materiales plásticos de impresión 3D por extrusión.

2.2 Diseño del experimento

2.2.1 Determinar los objetivos del experimento

Caracterización mecánica de piezas impresas en tres dimensiones con 10 distintos patrones de relleno con el 20% de porcentaje de relleno.

- Levantar los sólidos de los 10 patrones de relleno que serán ensayados.
- Diseñar las probetas para el ensayo.
- Desarrollar el ensayo.
- Medir parámetros de resistencia mecánica (resistencia a la tensión, resistencia a la compresión, módulos de elasticidad y compresión).
- Tabular y sintetizar resultados de todos los patrones.
- Comparar resultados entre todos los patrones y generar conclusiones.

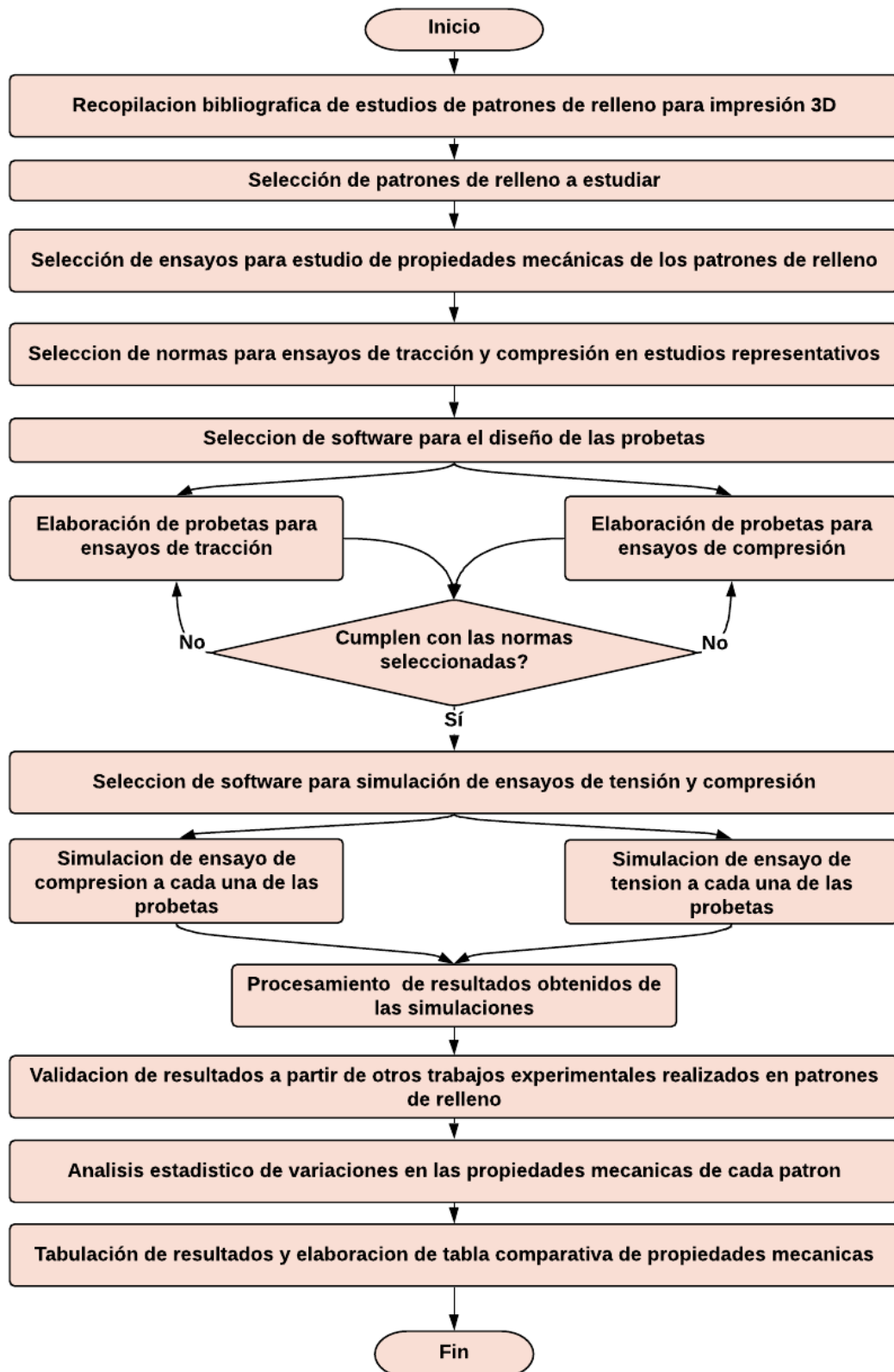


Figura 2.1 Flujograma de trabajo
[Elaboración propia]

2.2.2 Categorizar los requerimientos en grupos

Costo de experimento:

Los materiales o equipos (incluyendo hardware y software) destinados al desarrollo del ensayo, procesamiento y presentación de resultados deben ser de libre acceso para los estudiantes.

El costo del experimento no debería superar los \$40.

Desarrollo de experimento:

El tiempo de desarrollo del ensayo no debe superar los 40 días laborables.

El desarrollo del experimento debe optimizar los recursos generando más resultados con la menor cantidad de recursos posibles.

Metodología del experimento:

El diseño de las probetas debe realizarse acorde a normas internacionales.

El desarrollo del ensayo debe cumplir al menos 1 estándar internacionales

Calidad de los resultados:

Los resultados deben ser verificables a través de otro experimento.

Los resultados deben ser escalables a todo tipo de impresiones realizadas bajo los mismos parámetros de relleno, porcentaje de relleno y material de impresión.

Los resultados deben ser validados con experimentos ya realizados.

2.2.3 Jerarquización de los requerimientos

Tabla 2.1 Requerimientos del desarrollo del proyecto

[Elaboración propia]

| ORDEN JERÁRQUICO | ESPECIFICACIÓN | CUALIDAD |
|---------------------|---|---------------|
| 1 | Los resultados deben ser escalables a todo tipo de impresiones realizadas bajo los mismos parámetros de relleno, porcentaje de relleno y material de impresión. | Escalabilidad |

| | | |
|---|---|-------------------|
| 2 | Los resultados deben ser verificables a través de otro experimento. | Verificabilidad |
| 3 | El desarrollo del ensayo debe cumplir al menos 1 estándar internacional | Internacionalidad |
| 4 | El diseño de las probetas debe realizarse acorde a normas internacionales. | Estandarización |
| 5 | El desarrollo del experimento debe optimizar los recursos generando más resultados con la menor cantidad de recursos posibles. | Eficiencia |
| 6 | El tiempo de desarrollo del ensayo no debe superar los 40 días laborables. | Eficacia |
| 7 | El costo del experimento no debería superar los \$40. | Costo |
| 8 | Los resultados deben poder ser validados con experimentos ya realizados. | Confiabilidad |
| 9 | Los materiales o equipos (incluyendo hardware y software) destinados al desarrollo del ensayo, procesamiento y presentación de resultados deben ser de libre acceso para los estudiantes. | Accesibilidad |

2.2.4 Casa de la calidad

Escala de puntuación

- 1 Negativamente influyente
- 3 No influyente
- 5 Positivamente influyente

**Tabla 2.2 Ponderación de los factores de influencia para la matriz de decisión
[Elaboración propia]**

| Factores de influencia | Escalabilidad | Verificabilidad | Internacionalidad | Estandarización | Eficiencia | Eficacia | Costo | Confiabilidad | Accesibilidad | Total | Peso | Ponderación |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------|-----------------|--------------|----------------------|----------------------|--------------|-------------|--------------------|
| Escalabilidad | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 5 | 1 | 27 | 0.11 | 11% |
| Verificabilidad | 3 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 1 | 3 | 1 | 29 | 0.12 | 12% |
| Internacionalidad | 3 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1 | 3 | 5 | 1 | 29 | 0.12 | 12% |
| Estandarización | 3 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 1 | 5 | 1 | 31 | 0.13 | 13% |
| Eficiencia | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1 | 27 | 0.11 | 11% |
| Eficacia | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1 | 27 | 0.11 | 11% |
| Costo | 1 | 1 | 3 | 1 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 29 | 0.12 | 12% |
| Confiabilidad | 5 | 3 | 5 | 5 | 1 | 1 | 3 | 5 | 1 | 29 | 0.12 | 12% |
| Accesibilidad | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 1 | 5 | 17 | 0.07 | 7% |
| Total | 27 | 29 | 29 | 31 | 27 | 27 | 29 | 29 | 17 | 245 | 1.00 | 100% |

2.2.5 Descripción de las alternativas

**Tabla 2.3 Descripción detallada de las alternativas de desarrollo del proyecto
[Elaboración propia]**

| | |
|----------------------|---|
| Alternativa 1 | Ensayo por simulación |
| | Evaluar y comparar las características de los patrones de relleno existentes en dos y tres dimensiones a través de la simulación de ensayos de propiedades mecánicas en probetas, que simulan las piezas impresas en 3D, dibujadas a partir de softwares de diseño asistido por computadora dimensionadas a partir de normas provistas por organismos internacionales reguladores como International Organization for Standardization (ISO) o American Society of Mechanical Engineers (ASME). Estas normas también proveyeron los parámetros de la simulación que caracterizaron los ensayos de tensión y compresión de las probetas dibujadas empleando software de elementos finitos para cálculo estructural. |
| Alternativa 2 | Ensayo por experimentación |
| | Evaluar y comparar las características de los patrones de relleno existentes en dos y tres dimensiones a través de ensayos experimentales empleando probetas impresas en 3D dimensionadas |

| | |
|--|--|
| | a partir de normas provistas por organismos internacionales reguladores como International Organization for Standardization (ISO) o American Society of Mechanical Engineers (ASME). Las características como velocidad de aplicación de la carga, y magnitud de la carga aplicada en los ensayos de tensión y compresión también serán reguladas por dichas normas. Estos ensayos se realizarían en equipos especializados. |
|--|--|

2.2.6 Matriz de decisión

Escala de puntuación

- 1 No favorable
- 3 Medianamente favorable
- 5 Altamente favorable

2.2.7 Selección de las alternativas

Tabla 2.4 Matriz de decisión de las alternativas propuestas

[Elaboración propia]

| Criterio de selección | Peso | ALTERNATIVA 1 | | ALTERNATIVA 2 | |
|-----------------------|-------------|---------------|------|---------------|------|
| | | C | CP | C | CP |
| Escalabilidad | 11.02% | 5 | 0.55 | 5 | 0.55 |
| Verificabilidad | 11.84% | 1 | 0.12 | 5 | 0.59 |
| Internacionalidad | 11.84% | 5 | 0.59 | 5 | 0.59 |
| Estandarización | 12.65% | 5 | 0.63 | 5 | 0.63 |
| Eficiencia | 11.02% | 5 | 0.55 | 1 | 0.11 |
| Eficacia | 11.02% | 5 | 0.55 | 3 | 0.33 |
| Costo | 11.84% | 5 | 0.59 | 1 | 0.12 |
| Confiabilidad | 11.84% | 1 | 0.12 | 5 | 0.59 |
| Accesibilidad | 6.94% | 5 | 0.35 | 1 | 0.07 |
| TOTAL | 100% | 4.05 | | 3.59 | |

C: Calificación, CP: Calificación ponderada

En función de la matriz de decisión mostrada en la Tabla 2.4, la alternativa seleccionada será la 1, el ensayo por simulación.

2.3 Caracterización de la simulación de ensayos

2.3.1 Ensayo de compresión: Diseño de probetas

Para el diseño de las probetas utilizadas en la simulación de los ensayos de compresión se siguió las recomendaciones de la norma ISO 604:2002. Las probetas utilizadas en las simulaciones tenían forma prismática con las medidas detalladas a continuación

Tabla 2.5 Dimensión de probetas para ensayos de compresión según la norma ISO 604 [Internacional Organization for Standardization, ISO, 2002]

| Simbología | Descripción | Medidas en milímetros |
|------------|-------------|-----------------------|
| l | Longitud | 50 ± 2 |
| b | Ancho | 10 ± 2 |
| h | Espesor | 4 ± 2 |

Tabla 2.6 Dimensión de probetas para ensayos de compresión según la norma ISO 604 [Internacional Organization for Standardization, ISO, 2002]

| Simbología | Descripción | Medidas en milímetros |
|------------|-------------|-----------------------|
| l | Longitud | 10 ± 0.2 |
| b | Ancho | 10 ± 2 |
| h | Espesor | 4 ± 2 |

2.3.2 Determinación de propiedades de compresión: módulo de compresión

- Se aplicó la carga estática descrita en apartados posteriores.
- Se tomó los datos automáticos de la deformación y la fuerza.
- Se calculó el módulo de compresión a partir de la siguiente fórmula:

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

(2.1)

Dónde

E_c : es el módulo de compresión, expresado en megapascales [MPa];

σ_1 : el esfuerzo, en MPa, medida al valor de la deformación ε_1 ;

σ_2 : el esfuerzo, en MPa, medida al valor de la deformación ϵ_2 .

2.3.3 Determinación de propiedades de compresión: resistencia a la compresión

Para estimar un factor de comparación de la resistencia presentada por las probetas, se establece el índice de resistencia a la tensión y compresión, dicho índice se establece como un factor que indica la proporción en que se relacionan los esfuerzos de Von Misses máximos de cada patrón de relleno con el esfuerzo máximo general presentado entre todas las probetas, se obtiene a través de la siguiente ecuación.

$$\text{Índice de resistencia (Probeta } x) = \frac{\text{Esfuerzo de Von Misses Máximo General}}{\text{Esfuerzo de Von Misses Máximo (Probeta } X)} \quad (2.2)$$

2.3.4 Ensayo de tracción: Diseño de probetas

Para el diseño de las probetas utilizadas en la simulación de los ensayos de tracción se siguió las recomendaciones tanto de la norma ISO 527-1 como de la norma ISO 527-2:2014. Las probetas utilizadas en las simulaciones poseían las siguientes dimensiones estandarizadas según la norma mencionada anteriormente.

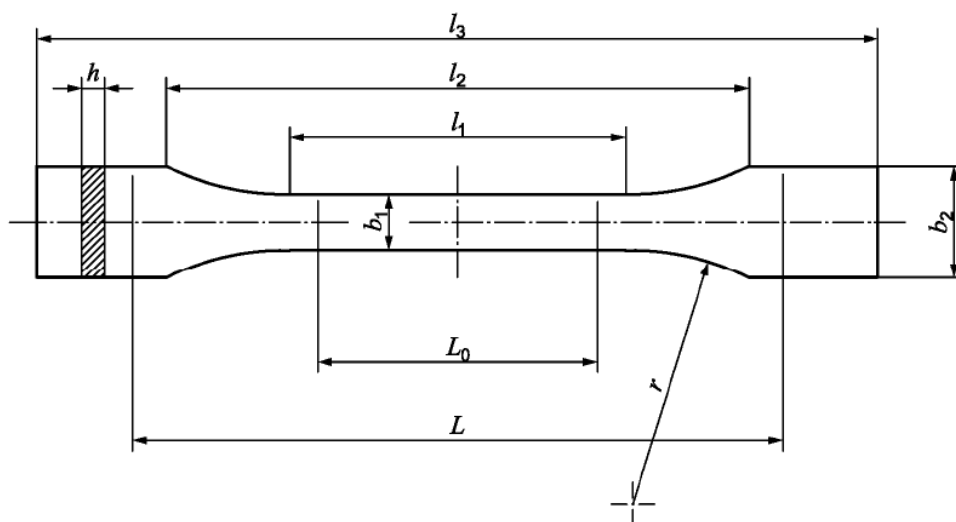


Figura 2.2 Esquema de probeta utilizada para ensayos de tracción según la norma ISO 527 [Internacional Organization for Standardization, ISO, 2012]

Tabla 2.7 Dimensión de probetas utilizadas para ensayos de tracción según la norma ISO 527 [Internacional Organization for Standardization, ISO, 2012]

| Simbología | Descripción | Medidas en milímetros |
|------------|--|-----------------------|
| l_3 | Longitud total | 170 |
| l_1 | Longitud de la parte estrecha de caras paralelas | 80 ± 2 |
| r | Radio | 24 ± 1 |
| l_2 | Distancia entre las partes anchas de caras paralelas | 109.3 ± 3.2 |
| b_2 | Anchura en los extremos | 20.0 ± 0.2 |
| b_1 | Anchura de la parte estrecha | 10.0 ± 0.2 |
| h | Espesor recomendado | 4.0 ± 0.2 |
| L_0 | Longitud de referencia (recomendada) | 75.0 ± 0.5 |
| L | Distancia inicial entre las mordazas | 115 ± 1 |

2.3.5 Determinación de propiedades de tracción: módulo de elasticidad

- Se aplicó la carga estática descrita en apartados posteriores.
- Se tomó los datos automáticos de la deformación y la fuerza.
- Se calculó el módulo de compresión a partir de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2.3)$$

E : es el módulo de compresión, expresado en megapascales [MPa];

σ_1 : el esfuerzo, en Mpa, medida al valor de la deformación ε_1 ;

σ_2 : el esfuerzo, en Mpa, medida al valor de la deformación ε_2 .

El diseño inicial de las probetas con su respectivo patrón de relleno, se lo realizó mediante FUSION 360, plataforma online de modelado 3D, CAD, CAM, CAE y PCB basada en la nube para el diseño y la fabricación de productos. Posteriormente, se empleó la herramienta Autodesk Inventor para realizar el trabajo definitivo fuera de la nube.

2.3.6 Determinación de propiedades de tensión: resistencia a la tensión

Para estimar un factor de comparación de la resistencia presentada por las probetas, se establece el índice de resistencia a la tensión y compresión, dicho índice se establece como un factor que indica la proporción en que se relacionan los esfuerzos de Von Misses máximos de cada patrón de relleno con el esfuerzo máximo general presentado entre todas las probetas, se obtiene a través de la siguiente ecuación.

$$\text{Índice de resistencia (Probeta } x) = \frac{\text{Esfuerzo de Von Misses Máximo General}}{\text{Esfuerzo de Von Misses Máximo (Probeta } X)} \quad (2.4)$$

2.4 Diseño detallado

2.4.1 Dimensionamiento de probetas de ensayo de compresión y tensión

El diseño de las probetas se lo realizó según el tipo de ensayo que se deseaba realizar. Para ensayos de tensión, las medidas de las probetas se basaron en la norma ISO 527

2.4.2 Selección de patrones de relleno

La selección de los patrones de relleno a ser estudiados realizó partiendo de la recopilación de las geometrías más usadas en relleno de impresiones, además se

incluyó el patrón propuesto en este estudio. La Tabla 2.8 muestra en detalle los modelos comparados y el código asignado a cada uno.

2.4.3 Diseño de los patrones de relleno en las probetas

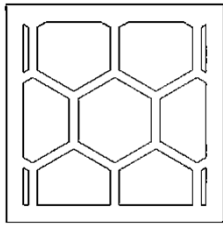
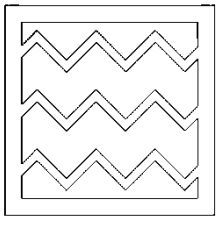
Se diseñó el patrón de relleno a cada probeta, en total 30 probetas, partiendo de un porcentaje de relleno del 20% y según el tipo de ensayo a realizar.

2.4.4 Determinación teórica de porcentaje de relleno por patrón

Con el objetivo de dimensionar correctamente el relleno de las probetas fue necesario definir una unidad de patrón individual para cada una de las geometrías que pueda indicar cuál es la razón de llenado de cada patrón con respecto a una unidad de área o volumen. Esta **unidad de patrón individual** está delimitada por el conjunto unitario que contiene la forma geométrica secuencialmente replicada en todas las direcciones del patrón de relleno. Una vez hallado este valor es posible obtener las dimensiones finales de los elementos que conformen el patrón y, a través de la razón de relleno, encontrar la cantidad de elementos o unidades de patrón individual que deben repetirse para cumplir con el porcentaje de relleno esperado.

Para este estudio, se consideró elaborar todas las probetas con un porcentaje de relleno del 20%. A continuación, se detalla el procedimiento aplicado para dimensionar las probetas en cada uno de los casos de patrones estudiados en base a este dato de entrada.

Tabla 2.8 Códigos de patrones de relleno seleccionados para estudio
[Elaboración propia]

| Código de patrón | Patrón | Código de patrón | Patrón |
|------------------|---|------------------|---|
| 1 | Honeycomb | 6 | Wiggle |
| |  | |  |
| 2 | Grid | 7 | Curva de Hilbert |

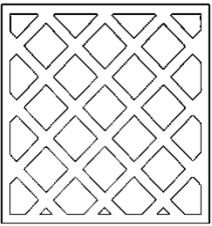
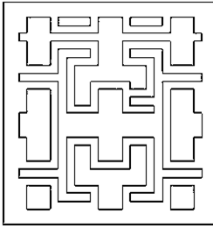
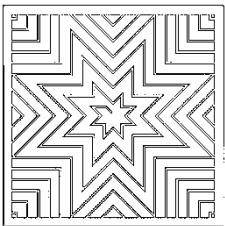
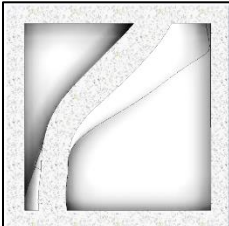
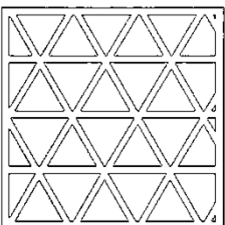
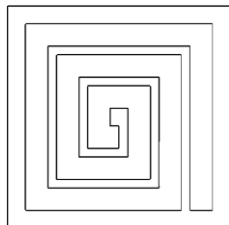
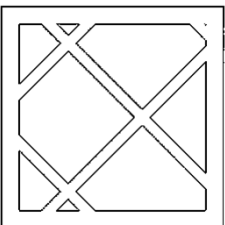
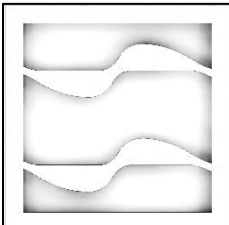
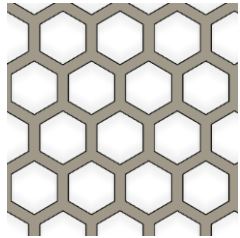
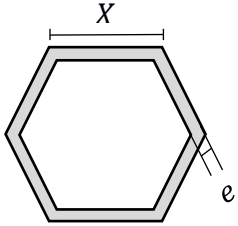
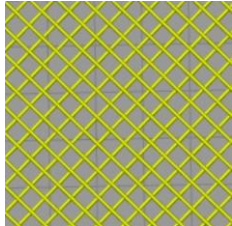
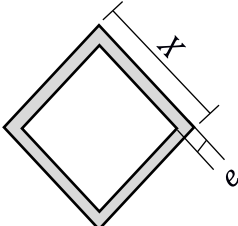
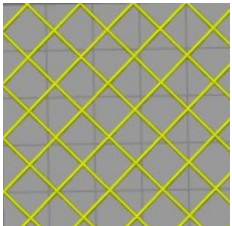
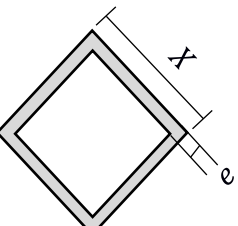
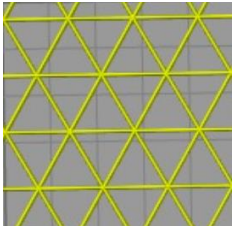
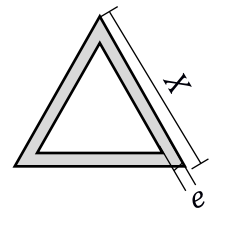
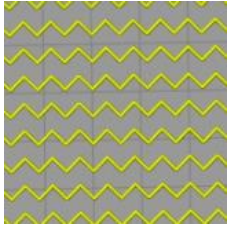
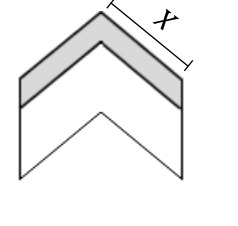
| | | | |
|----------|---|-----------|---|
| |  | |  |
| 3 | Octagram | 8 | Girode |
| |  | |  |
| 4 | Triangular | 9 | Concéntrico |
| |  | |  |
| 5 | Rectilíneo | 10 | Modelo ESPOL |
| |  | |  |

Tabla 2.9 Modelos matemáticos para dimensionamiento de patrones

[Elaboración propia]

| Patrón | Unidad de patrón individual | Área sombreada [mm ²] | Área total encerrada [mm ²] |
|---|---|--|--|
| <p>HONEYCOMB</p>  |  | $A_{sombreda} = 6Xe - 2\sqrt{3}e^2$ | $A_{total} = \frac{3X^2 * \sqrt{3}}{2}$ |
| <p>RECTILÍNEO</p>  |  | $A_{sombreda} = e [2X - e]$ | $A_{total} = X^2$ |
| <p>GRID</p>  |  | $A_{sombreda} = e [2x - e]$ | $A_{sombreda} = X^2$ |
| <p>TRIANGULAR</p>  |  | $A_{sombreda} = \frac{Xe}{2} - \frac{\sqrt{3}e^2}{12}$ | $A_{sombreda} = \frac{Xe}{2} - \frac{\sqrt{3}e^2}{12}$ |
| <p>WIGGLE</p>  |  | $A_{sombreda} = \frac{Xe}{2} - \frac{\sqrt{3}e^2}{12}$ | $A_{sombreda} = \frac{Xe}{2} - \frac{\sqrt{3}e^2}{12}$ |

2.4.4.1 Método bidimensional para patrones de geometría simple

Para determinar el porcentaje de relleno de estos patrones, se parte determinando el área sombreada que representa el espacio que ocupará la *unidad de patrón individual* a través de geometría simple. Posteriormente, se compara este resultado con el área total encerrada dentro de la unidad de patrón y este resultado debe satisfacer la siguiente relación para cumplir la condición inicial del porcentaje de relleno.

$$\text{Relación de áreas} = \frac{A_{\text{sombreada}}}{A_{\text{total}}} = 0.20 \quad (2.5)$$

En la Tabla 2.9 se presentan las ecuaciones geométricas correspondientes a las áreas de interés que se muestran en cada *unidad de patrón individual*.

2.4.4.2 Método iterativo para patrones de geometría compleja

Para determinar el porcentaje de relleno de los patrones con geometría compleja como curva de Hilbert, Octagram Spiral, concéntrico o modelos tridimensionales como Giroide, el método para dimensionar los patrones en las probetas fue iterativo, fijando siempre un valor constante como espesor de trazo, que se relacionó directamente con el diámetro del filamento, para luego variar las otras dimensiones en un proceso iterativo hasta obtener el volumen deseado. La Tabla 3.1 muestra los volúmenes resultantes y el porcentaje de relleno calculado a partir de ellos.

2.5 Simulación de ensayos de tensión y compresión

Luego de diseñar cada probeta con su respectivo patrón de relleno utilizando Autodesk Inventor Professional 2022, se procedió a simular los ensayos mediante el software Autodesk Nastran, cuyos resultados permitieron identificar sus propiedades mecánicas.

Hardware requerido

Tanto para el diseño de las probetas como para la simulación de los ensayos de tensión y compresión, el equipo utilizado reunía las siguientes características de software:

- Procesador: Intel(R) Core (TM) i7-9700 CPU @ 3.00GHz 3.00 GHz
- RAM instalada: 16.0 GB (15.8 GB disponible)
- Tipo de sistema operativo: Sistema de 64 bits, procesador basado en x64

Software requerido

Para el desarrollo de las simulaciones se utilizó Autodesk Nastran In-CAD, herramienta de Análisis de Elementos Finitos, por sus siglas en inglés *Finite Element Analysis* (FEA), que opera dentro de los softwares CAD con el solucionador Nastran de Autodesk el cual permite realizar simulación estática de alto nivel dentro de Autodesk Fusion 360 y Autodesk Inventor Professional 2022

2.5.1 Parámetros de simulación

Tipo de simulación: Para realizar la configuración del tipo de simulación que se llevó a cabo dentro del software, se consultó la norma cuyo protocolo requería la aplicación de una carga dinámica sobre las probetas desde 0 N hasta la fuerza en donde ocurra la ruptura. Sin embargo, considerando las limitantes del programa, se aproximó este análisis a una carga estática donde la presión aplicada fue determinada considerando que permite simular la parte lineal de la curva esfuerzo deformación del material seleccionado (PLA).

Carga: Dado que las normas no requieren aplicar una carga estática específica, para simplificar el ensayo y aproximar la situación que ocurre en la vida real, se resolvió aplicar una presión que se mantenga lo suficientemente alejado del esfuerzo de fluencia a la tensión y compresión de ambos materiales para garantizar que los resultados se simulen dentro del tramo lineal de la curva esfuerzo deformación, y, de tal manera, procurar la confiabilidad de los resultados.

Restricciones: Para representar el ensayo de tracción y tensión en donde un extremo de la probeta se encuentra fijo y el otro móvil, se agregó una restricción de extremo fijo sobre la cara opuesta a la cara en que es aplicada la fuerza de tensión o compresión.

Malla: Para generar el mallado que se elige el tipo de elemento triángulo y se aplica un tamaño de elemento máximo promedio de 0.01 mm para todas las probetas. La configuración final se muestra en la sección de Resultados.

Material: En impresión 3D por extrusión, los materiales comúnmente aplicados para desarrollar los filamentos son ABS y PLA, para fines comparativos, el material que se seleccione será indiferente siempre y cuando se aplique para ensayar todas las probetas, por consiguiente, este trabajo ha seleccionado el PLA como material de impresión.

Propiedades físicas del material:

El material utilizado para la composición de las probetas es el PLA que reúne las siguientes características.

Tabla 2.10 Propiedades físicas del PLA [Serna & Albán , 2011] [Suteja & Soesanti, 2019]

| MATERIAL | PLA | | | |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|
| COMPORTAMIENTO | isotrópico | | | |
| PROPIEDADES | Valor-unidad (SI) | | Valor-unidad (Imperial) | |
| CONDUCTIVIDAD TÉRMICA | 0.13 | W/m K | 1.74E-06 | Btu/in s °F |
| CALOR ESPECIFICO | 1200.00 | J/Kg °C | 0.29 | Btu/lb °F |
| COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA | 4.10E-05 | m/m-K | 2.30E-05 | in/in R |
| MÓDULO DE YOUNG | 3.45 | Gpa | 5.00E+05 | psi |
| COEFICIENTE DE POISSON | 0.39 | - | 0.39 | - |
| MÓDULO DE CORTE | 2.40 | GPa | 3.48E+05 | psi |
| DENSIDAD | 1.24 | g/cm ³ | 0.04 | lb/in ³ |
| LÍMITE ELÁSTICO EN TENSIÓN | 66.00 | MPa | 9572.49 | psi |
| ESFUERZO MÁXIMO DE TENSIÓN | 3027.00 | MPa | 439029.20 | psi |

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los modelos tridimensionales que fueron ensayados a través de las simulaciones computarizadas cuyos respectivos resultados también se adjuntan en esta sección. Se muestran además los parámetros de entrada y salida obtenidos específicamente de cada modelo.

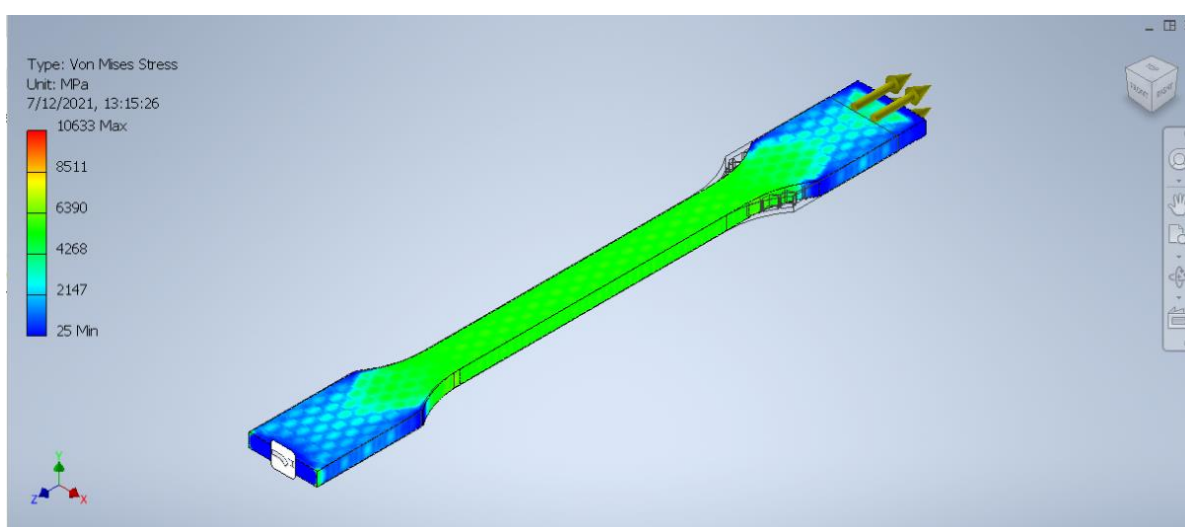


Figura 3.1 Mapa de distribución de esfuerzos de Von Mises en probeta ISO 527 con patrón de relleno Honeycomb
[Elaboración propia]

Los resultados Los datos recopilados en las simulaciones son presentados más adelante en una tabla resumiendo todos los valores representativos de cada patrón, de tal manera que puedan ser comparados y analizados.

3.1 Diseño exterior de modelos tridimensionales de probetas

Para ensayos de tracción la probeta aplicable a materiales plásticos, según la norma ISO 527, se presenta en la figura a continuación.

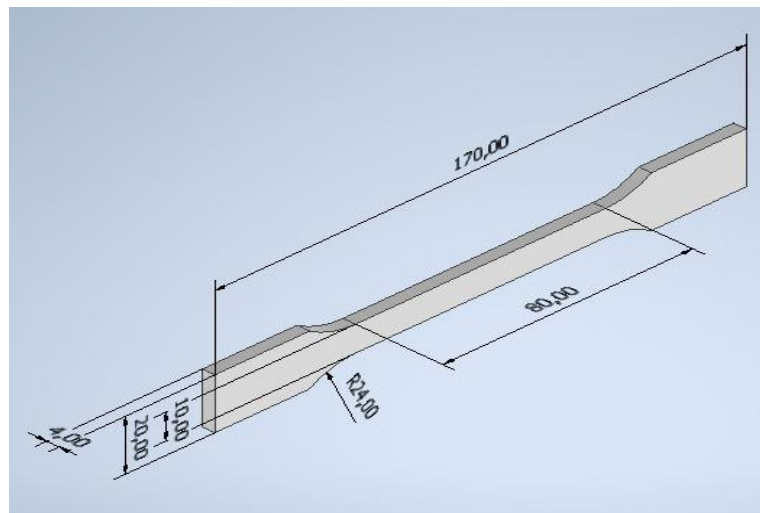
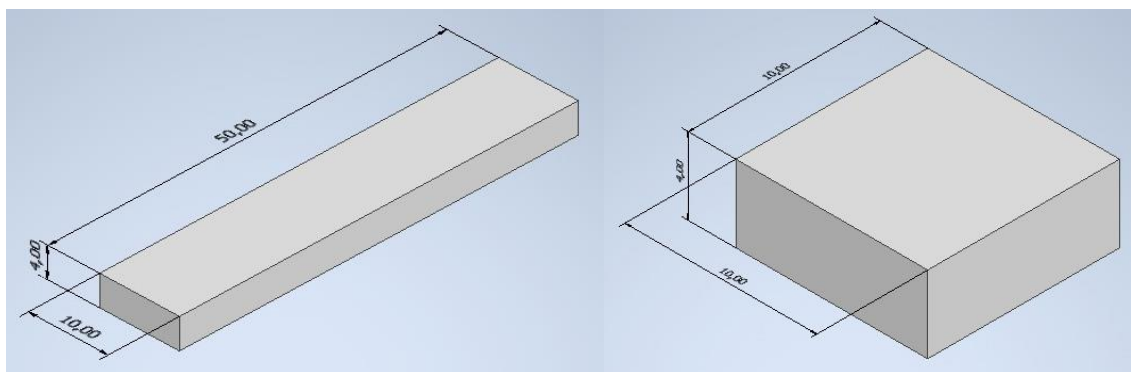


Figura 3.2 Vista tridimensional de probeta para ensayos de tensión según norma ISO 527
[Elaboración propia]



(a)

(b)

Figura 3.3 Vista tridimensional de probetas para ensayos de compresión
(a) para determinar el módulo de compresión y (b) para determinar la resistencia a la compresión
[Elaboración propia]

3.2 Diseño interior de modelos tridimensionales de probetas

3.2.1 Probetas según norma ISO 527 para ensayos de tensión al 20% de relleno

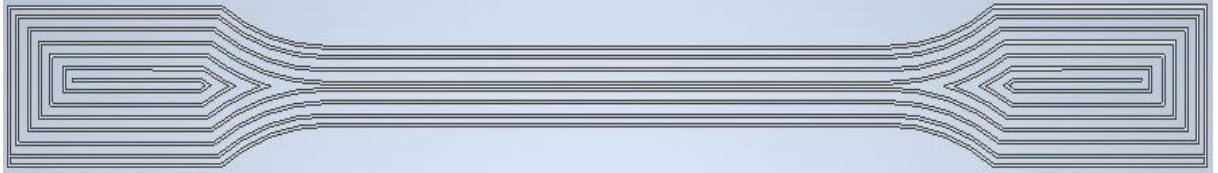


Figura 3.4 Interior de probeta con patrón de relleno Concéntrico
[Elaboración propia]

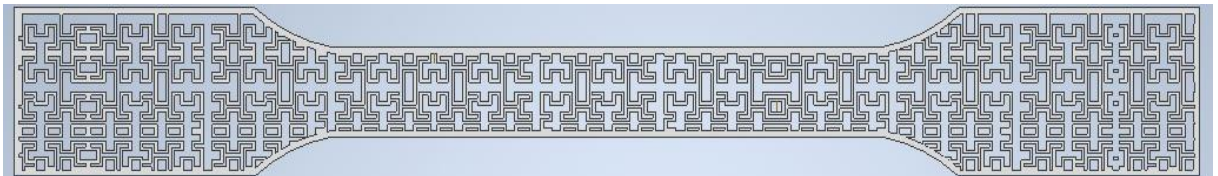


Figura 3.5 Interior de probeta con patrón de relleno Curva de Hilbert
[Elaboración propia]

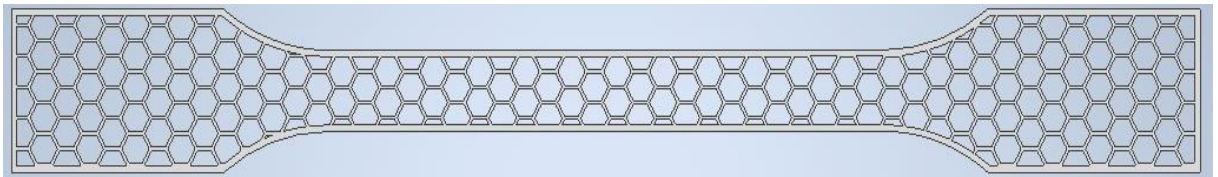


Figura 3.6 Interior de probeta con patrón de relleno Honeycomb
[Elaboración propia]

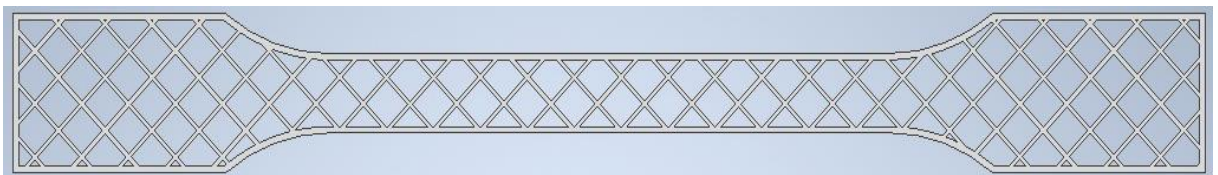


Figura 3.7 Interior de probeta con patrón de relleno Rectilíneo
[Elaboración propia]

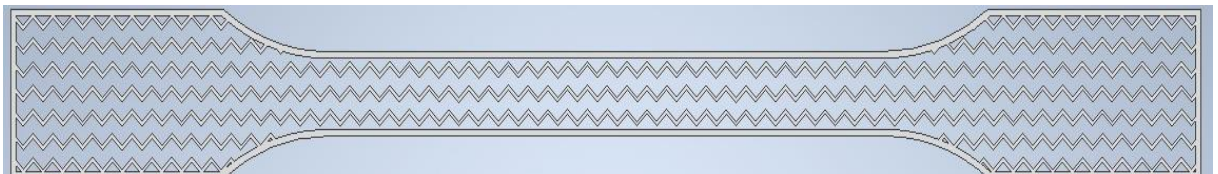


Figura 3.8 Interior de probeta con patrón de relleno Wiggle
[Elaboración propia]

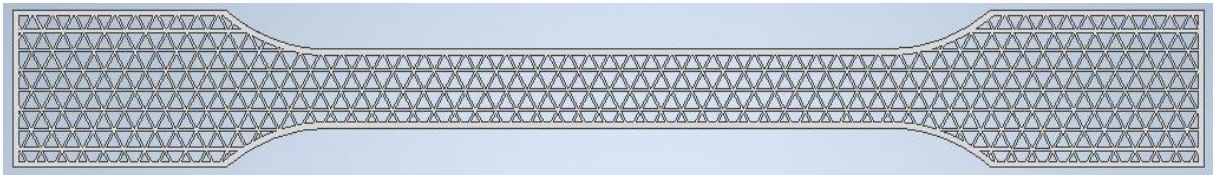


Figura 3.9 Interior de probeta con patrón de relleno Triangular
[Elaboración propia]

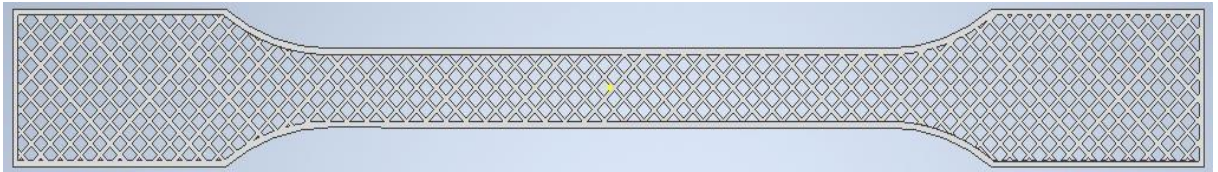


Figura 3.10 Interior de probeta con patrón de relleno Grid
[Elaboración propia]

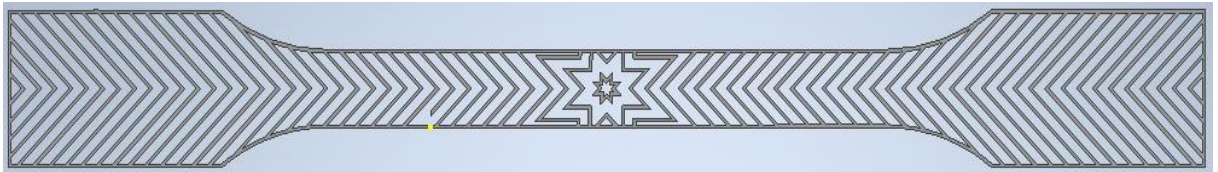


Figura 3.11 Interior de probeta con patrón de relleno Octagrama Espiral
[Elaboración propia]

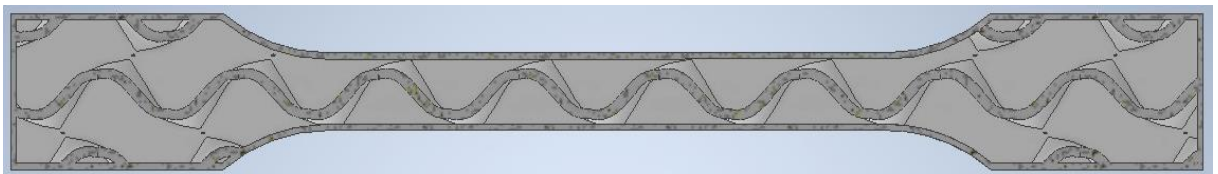


Figura 3.12 Interior de probeta con patrón de relleno Giroide
[Elaboración propia]

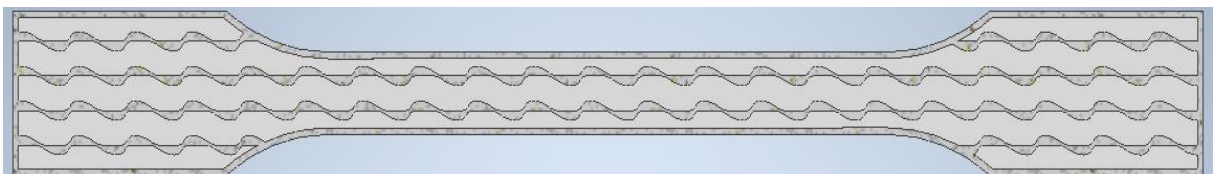


Figura 3.13 Interior de probeta con patrón de relleno Modelo Espol
[Elaboración propia]

3.2.2 Probetas según norma ISO 604 para ensayos de tensión para determinar módulo de compresión al 20% de relleno

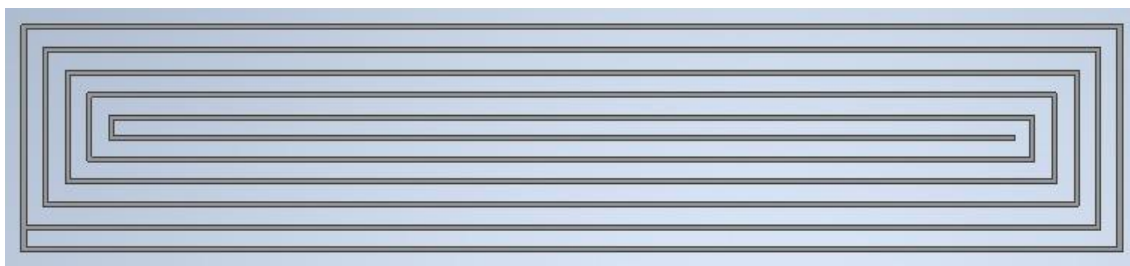


Figura 3.14 Interior de probeta con patrón de relleno Concéntrico
[Elaboración propia]

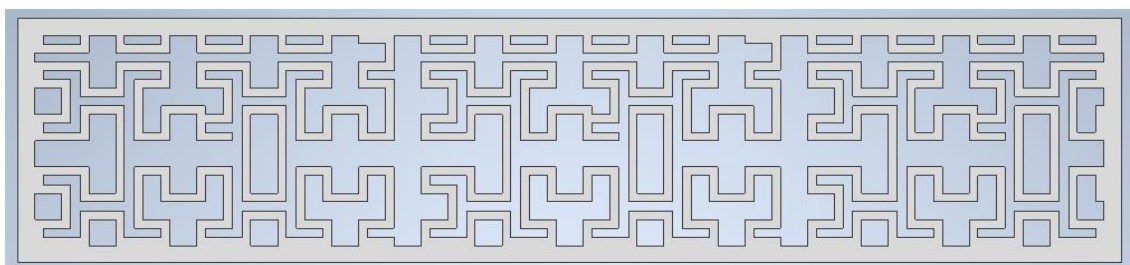


Figura 3.15 Interior de probeta con patrón de relleno Curva de Hilbert
[Elaboración propia]

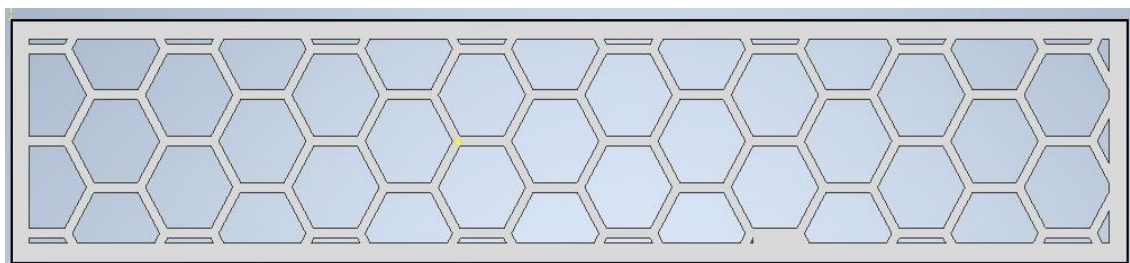


Figura 3.16 Interior de probeta con patrón de relleno Honeycomb
[Elaboración propia]

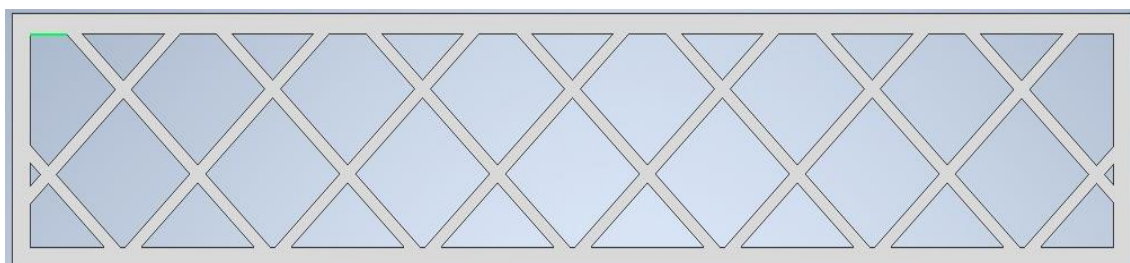


Figura 3.17 Interior de probeta con patrón de relleno Rectilíneo
[Elaboración propia]

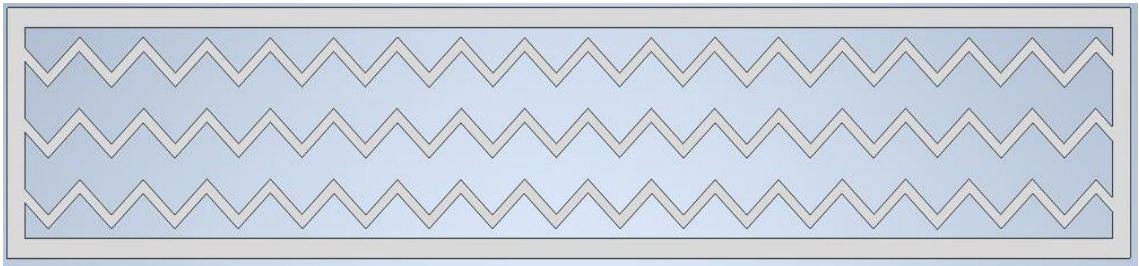


Figura 3.18 Interior de probeta con patrón de relleno Wiggle
[Elaboración propia]

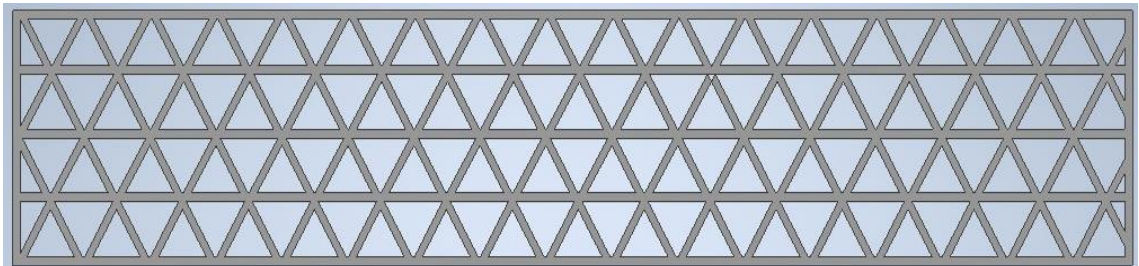


Figura 3.19 Interior de probeta con patrón de relleno Triangular
[Elaboración propia]

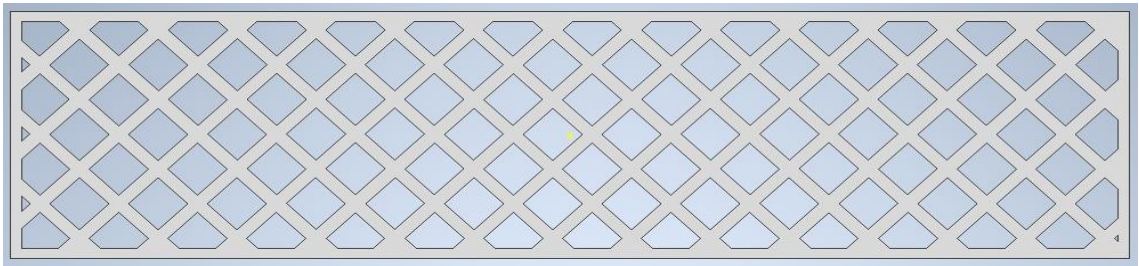


Figura 3.20 Interior de probeta con patrón de relleno Grid
[Elaboración propia]

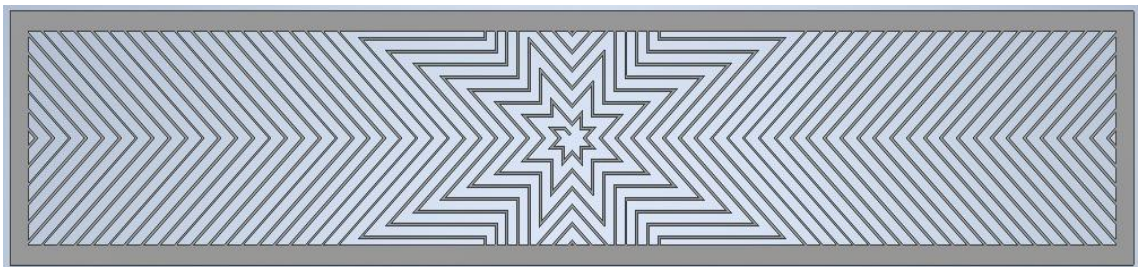


Figura 3.21 Interior de probeta con patrón de relleno Octagrama Espiral
[Elaboración propia]

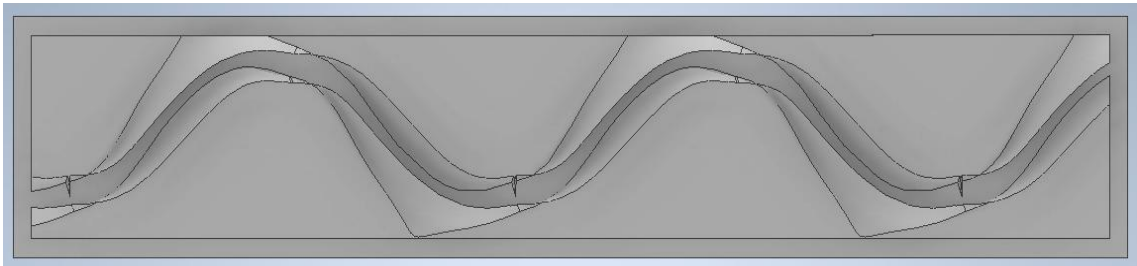


Figura 3.22 Interior de probeta con patrón de relleno Giroide
[Elaboración propia]

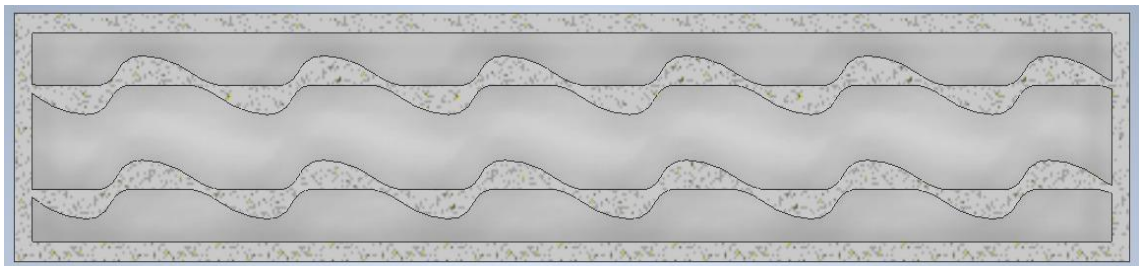
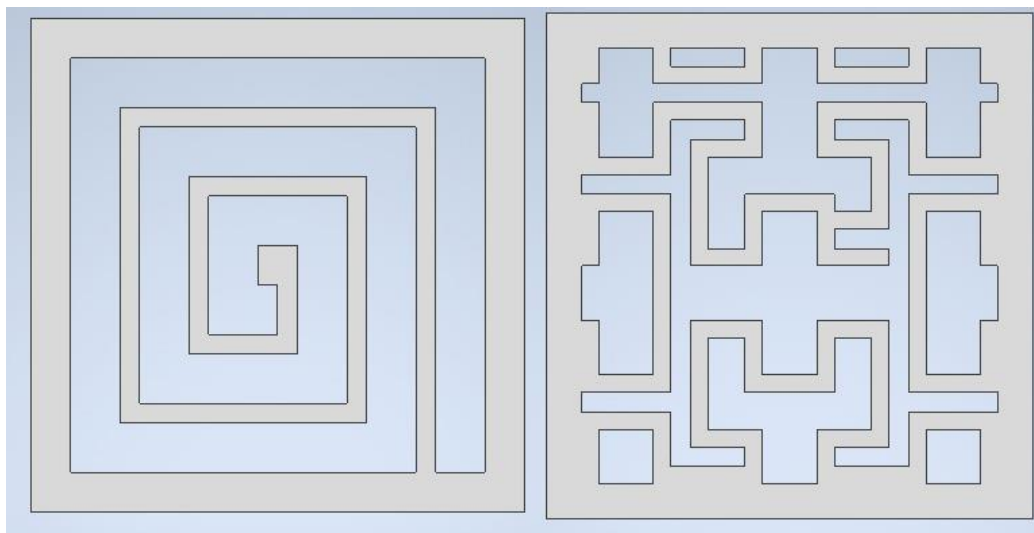


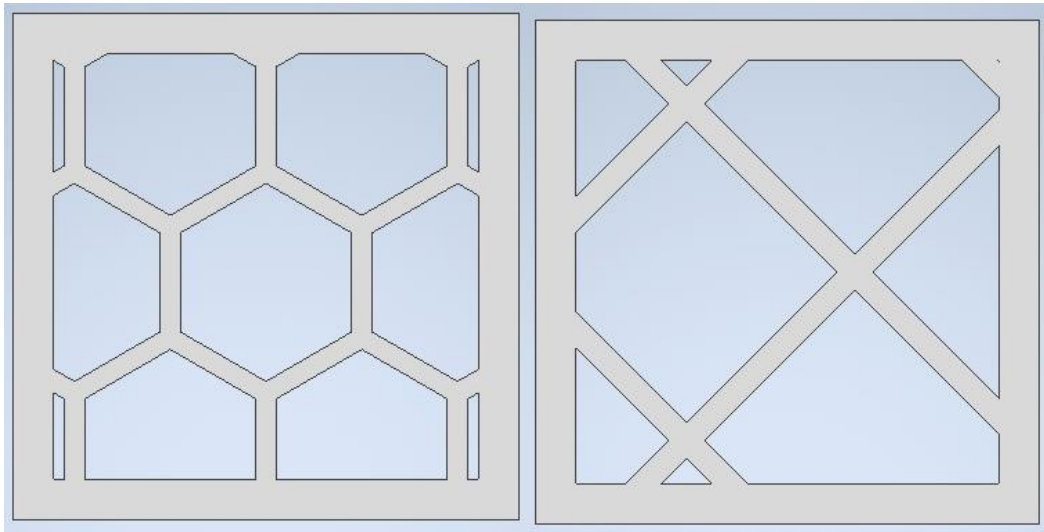
Figura 3.23 Interior de probeta con patrón de relleno Modelo Espol
[Elaboración propia]

3.2.3 Probetas según norma ISO 604 para ensayos de tensión para determinar resistencia a la compresión al 20% de relleno



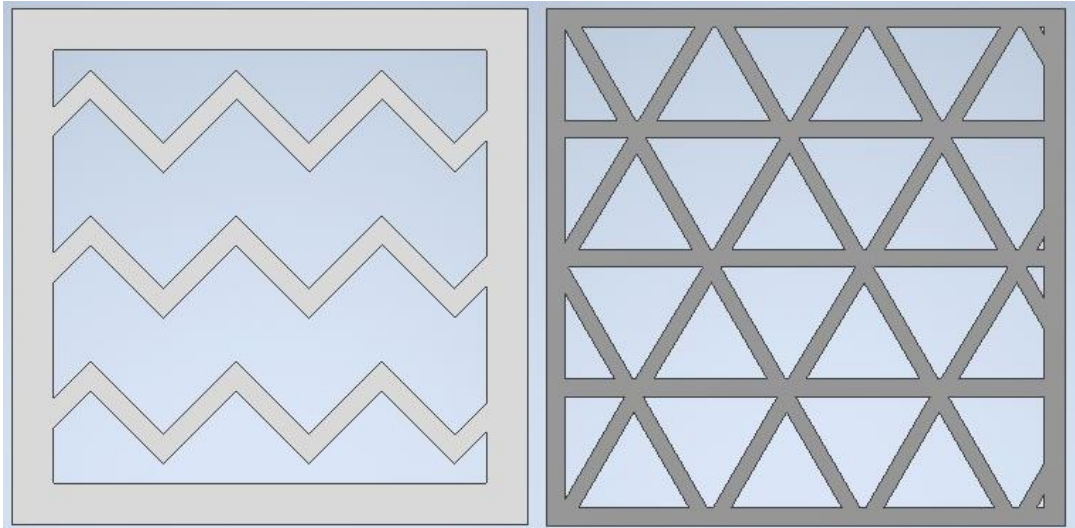
(a)

(b)



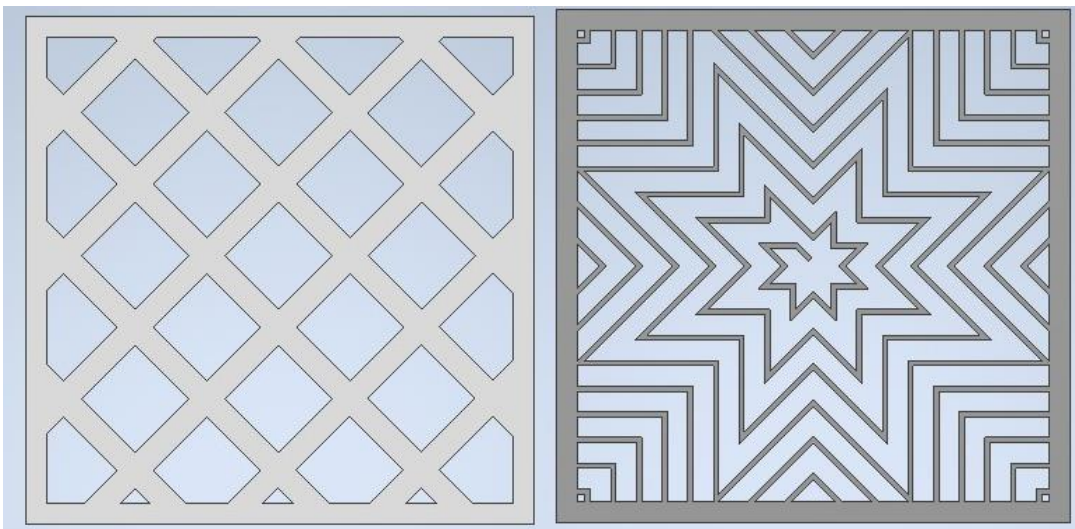
(c)

(d)



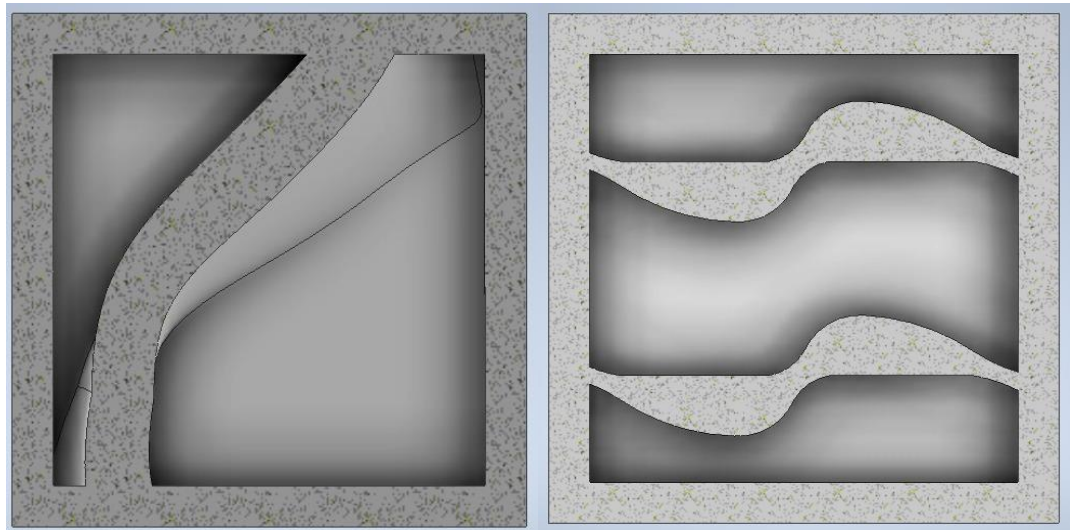
(e)

(f)



(g)

(h)



(i)

(j)

Figura 3.24 Interior de probetas con patrón de relleno (a)Concéntrico (b)Curva de Hilbert (c)Honeycomb (d)Rectilíneo (e)Wiggle (f)triangular (g)Grid (h)Octagrama espiral (i)Giroide (j) Modelo Espol [Elaboración propia]

3.3 Cálculo de dimensiones de patrones de relleno al 20%

Tal como fue explicado en el capítulo anterior, se aplica la ecuación 2.1 para que uno de los casos de patrones de relleno bidimensionales detallados en la Tabla 2.

Se ejemplifica a continuación el cálculo para el patrón Grid, asumiendo como constante el espesor inicial e como 0.5 mm a diferencia del Rectilíneo que fue 0.4 mm.

$$\text{Relación de áreas} = \frac{e [2X - e]}{X^2} = 0.20$$

Reemplazando $e = 0.5$

$$\frac{0.5 [2X - 0.5]}{X^2} = 0.20$$

Se obtiene la expresión cuadrática:

$$0.20X^2 - X + 0.5^2 = 0$$

Cuya raíz positiva es igual a:

$$X = 4.73$$

Por lo tanto, la longitud X denominada por este estudio como longitud determinante, por su función de dimensionar el patrón de relleno para que cumpla con la restricción

planteada, debe ser 4.73 mm para el patrón Grid, valor que fue considerado al momento de dibujar las probetas. Cabe recalcar que, para algunos casos, este valor sólo significó un punto de partida para obtener las dimensiones finales de la probeta, dado que, debido a las diferentes asunciones realizadas, el volumen resultante no cumplió con el valor requerido dentro del intervalo de incertidumbre aceptado.

Los resultados de los volúmenes obtenidos desde el software CAD para cada una de las probetas se muestran en la Tabla 3.1 con el objetivo de validar el 20% de relleno en todos los modelos, aceptando un porcentaje de error del $\pm 0.25\%$.

3.3.1 Validación de porcentajes de relleno de probetas resultantes

A continuación, se presenta la Tabla 3.1 con los volúmenes de las probetas resultantes para cada patrón de relleno, en ella también se muestra el volumen obtenido de una probeta hueca modelo que fue usada para determinar el volumen de las paredes exteriores o contorno de todas las muestras dependiendo del tipo de probeta y ensayo a aplicar, del cual sustrayendo el volumen total, resulta en el volumen interior del patrón de relleno, cuyo porcentaje de llenado debe ser del 20% para cumplir con los objetivos del proyecto.

Las relaciones utilizadas para calcular el volumen de interés al cual se le aplica la restricción de porcentaje de relleno igual a 20% con una tolerancia de $\pm 0.25\%$ se muestran a continuación. Para calcular el volumen que cada patrón de relleno ocupa en el interior de cada probeta sin considerar el contorno que forma las paredes, se aplica la siguiente ecuación 3.1.

$$\begin{aligned} \text{Volumen patrón de relleno (sin contorno)} &= \text{Volumen con patrón de relleno} \\ &- \text{Volumen contorno} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Posteriormente, para obtener el volumen interior sin relleno de cada tipo de probeta, se sustrae el volumen del contorno del volumen macizo total obtenido, como indica la ecuación 3.2.

$$\text{Volumen interior (sin contorno)} = \text{Volumen macizo} - \text{Volumen contorno} \tag{3.2}$$

Tabla 3.1 Volúmenes resultantes al 20% de relleno con una tolerancia de $\pm 0.25\%$

[Elaboración propia]

| Tipo patrón | Tipo probeta | Volumen macizo [mm³] | Volumen con patrón de relleno [mm³] | Volumen interior (sin contorno) [mm³] | Volumen contorno [mm³] | Volumen patrón de relleno (sin contorno) [mm³] | % de relleno |
|--------------------|---------------------|--|---|---|--|--|---------------------|
| Probeta hueca | ISO 527 | 9611.68 | 3752.48 | 5859.21 | 3752.48 | 0.00 | 0.00% |
| Probeta hueca | ISO 604 1 | 2000 | 861.63 | 1138.37 | 861.63 | 0.00 | 0.00% |
| Probeta hueca | ISO 604 2 | 400 | 202.43 | 197.57 | 202.43 | 0.00 | 0.00% |
| Concentrico | ISO 527 | 9611.68 | 4921.48 | 5859.21 | 3752.48 | 1169.01 | 19.95% |
| Concentrico | ISO 604 1 | 2000 | 1089.10 | 1138.37 | 861.63 | 227.47 | 19.98% |
| Concentrico | ISO 604 2 | 400 | 241.68 | 197.57 | 202.43 | 39.25 | 19.86% |
| Honey Comb | ISO 527 | 9611.68 | 4910.26 | 5859.21 | 3752.48 | 1157.79 | 19.76% |
| Honey Comb | ISO 604 1 | 2000 | 1090.47 | 1138.37 | 861.63 | 228.84 | 20.10% |
| Honey Comb | ISO 604 2 | 400 | 241.49 | 197.57 | 202.43 | 39.06 | 19.77% |
| Giroide | ISO 527 | 9611.68 | 4910.35 | 5859.21 | 3752.48 | 1157.88 | 19.76% |
| Giroide | ISO 604 1 | 2000 | 1087.04 | 1138.37 | 861.63 | 225.41 | 19.80% |
| Giroide | ISO 604 2 | 400 | 241.45 | 197.57 | 202.43 | 39.02 | 19.75% |
| Grid | ISO 527 | 9611.68 | 4920.04 | 5859.21 | 3752.48 | 1167.56 | 19.93% |
| Grid | ISO 604 1 | 2000 | 1090.21 | 1138.37 | 861.63 | 228.57 | 20.08% |
| Grid | ISO 604 2 | 400 | 242.08 | 197.57 | 202.43 | 39.65 | 20.07% |
| Octogram Spiral | ISO 527 | 9611.68 | 4932.82 | 5859.21 | 3752.48 | 1180.35 | 20.15% |
| Octogram Spiral | ISO 604 1 | 2000 | 1092.19 | 1138.37 | 861.63 | 230.56 | 20.25% |
| Octogram Spiral | ISO 604 2 | 400 | 242.42 | 197.57 | 202.43 | 39.99 | 20.24% |
| Rectilineo | ISO 527 | 9611.68 | 4921.23 | 5859.21 | 3752.48 | 1168.76 | 19.95% |
| Rectilineo | ISO 604 1 | 2000 | 1090.80 | 1138.37 | 861.63 | 229.17 | 20.13% |
| Rectilineo | ISO 604 2 | 400 | 242.00 | 197.57 | 202.43 | 39.57 | 20.03% |
| Triangular | ISO 527 | 9611.68 | 4916.51 | 5859.21 | 3752.48 | 1164.04 | 19.87% |
| Triangular | ISO 604 1 | 2000 | 1090.34 | 1138.37 | 861.63 | 228.71 | 20.09% |
| Triangular | ISO 604 2 | 400 | 242.39 | 197.57 | 202.43 | 39.96 | 20.23% |

| | | | | | | | |
|------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Wiggle | ISO 527 | 9611.68 | 4932.07 | 5859.21 | 3752.48 | 1179.60 | 20.13% |
| Wiggle | ISO 604 1 | 2000 | 1091.62 | 1138.37 | 861.63 | 229.99 | 20.20% |
| Wiggle | ISO 604 2 | 400 | 242.35 | 197.57 | 202.43 | 39.92 | 20.20% |
| Curva de Hilbert | ISO 527 | 9611.68 | 4923.23 | 5859.21 | 3752.48 | 1170.76 | 19.98% |
| Curva de Hilbert | ISO 604 1 | 2000 | 1090.66 | 1138.37 | 861.63 | 229.03 | 20.12% |
| Curva de Hilbert | ISO 604 2 | 400 | 242.35 | 197.57 | 202.43 | 39.92 | 20.20% |
| Modelo ESPOL | ISO 527 | 9611.68 | 4909.90 | 5859.21 | 3752.48 | 1157.43 | 19.75% |
| Modelo ESPOL | ISO 604 1 | 2000 | 1092.12 | 1138.37 | 861.63 | 230.49 | 20.25% |
| Modelo ESPOL | ISO 604 2 | 400 | 242.44 | 197.57 | 202.43 | 40.01 | 20.25% |

3.4 Parámetros de entrada para simulación

Carga: Se muestra en el gráfico a continuación, las cargas definidas para cada tipo de ensayo.

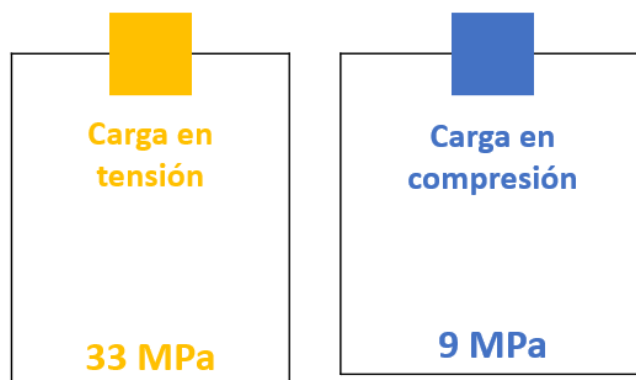


Figura 3.25 Animación de magnitudes de cargas aplicadas en ensayos de tensión y compresión
[Elaboración propia]

Malla: Se muestra en la Tabla 2.10 los parámetros de entrada que fueron configurados para el mallado de todas las probetas.

Tabla 3.2 Parámetros de malla insertado en el software de simulación Inventor Nastran
[Elaboración propia]

| | |
|---|-------|
| Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo) | 0.1 |
| Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio) | 0.2 |
| Factor de modificación | 1.5 |
| Ángulo máximo de giro | 60 gr |
| Crear elementos de malla curva | Sí |

3.5 Simulaciones

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones realizadas organizados a través de fichas infográficas para cada una de las probetas ensayadas, en cada ficha se incluyen los datos generales de la probeta, el código del patrón de relleno que contiene en el interior, el nombre de este patrón, la norma

aplicada para su diseño y el tipo de ensayo ejecutado, además se especifica el código de la probeta el cual representa un conjunto de dos dígitos en donde el primero corresponde al código del patrón y el segundo indica el tipo de ensayo realizado, correspondiendo el número 1 para el ensayo de tensión, 2 para ensayo de módulo de compresión y 3 ensayo de resistencia en compresión.

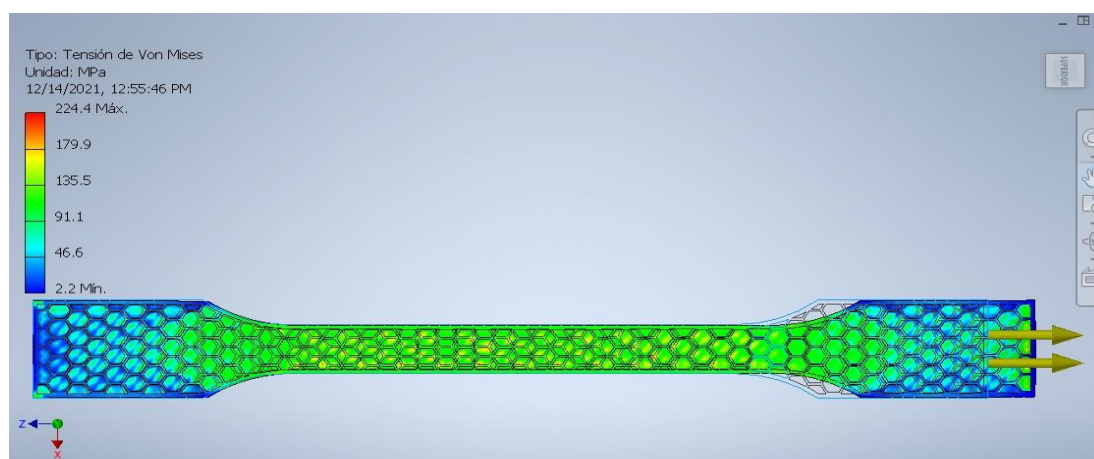
Se incluye además una imagen del mapa de colores resultante de la probeta ensayada, en la que se muestra la distribución de los esfuerzos de Von Mises a lo largo de todo el patrón, esta imagen fue obtenida realizando un corte en la mitad del espesor de la probeta, eliminando así las tapas, dado que las zonas de interés para el presente estudio se encuentran específicamente en el patrón. Se debe notar que las escalas de color de todas las figuras no han sido normalizadas y varían dependiendo de los esfuerzos máximos obtenidos para cada caso.

3.5.1 Resumen de resultados por probeta

Tabla 3.3 Resumen de resultados del patrón HoneyComb ISO 527

[Elaboración propia]

| | | | | | |
|--------------------------|-----|--------------|-------------------------|-----------------------|---------|
| CÓDIGO DE PATRON | 1 | | NOMBRE DE PATRON | HONEYCOMB | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 1.1 | NORMA | ISO 527 | TIPO DE ENSAYO | TENSIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|----------|---------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 2.185 | 224.379 |
| Primera tensión principal [MPa] | -56.346 | 272.048 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -149.952 | 68.422 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 6.110 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.294 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.001 | 0.061 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.068 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.031 | 0.000 |
| Módulo de Tension [MPa] | 3666.893 | |
| Índice de resistencia a la tensión | 1.964 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|-----------------|----------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 [g/cm ³] |
| Masa | 0.00490669 [kg] |
| Área | 15986.1 [mm ²] |
| Volumen | 4910.26 [mm ³] |

OBSERVACIONES:

Presenta una distribución de esfuerzos uniforme en el centro de la probeta.

El coeficiente de seguridad mínimo bastante alejado de 1 indica que, en algún lugar de la probeta, se produce una falla por fluencia.

Tabla 3.4 Resumen de resultados del patrón HoneyComb ISO 604
[Elaboración propia]

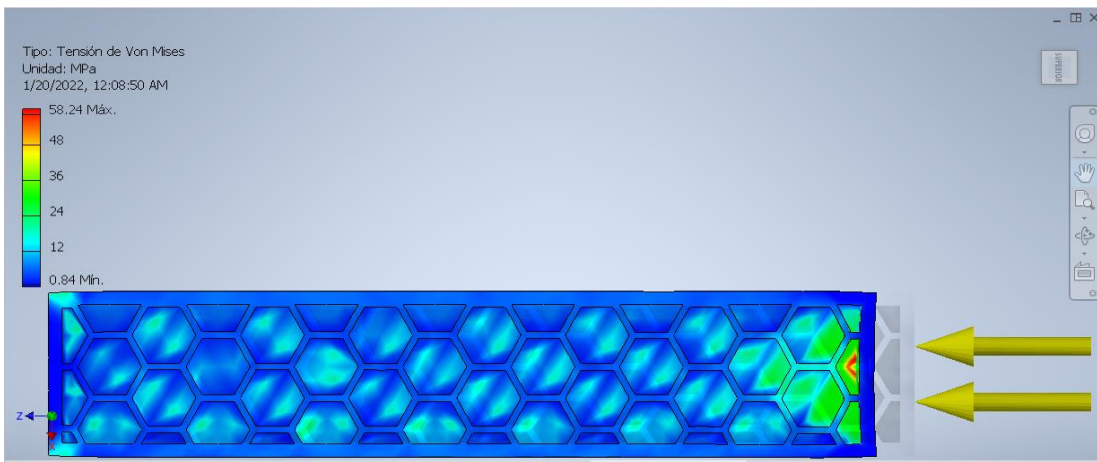
| | | | | | |
|---|---------------|-------------------------|--|----------------------------|------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 1 | NOMBRE DE PATRON | | HONEY COMB | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 1.2 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | COMPRESIÓN |
|  | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.837 | 58.239 | Densidad | 1 [g/cm ³] | |
| Primera tensión principal [MPa] | -19.953 | 33.501 | Masa | 0.00109047 [kg] | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -71.716 | 8.358 | Área | 3457 [mm ²] | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.319 | Volumen | 1090.47 [mm ³] | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 1.133 | 15.000 | OBSERVACIONES: | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.016 | Presenta un gradiente de esfuerzos distribuido a través del patrón y de las esquinas contrarias a la aplicación de la carga. | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.010 | El coeficiente de seguridad alejándose de 1 indica que en ninguna parte de la probeta se produce una falla por fluencia. | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.017 | 0.000 | El módulo de compresión se obtiene 3679.41 MPa. | | |
| Módulo de compresión [MPa] | 3679.41 | | | | |

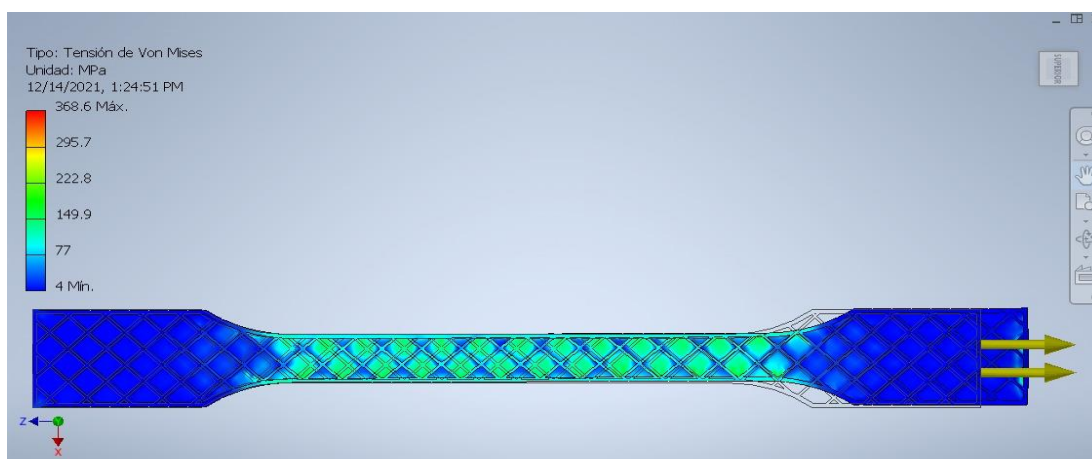
Tabla 3.5 Resumen de resultados del patrón HoneyComb ISO 604
[Elaboración propia]

| | | | | | |
|------------------------------------|---------------|-------------------------|---|-------------------------|------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 1 | NOMBRE DE PATRON | | HONEY COMB | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 1.3 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | COMPRESIÓN |
| | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.486 | 50.289 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -12.755 | 41.854 | Masa | 0.000241491 kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -65.034 | 8.040 | Área | 732.721 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.085 | Volumen | 241.491 mm ³ | |
| Coeficiente de seguridad [su] | 1.312 | 15.000 | OBSERVACIONES | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.014 | Presenta un gradiente de esfuerzos distribuido a través del patrón y de las esquinas contrarias a la aplicación de la carga. El coeficiente de seguridad alejándose de 1 indica que en ninguna parte de la probeta se produce una falla por fluencia. | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.008 | La distancia entre esfuerzo de Von Misses máximo y mínimo indica una buena distribución de esfuerzos, no hay concentradores significativos. | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.015 | 0.000 | | | |
| Resistencia a la compresión | 3.78 | | | | |

Tabla 3.6 Resumen de resultados del patrón Grid ISO 527

[Elaboración propia]

| | | | | | |
|--------------------------|-----|--------------|-------------------------|-----------------------|---------|
| CÓDIGO DE PATRON | 2 | | NOMBRE DE PATRON | GRID | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 2.1 | NORMA | ISO 527 | TIPO DE ENSAYO | TENSIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|----------|---------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 4.046 | 368.634 |
| Primera tensión principal [MPa] | -50.314 | 473.970 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -110.920 | 165.727 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 6.207 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.179 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.002 | 0.101 |
| Primera deformación principal [su] | -0.001 | 0.111 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.054 | 0.000 |
| Módulo de Tension [MPa] | 3682.847 | |
| Resistencia a la tension | 1.195 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.0049200257 kg |
| Área | 14961.3 mm ² |
| Volumen | 4920.04 mm ³ |

OBSERVACIONES:

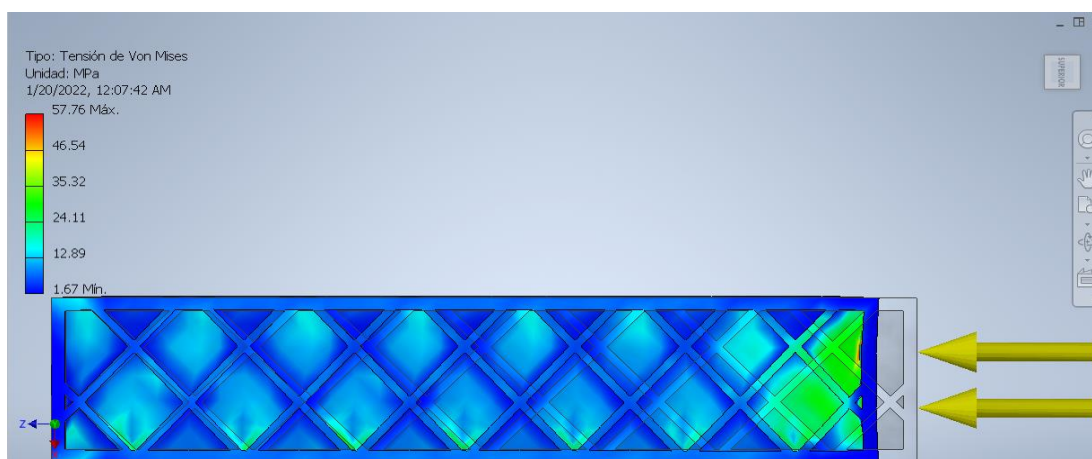
Presenta una distribución de esfuerzos uniforme en el centro de la probeta.

El coeficiente de seguridad mínimo bastante alejado de 1 indica que, en algún lugar de la probeta, se produce una falla por fluencia.

Tabla 3.7 Resumen de resultados del patrón Grid ISO 604

[Elaboración propia]

| | | | | | |
|--------------------------|-----|--------------|-------------------------|-----------------------|------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 2 | | NOMBRE DE PATRON | GRID | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 2.2 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | COMPRESIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|---------|--------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 1.672 | 57.759 |
| Primera tensión principal [MPa] | -16.271 | 33.205 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -66.287 | 13.520 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.320 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 1.143 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.001 | 0.016 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.010 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.016 | 0.000 |
| Módulo de compresión [MPa] | 3718.37 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.00109021 kg |
| Área | 3256.87 mm ² |
| Volumen | 1090.21 mm ³ |

OBSERVACIONES:

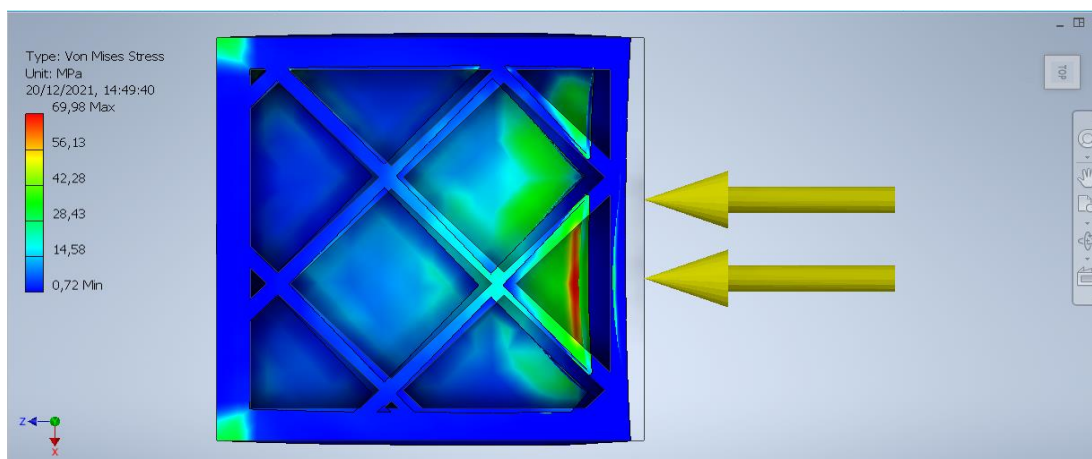
Presenta un gradiente de esfuerzos distribuido a través del patrón y de las esquinas contrarias a la aplicación de la carga.

El coeficiente de seguridad alejándose de 1 indica que en ninguna parte de la probeta se produce una falla por fluencia.

Tabla 3.8 Resumen de resultados del patrón Grid ISO 604

[Elaboración propia]

| | | | | |
|--------------------------|-----|-------------------------|---------|-----------------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 2 | NOMBRE DE PATRON | | GRID |
| CÓDIGO DE PROBETA | 2.3 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO |
| | | | | COMPRESIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|---------|--------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.359 | 67.973 |
| Primera tensión principal [MPa] | -15.042 | 38.202 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -78.861 | 5.203 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.091 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.971 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.019 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.010 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.020 | 0.000 |
| Resistencia a la compresión | 3.78 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.000242081 kg |
| Área | 733.322 mm ² |
| Volumen | 242.081 mm ³ |

OBSERVACIONES:

Concentra los esfuerzos en la zona de aplicación de la fuerza.

Tabla 3.9 Resumen de resultados del patrón Octagram spiral ISO 527

[Elaboración propia]

| | | | | | |
|--------------------------|-----|--------------|-------------------------|-----------------------|---------|
| CÓDIGO DE PATRON | 3 | | NOMBRE DE PATRON | OCTAGRAM SPIRAL | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 3.1 | NORMA | ISO 527 | TIPO DE ENSAYO | TENSIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|----------|---------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 4.055 | 290.550 |
| Primera tensión principal [MPa] | -114.116 | 376.197 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -182.827 | 86.934 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 6.279 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.227 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.001 | 0.080 |
| Primera deformación principal [su] | -0.001 | 0.089 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.035 | 0.000 |
| Módulo de Tension [MPa] | 3654.223 | |
| Resistencia a la tension | 1.517 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.004932817 kg |
| Área | 16510.8 mm ² |
| Volumen | 4932.82 mm ³ |

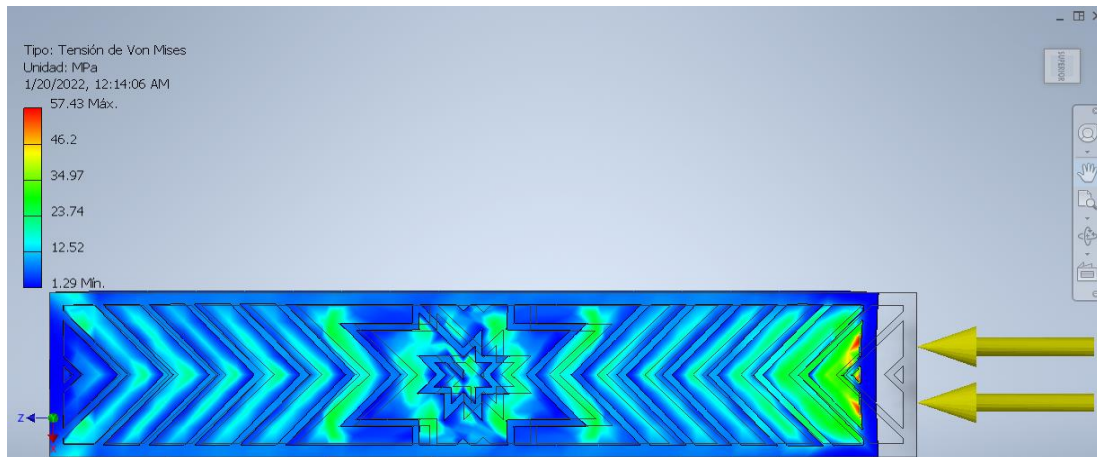
OBSERVACIONES:

Presenta una distribución de esfuerzos uniforme en el centro de la probeta.

El coeficiente de seguridad mínimo bastante alejado de 1 indica que, en algún lugar de la probeta, se produce una falla por fluencia.

Tabla 3.10 Resumen de resultados del patrón Octagram spiral ISO 604
[Elaboración propia]

| | | | | | |
|--------------------------|-----|-------------------------|---------|-----------------------|------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 3 | NOMBRE DE PATRON | | OCTAGRAM SPIRAL | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 3.2 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | COMPRESIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|---------|--------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 1.286 | 57.433 |
| Primera tensión principal [MPa] | -15.120 | 29.790 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -66.714 | 11.728 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.323 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 1.149 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.016 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.009 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.017 | 0.000 |
| Módulo de compresión [MPa] | 3667.60 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.00109219 kg |
| Área | 3547.46 mm ² |
| Volumen | 1092.19 mm ³ |

OBSERVACIONES:

Presenta un gradiente de esfuerzos distribuido a través del patrón y de las esquinas contrarias a la aplicación de la carga.

El coeficiente de seguridad alejándose de 1 indica que en ninguna parte de la probeta se produce una falla por fluencia.

Tabla 3.11 Resumen de resultados del patrón Octagram spiral ISO 604
[Elaboración propia]

| | | | | | |
|------------------------------------|---------------|-------------------------|--|-------------------------|------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 3 | NOMBRE DE PATRON | | OCTAGRAM SPIRAL | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 3.3 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | COMPRESIÓN |
| | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.253 | 78.135 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -23.370 | 67.926 | Masa | 0.000242464 kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -101.964 | 8.062 | Área | 752.109 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.102 | Volumen | 242.424 mm ³ | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.845 | 15.000 | OBSERVACIONES: | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.021 | Concentra los esfuerzos en la zona de aplicación de la fuerza. | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.020 | | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.023 | 0.000 | | | |
| Resistencia a la compresión | 2.43 | | | | |

Tabla 3.12 Resumen de resultados del patrón Triangular ISO 527

[Elaboración propia]

| | | | | | |
|--------------------------|-----|--------------|-------------------------|-----------------------|---------|
| CÓDIGO DE PATRON | 4 | | NOMBRE DE PATRON | TRIANGULAR | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 4.1 | NORMA | ISO 527 | TIPO DE ENSAYO | TENSIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|----------|---------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 3.825 | 389.630 |
| Primera tensión principal [MPa] | -43.215 | 542.032 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -94.479 | 208.009 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 6.003 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.169 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.001 | 0.108 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.120 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.053 | -0.001 |
| Módulo de Tension [MPa] | 3611.804 | |
| Resistencia a la tension | 1.131 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.004916487 kg |
| Área | 16192.9 mm ² |
| Volumen | 4916.51 mm ³ |

OBSERVACIONES:

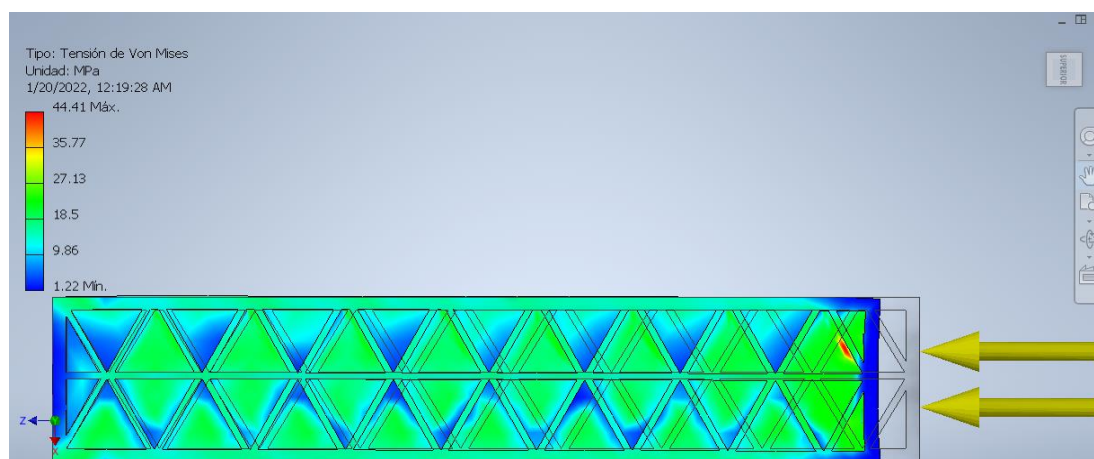
Presenta una distribución de esfuerzos uniforme en el centro de la probeta.

El coeficiente de seguridad mínimo bastante alejado de 1 indica que, en algún lugar de la probeta, se produce una falla por fluencia.

Tabla 3.13 Resumen de resultados del patrón Triangular ISO 604

[Elaboración propia]

| | | | | |
|--------------------------|-----|-------------------------|---------|-----------------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 4 | NOMBRE DE PATRON | | TRIANGULAR |
| CÓDIGO DE PROBETA | 4.2 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO |
| | | | | COMPRESIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|---------|--------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 1.224 | 44.407 |
| Primera tensión principal [MPa] | -12.791 | 27.499 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -54.608 | 9.392 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.301 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 1.486 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.012 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.007 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.013 | 0.000 |
| Módulo de compresión [MPa] | 3683.00 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.00109034 kg |
| Área | 3496.93 mm ² |
| Volumen | 1090.34 mm ³ |

OBSERVACIONES:

Presenta un gradiente de esfuerzos distribuido a través del patrón y de las esquinas contrarias a la aplicación de la carga.

El coeficiente de seguridad alejándose de 1 indica que en ninguna parte de la probeta se produce una falla por fluencia.

Tabla 3.14 Resumen de resultados del patrón Triangular ISO 604

[Elaboración propia]

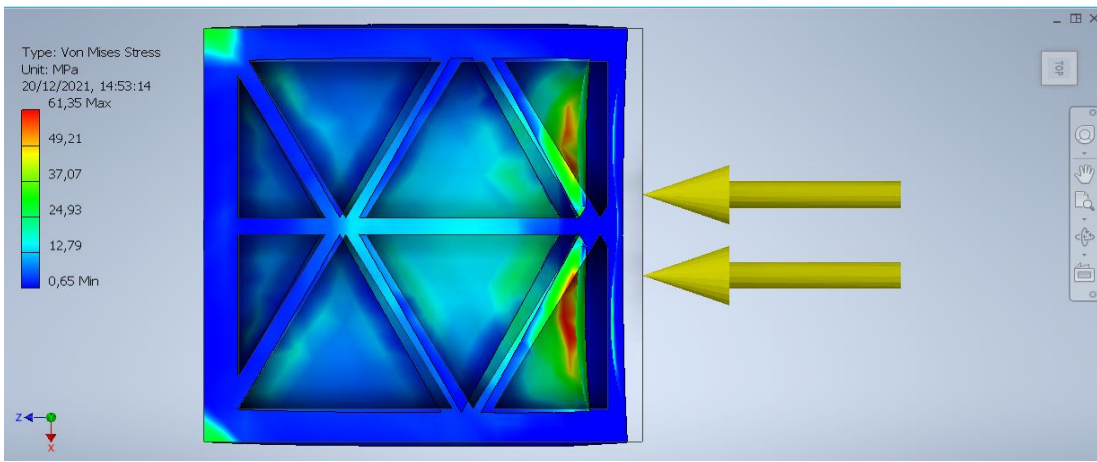
| | | | | | |
|---|---------------|---------------|-----------------------------|-------------------------|------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 4 | | NOMBRE DE PATRON | TRIANGULAR | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 4.3 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | COMPRESIÓN |
|  | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.648 | 61.349 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -23.598 | 46.158 | Masa | 0.000242394 kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -78.420 | 6.443 | Área | 745.298 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.089 | Volumen | 242.394 mm ³ | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 1.076 | 15.000 | OBSERVACIONES: | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.017 | | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.009 | | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.018 | 0.000 | | | |
| Resistencia a la compresión | 3.10 | | | | |

Tabla 3.15 Resumen de resultados del patrón Rectilíneo ISO 527
[Elaboración propia]

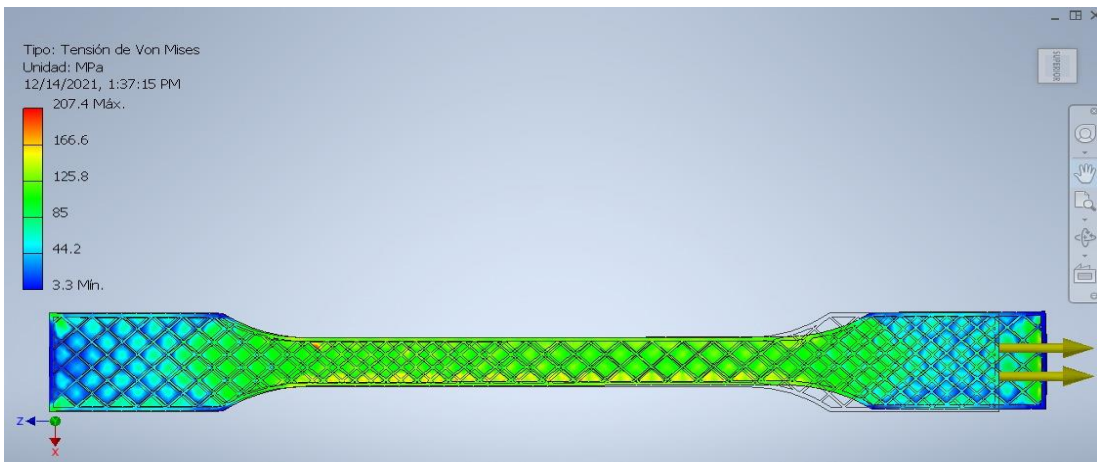
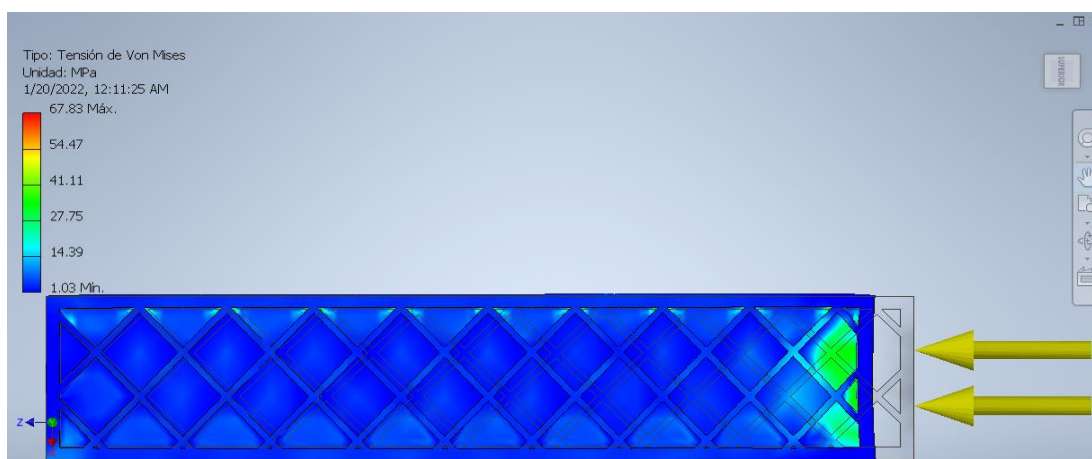
| CÓDIGO DE PATRON | | 5 | NOMBRE DE PATRON | | RECTILINEO |
|---|---------------|---------------|---|-------------------------|------------|
| CÓDIGO DE PROBETA | 5.1 | NORMA | ISO 527 | TIPO DE ENSAYO | TENSIÓN |
|  | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 3.336 | 207.432 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -54.079 | 262.139 | Masa | 0.0049212504 kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -147.454 | 68.619 | Área | 16123.5 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 6.286 | Volumen | 4921.23 mm ³ | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.318 | 15.000 | OBSERVACIONES: Presenta una distribución de esfuerzos uniforme en el centro de la probeta. El coeficiente de seguridad mínimo bastante alejado de 1 indica que, en algún lugar de la probeta, se produce una falla por fluencia. | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.001 | 0.057 | | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.063 | | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.032 | 0.000 | | | |
| Módulo de Tension [MPa] | 3657.508 | | | | |
| Resistencia a la tension | 2.124 | | | | |

Tabla 3.16 Resumen de resultados del patrón Rectilíneo ISO 604

[Elaboración propia]

| | | | | | |
|--------------------------|-----|-------------------------|---------|-----------------------|------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 5 | NOMBRE DE PATRON | | RECTILINEO | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 5.2 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | COMPRESIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|---------|--------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 1.035 | 67.831 |
| Primera tensión principal [MPa] | -25.824 | 30.705 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -87.437 | 11.028 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.317 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.973 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.019 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.010 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.021 | 0.000 |
| Módulo de compresión [MPa] | 3657.30 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

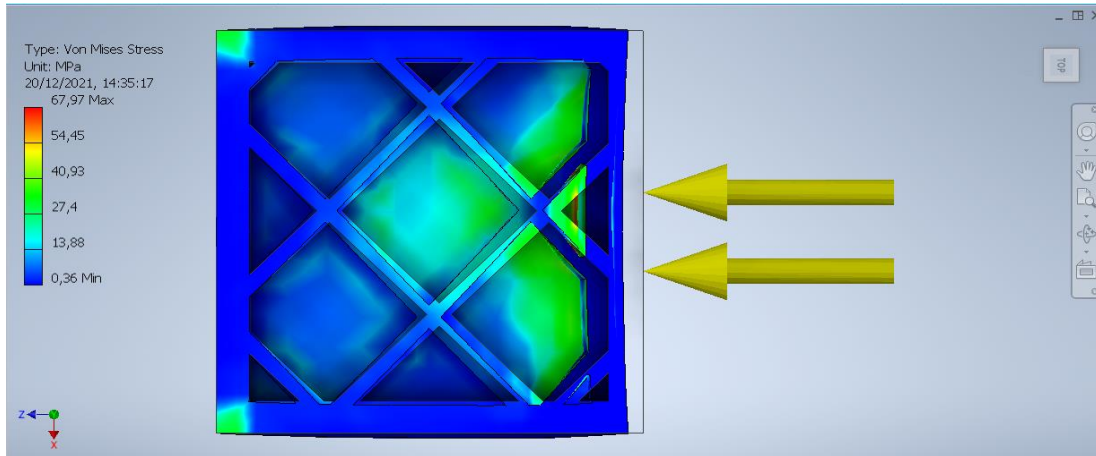
| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.0010908 kg |
| Área | 3469.09 mm ² |
| Volumen | 1090.8 mm ³ |

OBSERVACIONES:

Concentra los esfuerzos en la zona de aplicación de la fuerza.

Tabla 3.17 Resumen de resultados del patrón Rectilíneo ISO 604
[Elaboración propia]

| | | | | |
|--------------------------|-----|-------------------------|---------|-----------------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 5 | NOMBRE DE PATRON | | RECTILINEO |
| CÓDIGO DE PROBETA | 5.3 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO |
| | | | | COMPRESIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|---------|--------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.723 | 69.984 |
| Primera tensión principal [MPa] | -16.784 | 51.253 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -90.327 | 7.464 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.100 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.943 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.019 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.011 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.021 | 0.000 |
| Resistencia a la compresión | 2.72 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.000242004 kg |
| Área | 734.078 mm ² |
| Volumen | 242.004 mm ³ |

OBSERVACIONES:

No se distribuyen uniformemente los esfuerzos.

Tabla 3.18 Resumen de resultados del patrón Wiggle ISO 527
[Elaboración propia]

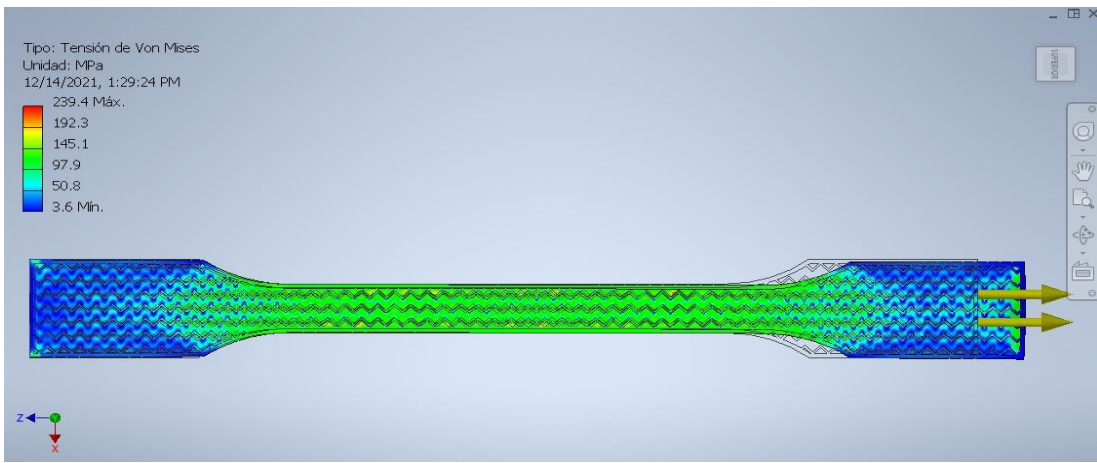
| | | | | | |
|---|---------------|---------------|--|-------------------------|---------|
| CÓDIGO DE PATRON | 6 | | NOMBRE DE PATRON | WIGGLE | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 6.1 | NORMA | ISO 527 | TIPO DE ENSAYO | TENSIÓN |
|  | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 3.603 | 239.440 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -69.427 | 319.879 | Masa | 0.00496207kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -157.301 | 105.037 | Área | 16609.2 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 6.231 | Volumen | 4932.07 mm ³ | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.276 | 15.000 | OBSERVACIONES: | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.001 | 0.065 | Muestra buena distribución, pero presenta concentradores de esfuerzos. | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.067 | | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.045 | 0.000 | | | |
| Módulo de Tension [MPa] | 3710.260 | | | | |
| Resistencia a la tension | 1.840 | | | | |

Tabla 3.19 Resumen de resultados del patrón Wiggle ISO 604
[Elaboración propia]

| | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------|---------------|--|--|-------------------------|------------|--|
| CÓDIGO DE PATRON | | 6 | | NOMBRE DE PATRON | | WIGGLE | |
| CÓDIGO DE PROBETA | | 6.2 | | NORMA | | ISO 604 | |
| | | | | TIPO DE ENSAYO | | COMPRESIÓN | |
| | | | | | | | |
| RESULTADOS: | | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | | Material | PLA | | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 1.448 | 50.524 | | Densidad | 1 g/cm ³ | | |
| Primera tensión principal [MPa] | -31.871 | 40.943 | | Masa | 0.00109162 kg | | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -78.372 | 13.087 | | Área | 3587.35 mm ² | | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.332 | | Volumen | 1091.62 mm ³ | | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 1.306 | 15.000 | | OBSERVACIONES: No muestra buena distribución de esfuerzos. | | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.014 | | | | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.009 | | | | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.016 | 0.000 | | | | | |
| Módulo de compresión [MPa] | 3572.61 | | | | | | |

Tabla 3.20 Resumen de resultados del patrón Wiggle ISO 604
[Elaboración propia]

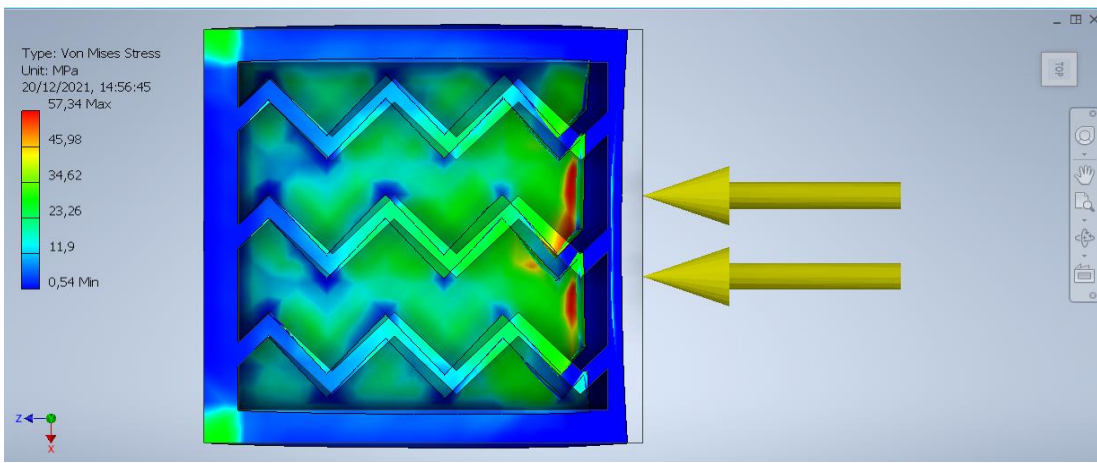
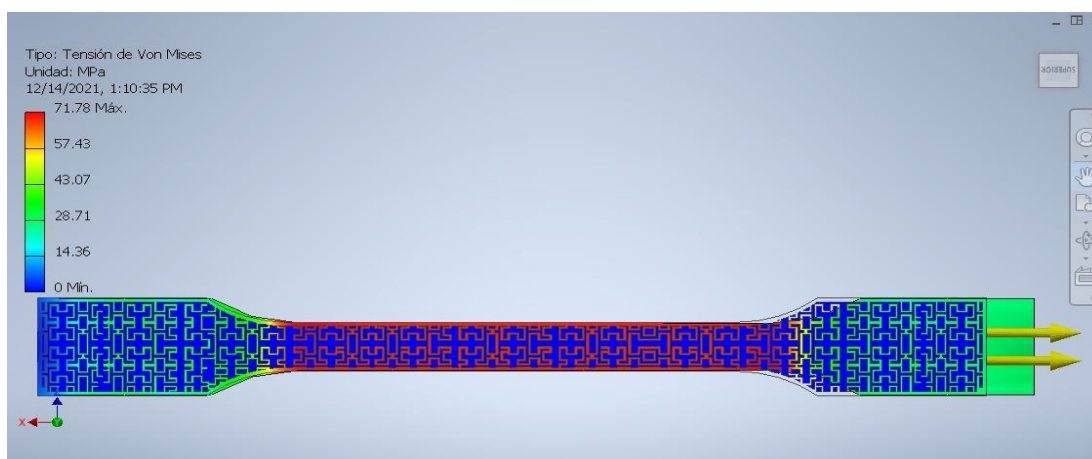
| | | | | | |
|---|---------------|---------------|---|-------------------------|------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 6 | | NOMBRE DE PATRON | WIGGLE | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 6.3 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | COMPRESIÓN |
|  | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.541 | 57.345 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -20.817 | 41.440 | Masa | 0.000242347 kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -74.214 | 13.299 | Área | 756.76 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.090 | Volumen | 242.347 mm ³ | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 1.151 | 15.000 | OBSERVACIONES: | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.016 | No muestra buena distribución de esfuerzos. | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.011 | | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.017 | 0.000 | | | |
| Resistencia a la compresión | 3.32 | | | | |

Tabla 3.21 Resumen de resultados del patrón Curva de Hilbert ISO 527

[Elaboración propia]

| | | | | | |
|--------------------------|-----|--------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 7 | | NOMBRE DE PATRON | | CURVA DE HILBERT |
| CÓDIGO DE PROBETA | 7.1 | NORMA | ISO 527 | TIPO DE ENSAYO | TENSIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|----------|--------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.000 | 71.782 |
| Primera tensión principal [MPa] | 0.000 | 72.971 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -6.940 | 22.635 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 2.568 |
| Coficiente de seguridad [su] | 0.919 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.019 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.021 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.008 | 0.000 |
| Módulo de Tension [MPa] | 3697.816 | |
| Resistencia a la tension | 6.139 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.0049217504 kg |
| Área | 16120.9 mm ² |
| Volumen | 4923.23 mm ³ |

OBSERVACIONES:

No se comporta bien en tensión
 No cumple criterio de Von Misses
 Tiene mejor distribución de esfuerzos
 No tiene buena resistencia

Tabla 3.22 Resumen de resultados del patrón Curva de Hilbert ISO 604
[Elaboración propia]

| | | | | | |
|------------------------------------|---------------|---------------|--|-------------------------|------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 7 | | NOMBRE DE PATRON | CURVA DE HILBERT | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 7.2 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | COMPRESIÓN |
| | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.709 | 128.177 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -41.258 | 80.536 | Masa | 0.00124266 kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -121.965 | 10.537 | Área | 4190.62 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.308 | Volumen | 1090.66 mm ³ | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.515 | 15.000 | OBSERVACIONES: No muestra concentradores de esfuerzo, pero alcanza grandes magnitudes de este. | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.034 | | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.028 | | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.031 | 0.000 | | | |
| Módulo de compresión [MPa] | 3724.23 | | | | |

Tabla 3.23 Resumen de resultados del patrón Curva de Hilbert ISO 604
[Elaboración propia]

| | | | | | |
|------------------------------------|---------------|-------------------------|--|-------------------------|------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 7 | NOMBRE DE PATRON | | CURVA DE HILBERT | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 7.3 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | COMPRESIÓN |
| | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.114 | 190.164 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -124.128 | 52.024 | Masa | 0.000267647 kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -273.755 | 8.476 | Área | 856.606 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.101 | Volumen | 242.35 mm ³ | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.347 | 15.000 | OBSERVACIONES: | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.052 | No muestra concentradores de esfuerzo. | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.031 | | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.056 | 0.000 | | | |
| Resistencia a la compresión | 1.00 | | | | |

Tabla 3.24 Resumen de resultados del patrón Giroide ISO 527

[Elaboración propia]

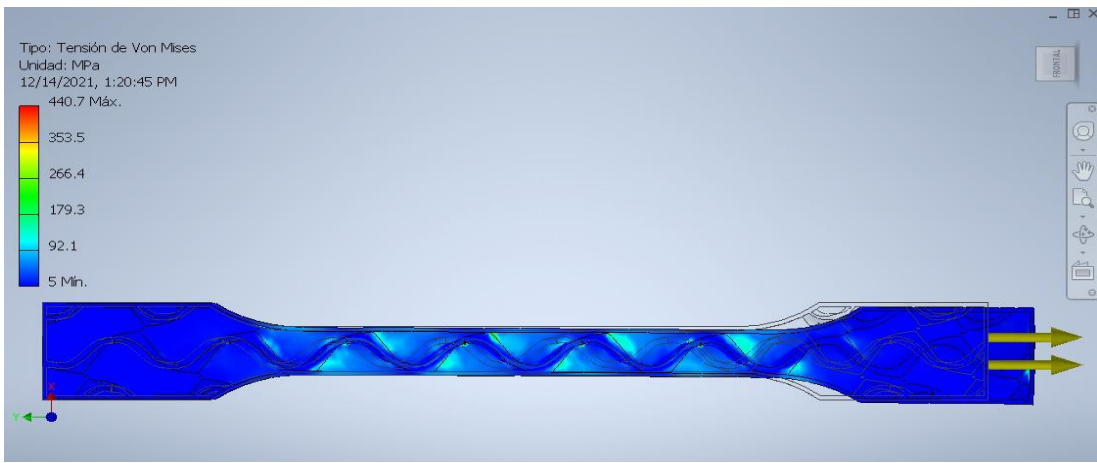
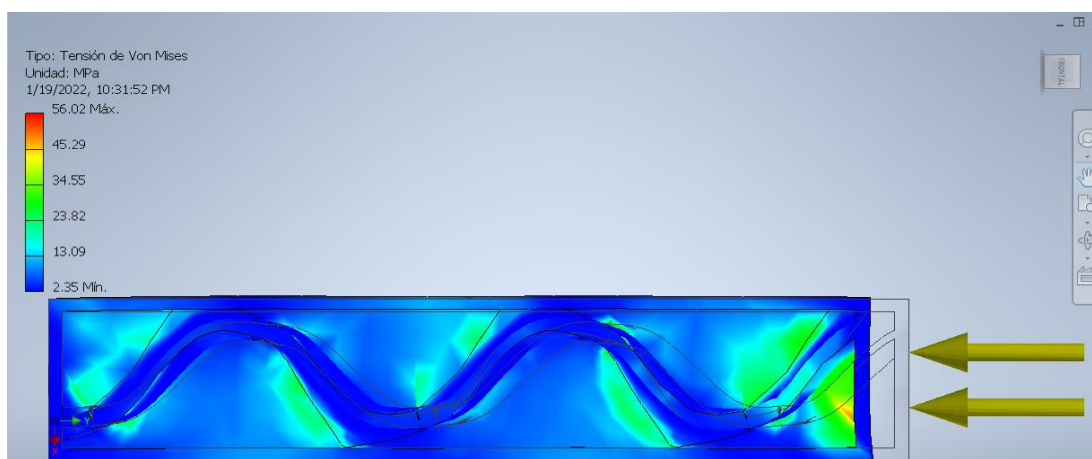
| CÓDIGO DE PATRON | | 8 | NOMBRE DE PATRON | | GIROIDE |
|---|---------------|---------------|---|-------------------------|---------|
| CÓDIGO DE PROBETA | 8.1 | NORMA | ISO 527 | TIPO DE ENSAYO | TENSIÓN |
|  | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 5.002 | 440.673 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -24.401 | 542.809 | Masa | 0.0047373640 kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -178.516 | 141.154 | Área | 12424.7 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 5.927 | Volumen | 4910.35 mm ³ | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.150 | 13.196 | OBSERVACIONES: Se distribuyen los esfuerzos a lo largo de la probeta. | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.002 | 0.121 | | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.133 | | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.071 | 0.000 | | | |
| Módulo de Tension [MPa] | 3660.292 | | | | |
| Resistencia a la tension | 1.000 | | | | |

Tabla 3.25 Resumen de resultados del patrón Giroide ISO 604

[Elaboración propia]

| | | | | |
|--------------------------|-----|-------------------------|---------|-----------------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 8 | NOMBRE DE PATRON | | GIROIDE |
| CÓDIGO DE PROBETA | 8.2 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO |
| | | | | COMPRESIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|---------|--------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 1.246 | 50.812 |
| Primera tensión principal [MPa] | -26.588 | 22.841 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -76.338 | 10.696 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.302 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 1.299 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.014 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.008 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.016 | 0.000 |
| Módulo de compresión [MPa] | 3649.45 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.00108304 kg |
| Área | 2812.28 mm ² |
| Volumen | 1087.04 mm ³ |

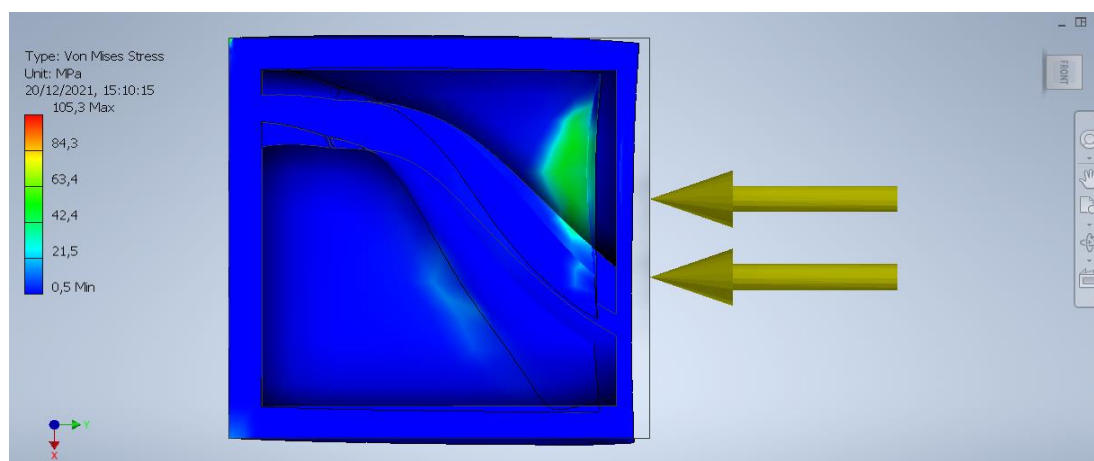
OBSERVACIONES:

Muestra mayores esfuerzos en la zona de aplicación de la fuerza, no se distribuyen.

Tabla 3.26 Resumen de resultados del patrón Giroide ISO 604

[Elaboración propia]

| | | | | |
|--------------------------|-----|-------------------------|---------|-----------------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 8 | NOMBRE DE PATRON | | GIROIDE |
| CÓDIGO DE PROBETA | 8.3 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO |
| | | | | COMPRESIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|----------|---------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.488 | 105.308 |
| Primera tensión principal [MPa] | -34.993 | 54.140 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -131.215 | 13.417 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.091 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.627 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.029 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.016 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.031 | 0.000 |
| Resistencia a la compresión | 1.81 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.000241287 kg |
| Área | 621.777 mm ² |
| Volumen | 241.45 mm ³ |

OBSERVACIONES:

No presenta observaciones relevantes.

Tabla 3.27 Resumen de resultados del patrón Concentrico ISO 527

[Elaboración propia]

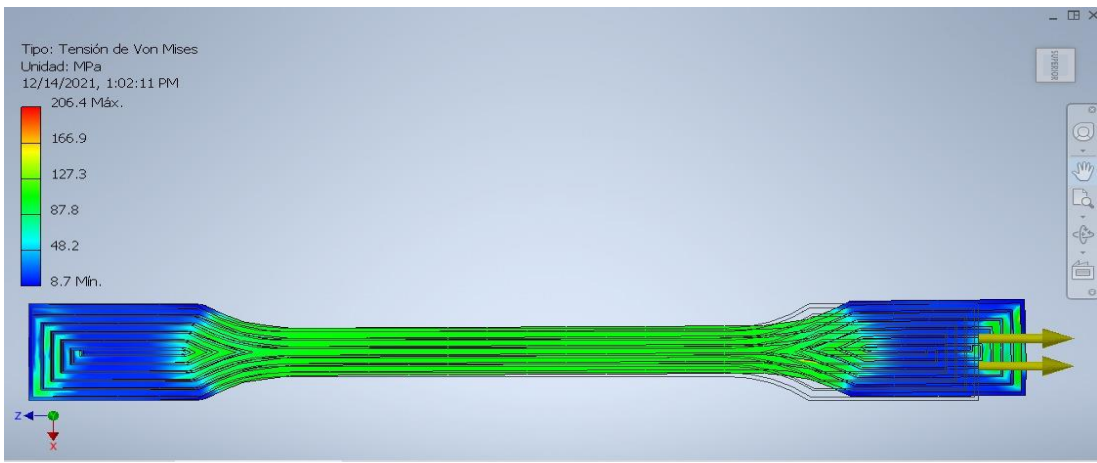
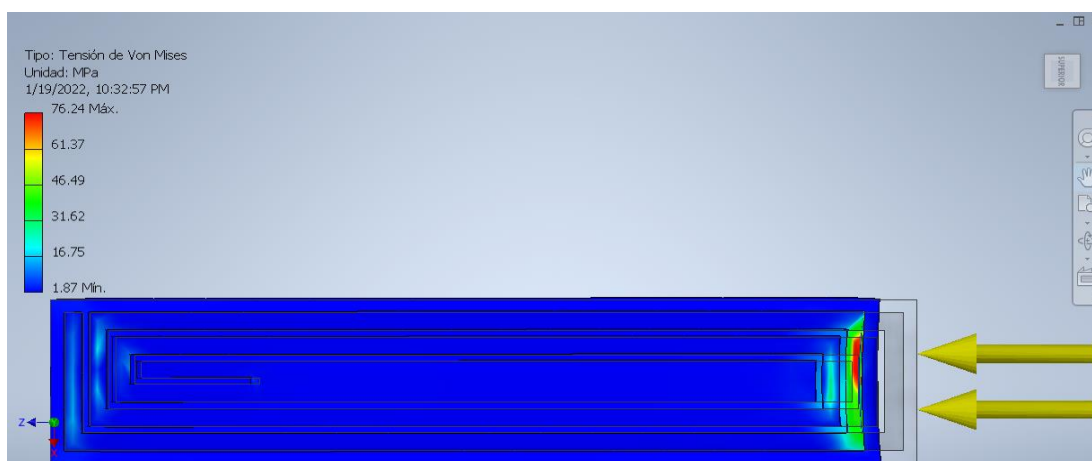
| CÓDIGO DE PATRON | | 9 | NOMBRE DE PATRON | | CONCENTRICO |
|---|---------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------|
| CÓDIGO DE PROBETA | 9.1 | NORMA | ISO 527 | TIPO DE ENSAYO | TENSIÓN |
|  | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 8.651 | 206.408 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -34.271 | 280.329 | Masa | 0.00492147 kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -105.715 | 51.307 | Área | 16670.4 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 5.218 | Volumen | 4921.48 mm ³ | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.320 | 7.629 | OBSERVACIONES: | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.003 | 0.057 | No presenta observaciones relevantes. | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.063 | | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.036 | 0.000 | | | |
| Módulo de Tension [MPa] | 3646.470 | | | | |
| Resistencia a la tension | 2.135 | | | | |

Tabla 3.28 Resumen de resultados del patrón Concéntrico ISO 604

[Elaboración propia]

| | | | | |
|--------------------------|-----|-------------------------|---------|-----------------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 9 | NOMBRE DE PATRON | | CONCENTRICO |
| CÓDIGO DE PROBETA | 9.2 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO |
| | | | | COMPRESIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|---------|--------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 1.873 | 76.240 |
| Primera tensión principal [MPa] | -21.099 | 32.292 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -99.217 | 12.042 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.284 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.866 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.001 | 0.021 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.012 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.022 | 0.000 |
| Módulo de compresión [MPa] | 3653.89 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.0010891 kg |
| Área | 3586.08 mm ² |
| Volumen | 1089.1 mm ³ |

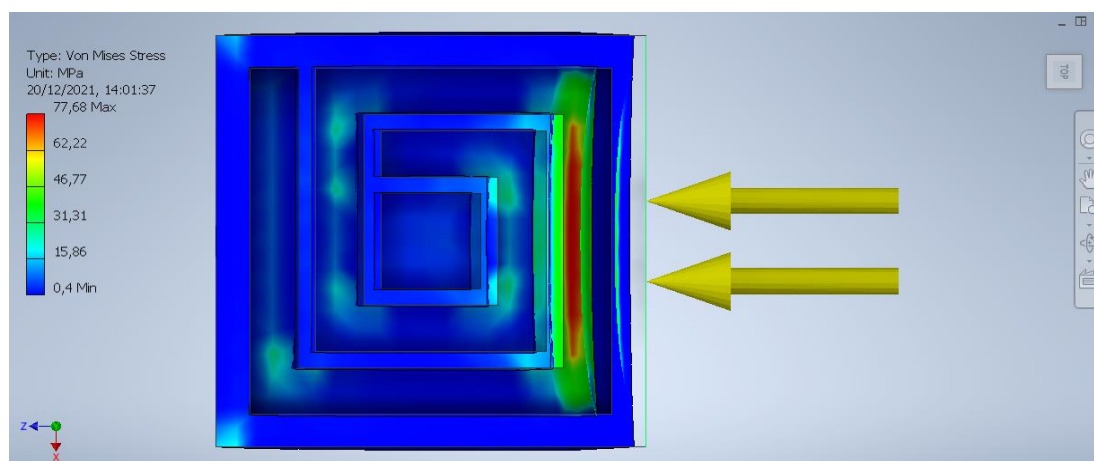
OBSERVACIONES:

No presenta observaciones relevantes.

Tabla 3.29 Resumen de resultados del patrón Concéntrico ISO 604

[Elaboración propia]

| | | | | |
|--------------------------|-----|-------------------------|---------|-----------------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 9 | NOMBRE DE PATRON | | CONCENTRICO |
| CÓDIGO DE PROBETA | 9.3 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO |
| | | | | COMPRESIÓN |



RESULTADOS:

| Nombre | Mínimo | Máximo |
|------------------------------------|----------|--------|
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.400 | 77.681 |
| Primera tensión principal [MPa] | -18.829 | 60.892 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -100.782 | 7.375 |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.109 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.850 | 15.000 |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.021 |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.014 |
| Tercera deformación principal [su] | -0.023 | 0.000 |
| Resistencia a la compresión | 2.45 | |

PROPIEDADES FÍSICAS:

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | PLA |
| Densidad | 1 g/cm ³ |
| Masa | 0.000241677 kg |
| Área | 761.152 mm ² |
| Volumen | 241.677 mm ³ |

OBSERVACIONES:

No presenta observaciones relevantes.

Tabla 3.30 Resumen de resultados del patrón Modelo Espol ISO 527
[Elaboración propia]

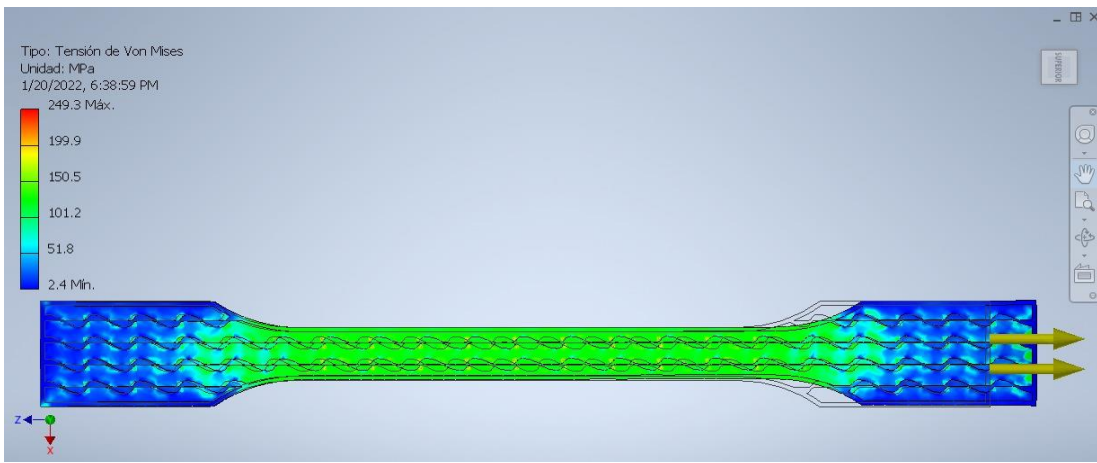
| CÓDIGO DE PATRON | | 10 | NOMBRE DE PATRON | | MODELO ESPOL |
|---|---------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------|
| CÓDIGO DE PROBETA | 10.1 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | TENSIÓN |
|  | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 2.446 | 249.273 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -32.3932 | 302.037 | Masa | 0.0049027 kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -115.132 | 59.668 | Área | 13578.1 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 5.634 | Volumen | 4909.9 mm ³ | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.265 | 15.000 | | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.001 | 0.068 | OBSERVACIONES: | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.075 | No presenta observaciones relevantes. | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.0433024 | 0.000 | | | |
| Resistencia a la compresión | 3683.062 | | | | |
| Resistencia a la tensión | 1.768 | | | | |

Tabla 3.31 Resumen de resultados del patrón Modelo Espol ISO 604
[Elaboración propia]

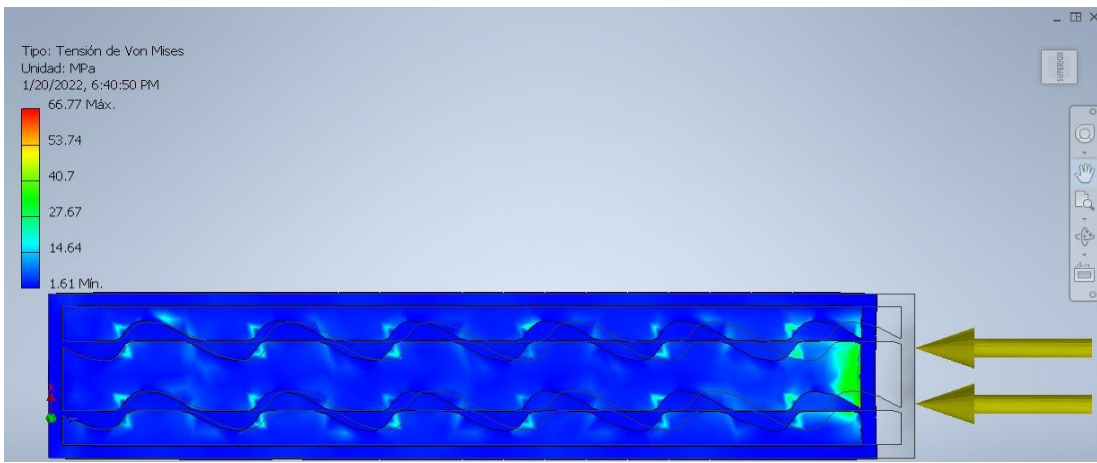
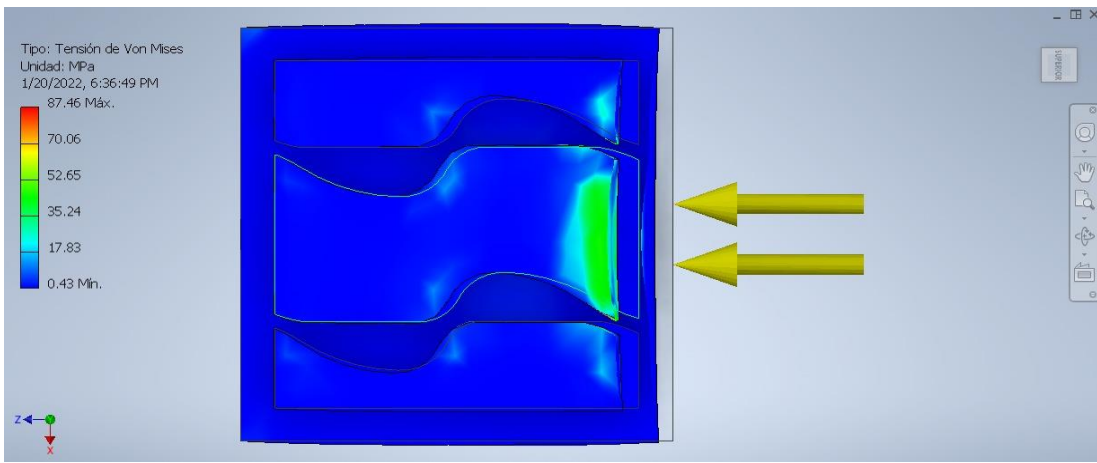
| | | | | | |
|---|---------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 10 | NOMBRE DE PATRON | | MODELO ESPOL | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 10.2 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | COMPRESIÓN |
|  | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 1.609 | 66.767 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -19.5307 | 42.332 | Masa | 0.00110163 kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -78.5291 | 6.622 | Área | 3025.24 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.296 | Volumen | 1092.12 mm ³ | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.989 | 15.000 | OBSERVACIONES: | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.018 | No presenta observaciones relevantes. | | |
| Primera deformación principal [su] | 0.000 | 0.010 | | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.0197828 | -0.000439979 | | | |
| Resistencia a la compresión | 3666.34 | | | | |

Tabla 3.32 Resumen de resultados del patrón Modelo Espol ISO 604
[Elaboración propia]

| | | | | | |
|---|----------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------|------------|
| CÓDIGO DE PATRON | 10 | | NOMBRE DE PATRON | MODELO ESPOL | |
| CÓDIGO DE PROBETA | 10.3 | NORMA | ISO 604 | TIPO DE ENSAYO | COMPRESIÓN |
|  | | | | | |
| RESULTADOS: | | | PROPIEDADES FÍSICAS: | | |
| Nombre | Mínimo | Máximo | Material | PLA | |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.425 | 87.463 | Densidad | 1 g/cm ³ | |
| Primera tensión principal [MPa] | -18.7072 | 49.440 | Masa | 0.00024307 kg | |
| Tercera tensión principal [MPa] | -91.178 | 9.455 | Área | 664.532 mm ² | |
| Desplazamiento [mm] | 0.000 | 0.089 | Volumen | 242.44 mm ³ | |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.755 | 15.000 | OBSERVACIONES: | | |
| Deformación equivalente [su] | 0.000 | 0.024 | No presenta observaciones relevantes. | | |
| Primera deformación principal [su] | -0.00000289687 | 0.014 | | | |
| Tercera deformación principal [su] | -0.0250461 | -0.0000393704 | | | |
| Resistencia a la compresión | 2.17 | | | | |

3.5.2 Resultados de ensayo de tensión en probetas con norma ISO 527

Tabla 3.33 Resumen de resultados de ensayo de tensión para cada probeta. [Elaboración propia]

| | HONEYCOMB | | GRID | | OCTAGRAM SPIRAL | | TRIANGULAR | | RECTILINEO | | WIGGLE | | CURVA DE HILBERT | | GIROIDE | | CONCENTRICO | |
|------------------------------------|-----------|-------|--------|-------|-----------------|-------|------------|-------|------------|-------|--------|-------|------------------|------|---------|-------|-------------|-------|
| | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 2.2 | 224.4 | 4.0 | 368.6 | 4.1 | 290.6 | 3.8 | 389.6 | 3.3 | 207.4 | 3.6 | 239.4 | 0.0 | 71.8 | 5.0 | 440.7 | 8.7 | 206.4 |
| Primera tensión principal [MPa] | -56.3 | 272.0 | -50.3 | 474.0 | -114.1 | 376.2 | -43.2 | 542.0 | -54.1 | 262.1 | -69.4 | 319.9 | 0.0 | 73.0 | -24.4 | 542.8 | -34.3 | 280.3 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -150.0 | 68.4 | -110.9 | 165.7 | -182.8 | 86.9 | -94.5 | 208.0 | -147.5 | 68.6 | -157.3 | 105.0 | -6.9 | 22.6 | -178.5 | 141.2 | -105.7 | 51.3 |
| Desplazamiento [mm] | 0.0 | 6.1 | 0.0 | 6.2 | 0.0 | 6.3 | 0.0 | 6.0 | 0.0 | 6.3 | 0.0 | 6.2 | 0.0 | 2.6 | 0.0 | 5.9 | 0.0 | 5.2 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 0.3 | 15.0 | 0.2 | 15.0 | 0.2 | 15.0 | 0.2 | 15.0 | 0.3 | 15.0 | 0.3 | 15.0 | 0.9 | 15.0 | 0.1 | 13.2 | 0.3 | 7.6 |
| Deformación equivalente [su] | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 |
| Primera deformación principal [su] | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 |
| Tercera deformación principal [su] | 0.0 | 0.0 | -0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Módulo de Tension [MPa] | 3666.9 | | 3682.8 | | 3654.2 | | 3611.8 | | 3657.5 | | 3710.3 | | 3697.8 | | 3660.3 | | 3646.5 | |
| Índice de resistencia a la tension | 2.0 | | 1.2 | | 1.5 | | 1.1 | | 2.1 | | 1.8 | | 6.1 | | 1.0 | | 2.1 | |

3.5.3 Resumen de resultados de ensayo de compresión en probetas con norma ISO 604 para módulo de compresión

Tabla 3.34 Resumen de resultados de ensayo de compresión para cada probeta obtenidos a través de la probeta larga.

[Elaboración propia]

| | HONEYCOMB | | GRID | | OCTAGRAM SPIRAL | | TRIANGULAR | | RECTILINEO | | WIGGLE | | CURVA DE HILBERT | | GIROIDE | | CONCENTRICO | |
|------------------------------------|-----------|------|--------|------|-----------------|------|------------|------|------------|------|--------|------|------------------|-------|---------|------|-------------|------|
| | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.8 | 58.2 | 1.7 | 57.8 | 1.3 | 57.4 | 1.2 | 44.4 | 1.0 | 67.8 | 1.4 | 50.5 | 0.7 | 128.2 | 1.2 | 50.8 | 1.9 | 76.2 |
| Primera tensión principal [MPa] | -20.0 | 33.5 | -16.3 | 33.2 | -15.1 | 29.8 | -12.8 | 27.5 | -25.8 | 30.7 | -31.9 | 40.9 | -41.3 | 80.5 | -26.6 | 22.8 | -21.1 | 32.3 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -71.7 | 8.4 | -66.3 | 13.5 | -66.7 | 11.7 | -54.6 | 9.4 | -87.4 | 11.0 | -78.4 | 13.1 | -122.0 | 10.5 | -76.3 | 10.7 | -99.2 | 12.0 |
| Desplazamiento [mm] | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.3 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 1.1 | 15.0 | 1.1 | 15.0 | 1.1 | 15.0 | 1.5 | 15.0 | 1.0 | 15.0 | 1.3 | 15.0 | 0.5 | 15.0 | 1.3 | 15.0 | 0.9 | 15.0 |
| Deformación equivalente [su] | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Primera deformación principal [su] | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Tercera deformación principal [su] | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Módulo de compresión [MPa] | 3679.4 | | 3718.4 | | 3667.6 | | 3683.0 | | 3657.3 | | 3572.6 | | 3724.2 | | 3649.5 | | 3653.9 | |

3.5.4 Resumen de resultados de ensayo de compresión en probetas con norma ISO 604 para resistencia a la compresión

Tabla 3.35 Resumen de resultados de ensayo de compresión obtenidos a través de la probeta corta.

[Elaboración propia]

| | HONEY COMB | | GRID | | OCTAGRAM SPIRAL | | TRIANGULAR | | RECTILINEO | | WIGGLE | | CURVA DE HILBERT | | GIROIDE | | CONCENTRICO | |
|---------------------------------------|------------|------|-------|------|-----------------|------|------------|------|------------|------|--------|------|------------------|-------|---------|-------|-------------|------|
| | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| Tensión de Von Mises [MPa] | 0.5 | 50.3 | 0.4 | 68.0 | 0.3 | 78.1 | 0.6 | 61.3 | 0.7 | 70.0 | 0.5 | 57.3 | 0.1 | 190.2 | 0.5 | 105.3 | 0.4 | 77.7 |
| Primera tensión principal [MPa] | -12.8 | 41.9 | -15.0 | 38.2 | -23.4 | 67.9 | -23.6 | 46.2 | -16.8 | 51.3 | -20.8 | 41.4 | -124.1 | 52.0 | -35.0 | 54.1 | -18.8 | 60.9 |
| Tercera tensión principal [MPa] | -65.0 | 8.0 | -78.9 | 5.2 | -102.0 | 8.1 | -78.4 | 6.4 | -90.3 | 7.5 | -74.2 | 13.3 | -273.8 | 8.5 | -131.2 | 13.4 | -100.8 | 7.4 |
| Desplazamiento [mm] | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 |
| Coefficiente de seguridad [su] | 1.3 | 15.0 | 1.0 | 15.0 | 0.8 | 15.0 | 1.1 | 15.0 | 0.9 | 15.0 | 1.2 | 15.0 | 0.3 | 15.0 | 0.6 | 15.0 | 0.8 | 15.0 |
| Deformación equivalente [su] | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Primera deformación principal [su] | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Tercera deformación principal [su] | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Índice de resistencia a la compresión | 3.8 | | 2.8 | | 2.4 | | 3.1 | | 2.7 | | 3.3 | | 1.0 | | 1.8 | | 2.4 | |

3.6 Comparación gráfica de resultados

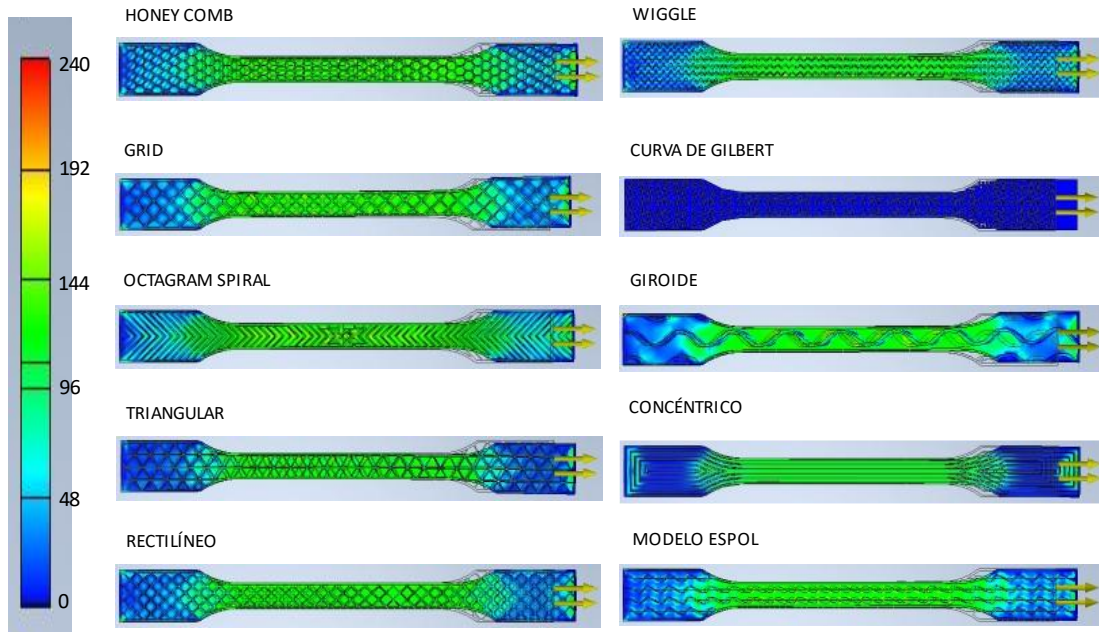


Figura 3.26 Mapa de tensiones de Von Misses para probetas ISO 527

[Elaboración propia]

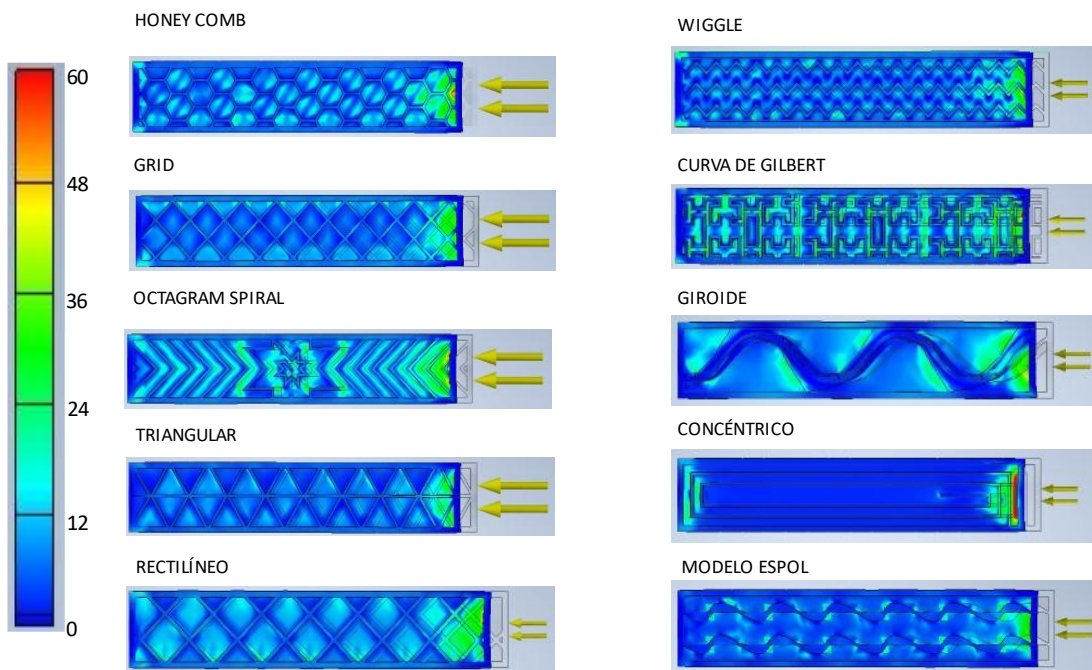


Figura 3.27 Mapa de tensiones de Von Misses para probetas ISO 604

[Elaboración propia]

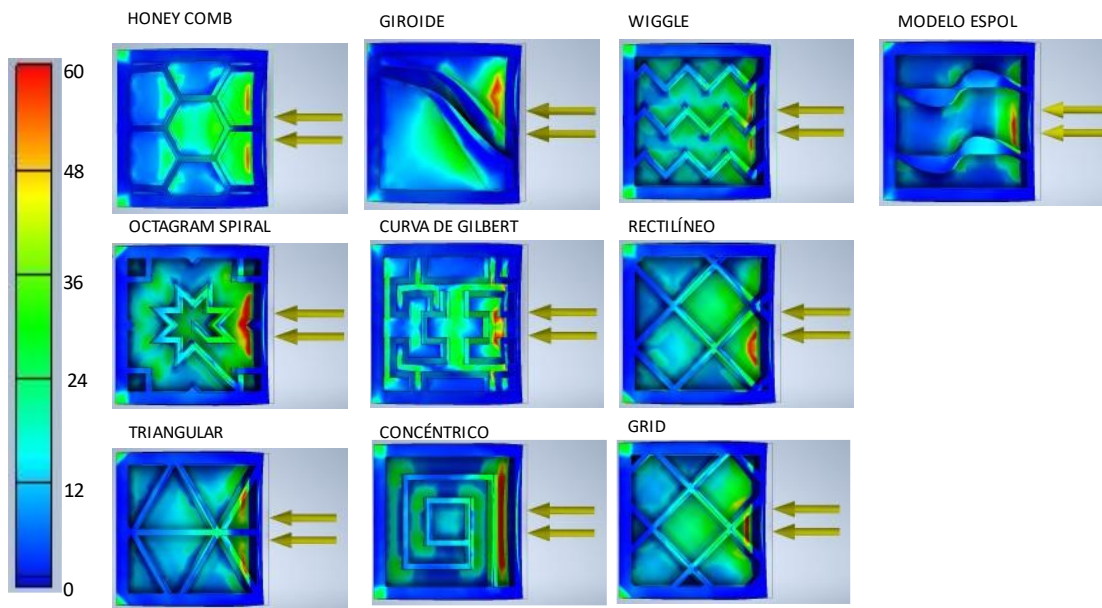
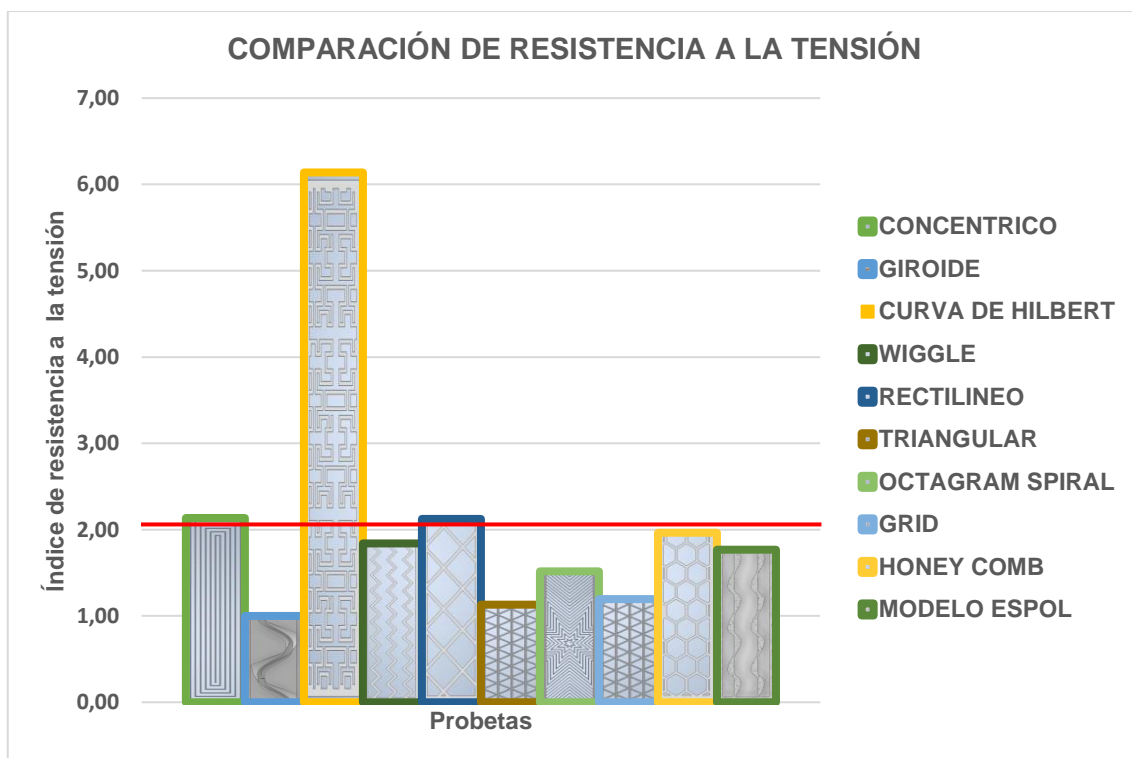
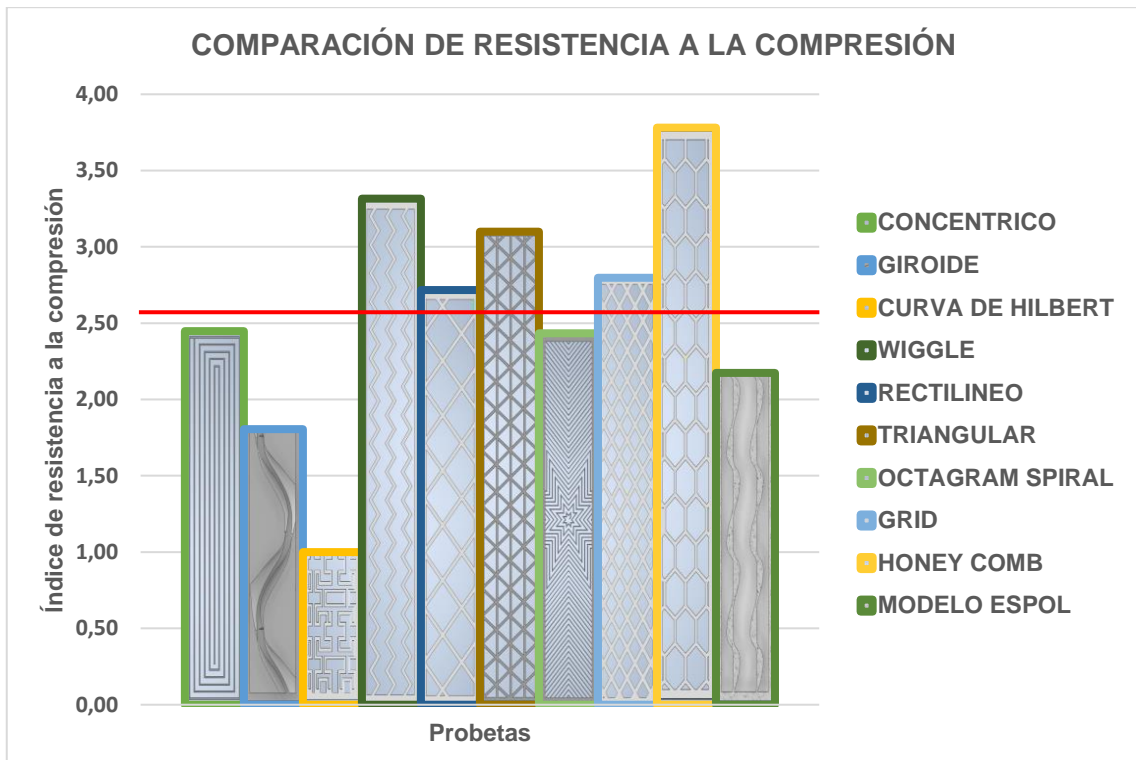


Figura 3.28 Mapa de tensiones de Von Mises para probetas ISO 604
[Elaboración propia]

3.7 Gráficas de comparación de resultados

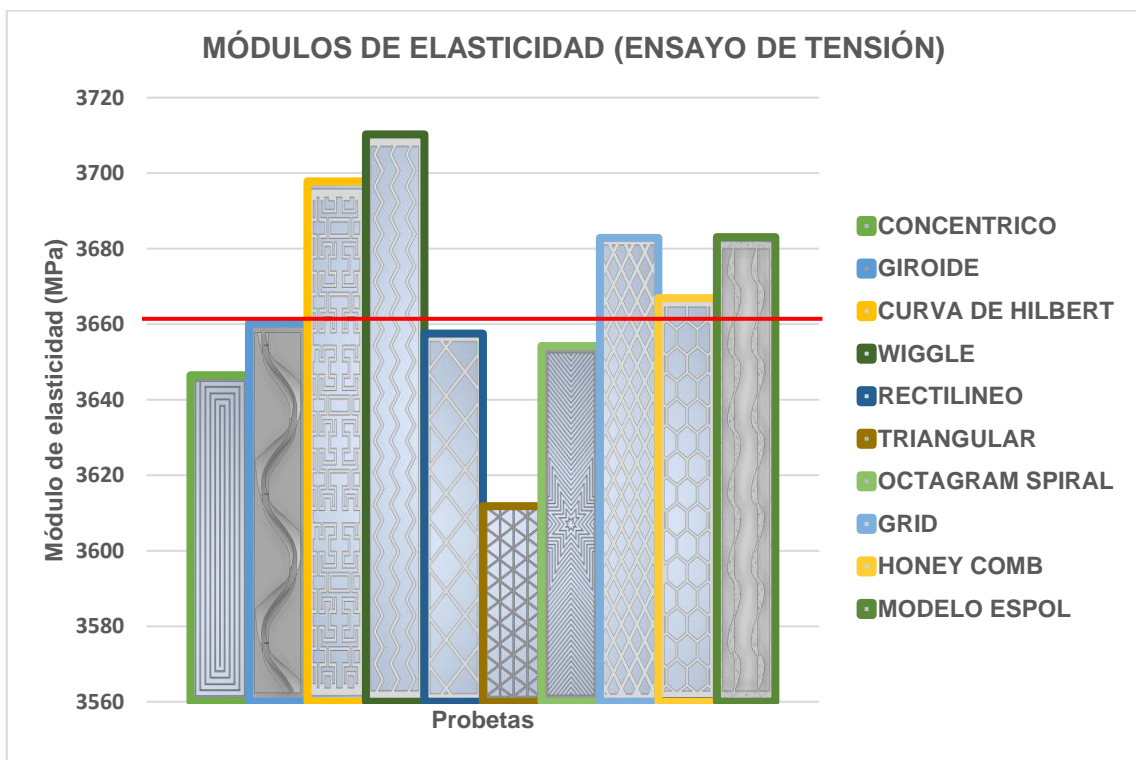


(a)

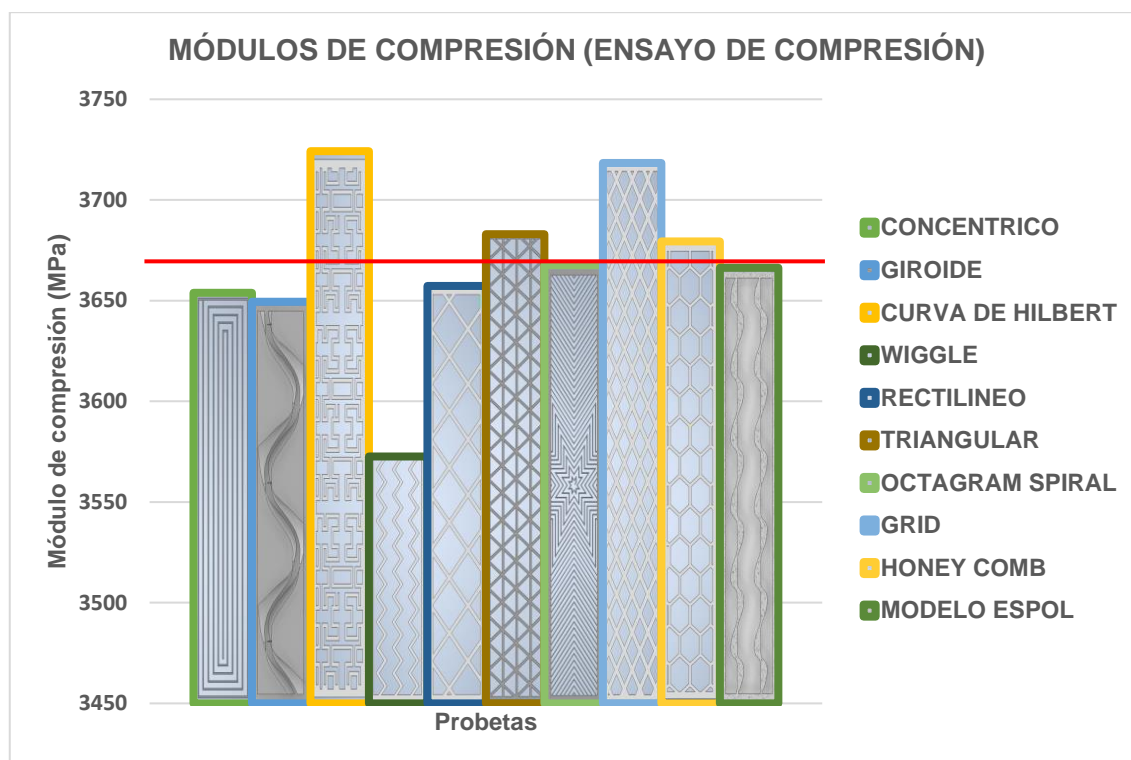


(b)

Figura 3.29 Índices de resistencia calculados para a) tensión y b) compresión
[Elaboración propia]



(a)



(b)

**Figura 3.30 a) Módulo de elasticidad y b) Módulo de compresión calculados
[Elaboración propia]**

En la figura 3.29 muestra los índices de resistencia calculados conforme a la ecuación 2.2 para cada probeta ensaya que comparan y ordenan los esfuerzos de Von Mises máximos encontrados, siendo el índice más alto correspondiente al esfuerzo de Von Mises más bajo resultante tanto para tensión como para compresión

3.8 Comparación de tiempos de impresión y cantidad de material

Finalmente, se simuló la impresión 3D de cada una de las probetas cortas elaboradas para el ensayo de compresión, como resultado se obtuvo la Tabla 3.5.

Tabla 3.36 Comparación de tiempos de impresión y longitud de filamento empleado de probetas ISO 604 [Elaboración propia]

| PATRÓN | TIEMPO DE IMPRESIÓN (MIN) | LONGITUD DE FILAMENTO (MM) | PESO DE PROBETA (G) |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|
| MODELO ESPOL | 2 | 1971.1 | 5.93 |
| WIGGLE | 2 | 2052.1 | 6.17 |
| HONEYCOMB | 2 | 2081.9 | 6.26 |
| CONCÉNTRICO | 2 | 2091.8 | 6.29 |
| TRIANGULAR | 2 | 2094.6 | 6.30 |
| OCTAGRAM SPIRAL | 2 | 2099.1 | 6.31 |
| RECTILINEO | 2 | 2116.9 | 6.36 |
| GRID | 2 | 2128.4 | 6.4 |

| | | | |
|------------------|---|--------|-------|
| CURVA DE HILBERT | 3 | 2592.1 | 7.79 |
| GIROIDE | 5 | 4370.2 | 13.14 |

3.9 Análisis de costos

Para determinar el costo ejecución del presente proyecto, se realizó un análisis en tres partes, donde se estimó el costo de activos tangibles, amortización de activos intangibles y costo de mano de obra. A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo para cada rubro.

3.9.1 Activos tangibles

Dentro de esta clasificación se encuentran todos los equipos tangibles utilizados para llevar a cabo el estudio, el costo del hardware requerido descrito en la sección de metodología, que consiste en una computadora con características mínimas de memoria y procesamiento se estima en 1951.00 USD.

Entonces, la depreciación anual del equipo, considerando su vida útil se obtiene según la ecuación:

$$Depreciación\ anual = \frac{Costo\ total\ del\ activo}{Número\ de\ años\ de\ vida\ útil} \quad (3.3)$$

Se asume que la vida útil de este equipo es de 5 años, por lo tanto, aplicando la ecuación 3.0:

$$Depreciación\ anual = \frac{1951\ USD}{5} = 390.20\ USD$$

Con este valor conocido, es posible obtener el costo por hora que se generará utilizando la computadora una cantidad conocida de horas al año, se cumple la siguiente relación.

$$Costo\ máquina/hora = \frac{Depreciación\ anual}{Horas\ activas} \quad (3.4)$$

Calculando el costo-hora máquina a partir del supuesto en el que se utiliza la máquina durante las 8 horas de todos los 240 días laborables del año calendario, esto es 1920 horas.

$$\text{Costo } \textit{m}{\acute{a}}\textit{quina}/\textit{hora} = \frac{390.20 \text{ USD}}{1920} = 0.203 \text{ USD/h}$$

Finalmente, se obtuvo el valor total considerando las horas totales de operación del equipo para llevar cabo las simulaciones.

$$\text{Costo total} = \text{Costo } \textit{m}{\acute{a}}\textit{quina}/\textit{hora} * \textit{Tiempo de operación (h)}$$

$$\text{Costo total} = 0.203 \frac{\text{USD}}{\text{h}} * 120\text{h} = 24.36\text{USD}$$

Luego de realizar todos los cálculos, se obtienen los resultados a continuación.

Tabla 3.37 Resumen de costos de activos tangibles del proyecto
[Elaboración propia]

| Activos tangibles | Cant. | Costo estimado [USD] | Costo [USD] /hora [h] | Tiempo de operación [h] | Costo total USD |
|-------------------|-------|----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------|
| Computadora | 1 | 1951.00 USD | 0.203 USD/h | 120h | 24.36 USD |
| Total | | | | | 24,36 USD |

3.9.2 Activos intangibles

Dentro de esta clasificación se encuentran todos los equipos intangibles utilizados para llevar a cabo el estudio, para este caso, todos los softwares utilizados desde el diseño hasta la simulación de las probetas.

La depreciación anual de la licencia del software, considerando su vida útil se obtiene según la ecuación:

$$\text{Depreciación mensual} = \frac{\text{Costo total del activo}}{\text{Número de meses de vida útil}} \tag{3.5}$$

La duración de la licencia para cada software es de 1 año, por lo tanto, aplicando la ecuación 3.2 para el caso de la licencia de Autodesk Inventor:

$$\text{Depreciación mensual} = \frac{2190 \text{ USD}}{12} = 182.5 \text{ USD}$$

Con este valor conocido, es posible obtener el costo por hora que se generará utilizando el programa una cantidad de horas conocida al mes, se cumple la siguiente relación.

$$\text{Costo}/\textit{hora} = \frac{\text{Depreciación mensual}}{\textit{Horas de operación mensual}}$$

(3.6)

Asumiendo que se trabajará 8 horas diarias por 20 días al mes, se estima una cantidad de 160 horas el mes.

$$\text{Costo/hora} = \frac{182.5 \text{ USD}}{160 \text{ h}} = 1.14 \frac{\text{USD}}{\text{h}}$$

Finalmente, se obtuvo el valor total de la amortización considerando las horas de operación del programa para realizar los diseños, en total 40 horas.

$$\text{Amortización} = \text{Costo/hora} * \text{Tiempo de operación (h)}$$

$$\text{Amortización} = 1.14 \frac{\text{USD}}{\text{h}} * 40\text{h} = 45.60 \text{ USD}$$

Luego de realizar todos los cálculos, se obtienen los resultados a continuación.

Tabla 3.38 Resumen de costos de activos intangibles del proyecto
[Elaboración propia]

| Activos intangibles | Cant. | Costo estimado [USD] | Costo [USD] /hora [h] | Tiempo de operación [h] | Amortización USD |
|----------------------------|-------|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|
| Licencia Autodesk Inventor | 1 | 2190.00 USD | 1.14 USD/h | 40h | 45.60 USD |
| Licencia Autodesk Nastran | 1 | 2855.00 USD | 1.49 USD/h | 80h | 118.96 USD |
| Total | | | | | 164,56 USD |

3.9.3 Costo mano de obra

Para obtener el costo de la mano de obra del diseñador se aplicó el supuesto de que el sueldo mensual, más beneficios, del diseñador calificado para usar el software profesional aplicado en el proyecto es 1100.00 USD.

$$\text{Costo hora – hombre} = \frac{\text{Sueldo mensual}}{\text{Horas de trabajo mensuales}}$$

$$\text{Costo hora – hombre} = \frac{1100 \text{ USD}}{160 \text{ hora}} = 6.87 \frac{\text{USD}}{\text{h}}$$

Donde el costo total de mano de obra para llevar a cabo este proyecto resultaría finalmente:

$$\text{Costo mano de obra} = \text{Costo hora} - \text{hombre} * \text{Tiempo de operación (h)}$$

$$\text{Costo mano de obra} = 6.87 \frac{\text{USD}}{\text{h}} * 120\text{h} = 825 \text{ USD}$$

Tabla 3.39 Resumen de costos de mano de obra
[Elaboración propia]

| Mano de obra | Cant. | Costo estimado [USD] | Costo [USD] /hora [h] | Tiempo de operación [h] | Costo total USD |
|----------------------|-------|----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| Diseñador calificado | 1 | 1100.00 USD | 6.87 USD/h | 120h | 825 USD |
| Total | | | | | 825 USD |

3.9.4 Costo del proyecto

Finalmente, totalizando todos los rubros antes obtenidos, se obtuvo el costo final del proyecto, mostrado en la tabla a continuación.

Tabla 3.40 Costo total del proyecto
[Elaboración propia]

| Activo | Costo [USD] |
|---------------------|--------------------|
| Activos tangibles | 24.36 USD |
| Activos intangibles | 164.56 USD |
| Mano de obra | 825.00 USD |
| Total | 1013.92 USD |

3.10 Análisis de resultados

Para el análisis de los resultados, se utilizó un valor de presión fijo para las probetas en cuestión el cual fue de 9MPa para el caso del ensayo con la norma ISO 604 de compresión tanto para obtener tanto el módulo como la resistencia a la compresión y una presión de 33 MPa para los ensayos de tensión siguiendo la norma ISO 527, en el cual se obtuvo gráficas que indicaron el comportamiento de cada una de las probetas y en

donde se pudo identificar algunas de sus características mecánicas tales como el módulo de compresión. Se pudo obtener índices se tanto de resistencia como de rigidez, lo que permitió comprar la resistencia de los modelos de relleno entre sí, permitiendo identificar al mejor modelo en base al comportamiento en los dos tipos de ensayos realizados destacando el patrón rectilíneo, que presentó un comportamiento neutral en los dos tipos de ensayos, se mantuvo dentro del promedio de los valores de módulos de compresión y tensión, así como en los índice de resistencia a diferencia de los demás modelos que si bien tenían un buen comportamiento en el ensayo de tensión, su comportamiento disminuía en el ensayo de compresión y de igual manera de manera opuesta.

Debido a que los resultados obtenidos de las simulaciones permitían analizar la tensión de Von Misses, se examinó en el ensayo de tensión, el valor mayor, donde se puede entender que existirá la fluencia. En las gráficas 3.1 (a) y 3.1 (b), el patrón de relleno Curva de Hilbert presentó una tensión de Von Misses en baja en el ensayo de compresión, pero un valor alto en el ensayo por tensión, por otro lado, el patrón de relleno HoneyComb mostró el mayor valor de todos los modelos ensayados en compresión. Por otra parte, los patrones de relleno concéntrico y rectilíneo mantuvieron resultados promedio en las tensiones de Von Misses tanto de tensión como de compresión frente a los demás patrones los cuales se comportaban de buena manera en un ensayo, pero su comportamiento decaía en el ensayo opuesto.

En los resultados mostrados en las gráficas 3.2 (a) y 3.2 (b) las cuales muestran índices del módulo de elasticidad, medida que permite dar una idea de la rigidez de cada uno de los modelos, es decir que un material es más rígido porque su módulo de elasticidad es mayor, se puede destacar el patrón de relleno Wiggle que, en tensión, presenta un valor de rigidez alto, por el hecho de ser un patrón en zigzag no se deforma tanto como los demás patrones. Estas gráficas permitieron notar que los modelos que se comportaban bien en tensión tenían un comportamiento malo en compresión y viceversa. Además, se pudo notar que, tanto en tensión como en compresión el modelo de relleno Rectilíneo mantuvo el valor del módulo elasticidad y de compresión en una cantidad promedio.

En base a los módulos hallados, se pudo definir la rigidez de cada patrón, donde se observó aquellos que mostraban un comportamiento bueno en tensión, su comportamiento en compresión fue bajo, y de igual manera en viceversa.

Los resultados obtenidos mostraron que los patrones tales como rectilíneo, concéntrico, honeycomb, con geometrías formadas por líneas rectas que están organizadas y tiene contacto en las 4 paredes de la probeta funcionan mejor en compresión que en tensión. Gracias a los resultados obtenidos se pudo evidenciar que el porcentaje de relleno, así como patrón de relleno tiene un impacto significativo en los ensayos de tensión, pues dependiendo de cómo el material se distribuye dentro de la probeta se puede obtener un módulo de compresión mayor, en el caso de geometrías que se distribuyen por todas las paredes de la probeta y menor en modelos que no tienen mucho contacto con las probetas, y de la misma manera en viceversa. (Suteja & Soesanti, 2019).

Partiendo de estos resultados, se pudo determinar las características que debería presentar el nuevo patrón de relleno propuesto para que presente buen desenvolvimiento tanto en los ensayos de tensión como de compresión. Para definir el diseño del nuevo patrón al que se lo denominó MODELO ESPOL, se consideró una forma suave en su forma, tomando base el logo Espol actual, se eliminaron concentradores de esfuerzo y se descartó que posea una forma espiral ya que esta geometría tenía un rendimiento bajo en los ensayos de tensión y compresión realizados en comparación con los demás modelos. Asimismo, se debe descartar el uso de geometrías aleatorias como la curva de Hilbert puesto que solo destacarán en tu tipo de ensayo mientras que en opuesto su rendimiento disminuirá (Pandžić, Hodzic, & Milovanović, 2019)

En la tabla 3.6 se puede observar los tiempos de impresión, longitud de filamento y la cantidad de material en gramos, empleado en la impresión de las probetas, donde los valores rondan entre 5 y 7 gramos, pero se puede notar una diferencia grande en la cantidad de material utilizado para el patrón Giroide, el cual es dos veces la cantidad de material utilizado en los demás patrones. Si bien es cierto, el porcentaje de relleno utilizado para todas las probetas es del 20%, esta variación se debe porque específicamente al momento de imprimir el Giroide, a diferencia de las demás geometrías que son rectas, este debe rellenarse, por lo que el material se encuentra compactado. Sin embargo, se sigue cumpliendo la condición del 20% de relleno puesto que el espacio que ocupa el material es un 20% de todo el volumen de la probeta, lo que nos indica que este patrón de relleno consume mucho material y el tiempo de impresión es mayor con respecto a los demás, por lo que no es eficiente en cuanto a costos, y tiempo de impresión.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el fin de comparar diez tipos de patrones de relleno de impresión 3D convencionales, incluyendo dentro de ellos un nuevo patrón propuesto, mediante simulación computarizada de ensayos efectuados en probetas diseñadas a través de dibujo asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés), para analizar su comportamiento frente a cargas unidireccionales tanto en tensión como en compresión y determinar así sus propiedades mecánicas y físicas, se comparó su módulo de compresión, módulo de tensión, resistencia a la compresión y resistencia a la tensión, para determinar cuál o cuáles de los patrones presenta mejor comportamiento. Adicional a ello, se propuso un nuevo modelo a partir de características que fueron identificadas como favorables en los modelos convencionales ensayados cuyas propiedades también fueron reportadas y comparadas con las demás.

En esta sección se presenta la interpretación de los resultados obtenidos de las simulaciones de probetas elaboradas a partir de la norma ISO 604 y la norma ISO 527-2, para los ensayos de compresión y tensión respectivamente de plásticos, en este caso del PLA, material comúnmente utilizado en la impresión 3D por FDM, incluyendo un modelo propuesto, obteniendo como resultado los índices de resistencia y rigidez para cada patrón, permitiendo establecer bajo qué condiciones dinámicas se recomienda la selección de cada patrón al momento de diseñar una pieza impresa en 3D.

4.1 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos mediante las simulaciones y al análisis realizado, se llegó las siguientes conclusiones:

1. Debido a que los patrones con geometrías espirales no presentaron buenas propiedades mecánicas en los resultados tanto de compresión como tensión, a diferencia de los patrones de relleno con geometrías recta, se concluye que no deberían ser utilizados en aplicaciones que exijan gran resistencia tanto a la tensión y compresión

2. Dado que Curva de Hilbert presenta la mayor tensión de Von Misses y que sus esfuerzos se distribuyen uniformemente en el ensayo de tensión, se considera como el patrón con mejor comportamiento de propiedades mecánicas en tensión con respecto a los demás patrones analizados, por lo tanto, en aplicaciones que impliquen esfuerzos de tensión, sería el idóneo para el relleno de la pieza u objeto.
3. El patrón HoneyComb presentó tensiones de Von Misses mayores a las de los demás patrones en el ensayo de compresión, y debido a su forma geométrica resulta como el mejor patrón en los ensayos de compresión a diferencia de los demás patrones de relleno, por lo que puede seleccionarse sobre los demás en aplicaciones que requieran mayor resistencia a la compresión.
4. Patrones de relleno como concéntrico, rectilíneo, HoneyComb y Grid, que presentan en su geometría líneas rectas distribuidas en toda la probeta mostraron un comportamiento promedio tanto en tensión como en compresión, por lo que son patrones que pueden usarse en aplicaciones que requieran resistencia a la tensión y a la compresión a la vez.
5. El patrón rectilíneo destacó sobre los demás en su comportamiento mecánico tanto en tensión como en compresión a la vez, por lo que es el idóneo en usarse en piezas que sean sometidas a esfuerzos de tensión y compresión
6. El patrón que demostró eficiencia en recursos y tiempo es el Modelo ESPOL, sin embargo, deben realizarse pruebas físicas para comprobar su eficiencia.
7. De acuerdo con las comparaciones de parámetros mecánicos, físicos y económicos, el patrón que demostró mayor optimización de recursos y tiempo, garantizando propiedades mecánicas neutrales, es el Modelo ESPOL, sin embargo, deben realizarse pruebas físicas para comprobar su eficiencia.
8. El patrón Giroide, mostró un mayor gasto en tiempo y recursos sobre los demás modelos debido a su estructura, pues compacta más cantidad de material, a pesar de que mantiene el porcentaje de relleno igual que los demás patrones, por lo que resulta ser el modelo menos eficiente.

4.2 Recomendaciones

1. Para corroborar los resultados obtenidos mediante simulación de los patrones de relleno, se recomienda que sean realizados de manera física, utilizando equipos para ensayos de tensión y compresión aplicando las normas usadas en el presente trabajo de titulación.
2. Para probar la eficacia del nuevo modelo propuesto, es necesario que se realicen ensayos físicos tanto de tensión como de compresión para comparar los resultados con los obtenidos por ensayos físicos realizados de los demás patrones de relleno existentes.
3. Las recomendaciones para proponer nuevos patrones de relleno que se sugiere seguir son de descartar patrones con geometrías espirales pues que su rendimiento no es alto como el de geometría rectas, también suavizar las curvas del modelo en caso de incluirlas y eliminar los concentradores de esfuerzos procurando que estos esfuerzos se distribuyan a lo largo de la probeta de manera uniforme para obtener buen comportamiento de propiedades mecánicas tanto en ensayo de compresión y tensión a la vez. Asimismo, descartar el uso de geometrías que aleatorias que solo destacarán en un tipo de ensayo.
4. Se recomienda utilizar PLA con características similares a las presentadas en el presente trabajo de titulación, para que no existan discrepancias en los resultados obtenidos por simulación con los que se obtendrán en pruebas físicas.
5. En este trabajo solo se hace simulación a probetas en un solo sentido, por lo que para trabajos futuros se debe realizar trabajos en las 3 direcciones de las probetas, además se sugiere variar la orientación de impresión para conocer la variación de las propiedades mecánicas de cada uno de los patrones de relleno.
6. El proyecto de titulación, al ser en modalidad virtual y se hizo uso de herramientas digitales tales como programas de simulación como fue Inventor y Nastran, el costo fue relativamente bajo, sin embargo, si se desea realizarlo mediante pruebas físicas, estas incluirán costos adicionales, tales como ensayos físicos y la cantidad de ensayos a realizarse aumentará, elevando el costo del desarrollo del proyecto, por lo que se sugiere realizar

un análisis de costos para tener una idea de la cantidad de recursos económicos antes de empezarlo.

7. Se sugiere analizar el comportamiento de cada uno de los patrones de relleno más allá de su zona elástica llegando hasta la ruptura para conocer el alcance que tienen las probetas, puesto que mediante el programa utilizado en el presente trabajo no se pudo identificar el punto de ruptura de cada una de las probetas.

BIBLIOGRAFÍA

- 3Dnatives. (16 de enero de 2022). *Portal líder de la impresión 3D en español*. Obtenido de Imprimalia 3D: <http://imprimalia3d.com/recursosimpresion3d/gu-configuraci-n-par-metros-slic3r>
- Beyerlein , Sophian ; Aboushama, Mostafa. (2020). *Evaluación de las impresoras 3D de escritorio con refuerzo continuo de fibra Descripción general de las impresoras 3D de escritorio*.
- Blanco, A. M. (2019). *The Polytechnic University of Catalonia*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/2117/132772/1/TAMB1de2.pdf>
- Cervera Ruiz, M., & Blanco Díaz, E. (2002). *Mecánica de estructuras*. Cataluña: Edicions UPC.
- G., J., & R., O. (Diciembre de 2014). Impresión 3D en la Industria: Un acercamiento a la tecnología y su influencia en la Industria Petrolera. *SCIELO*, 18. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212014000400003
- Goldschmidt, B. (21 de Abril de 2021). *CRAFTCLOUD*. Obtenido de ALL3DP: <https://all3dp.com/es/2/infill-cura-relleno-impresion-3d/>
- Internacional Organization for Standardization. (Marzo de 2002). *ISO*. Obtenido de ISO 604:2002: <https://www.iso.org/standard/31261.html>
- Internacional Organization for Standardization. (febrero de 2012). *ISO*. Obtenido de ISO 527-2:2012: <https://www.iso.org/standard/56046.html>
- Kareem, F., & Prawin, M. (2022). *investigation on applications of additive manufacturing of electrical machine*. doi:10.1016/j.matpr
- Pacheco Carpio, G. (2019). *Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS, Y PLA/MLO*. Cuenca - Ecuador.
- Pandžić, A., Hodzic, D., & Milovanović, A. (October de 2019). EFFECT OF INFILL TYPE AND DENSITY ON TENSILE PROPERTIES OF PLA MATERIAL FOR FDM PROCESS. *30 DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. Zadar: DAAAM International. doi:10.2507/30th.daaam.proceedings.074
- Rodríguez, M. (2017). *Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM*. Cataluña.

Serna, L., & Albán, F. (2011). *Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones* (Vol. V).

Smith , W. (2006). *Fundamentos de la Ciencia e ingeniería de Materiales*. McGraw-Hill.

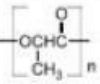
Suteja, T. J., & Soesanti, A. (2019). Mechanical Properties of 3D Printed Polylactic Acid Product for Various Infill Design Parameters: a Reviw. *Journal of Physics: Conference Series*. doi:10.1088/1742-6596/1569/4/042010

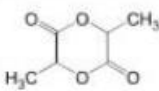
APÉNDICES

APÉNDICE A: FICHAS TÉCNICAS DE MATERIALES

PLA

PLA poly(lactic acid)

| PARAMETER | UNIT | VALUE | REFERENCES |
|--------------------|------|---|---|
| GENERAL | | | |
| Common name | - | poly(lactic acid) | |
| CAS name | - | poly[oxy(1-methyl-2-oxo-1,2-ethanediy)]]; 1,4-dioxane-2,5-dione, 3,6-dimethyl-, homopolymer | |
| Acronym | - | PLA | |
| CAS number | - | 51063-13-9, 26680-10-4, 34346-01-5 | |
| Formula | |  | |
| HISTORY | | | |
| Person to discover | - | Carother, W H; Dourough, G L; Van Natta F J. Filachione, E M | Carother, W H; Dourough, G L; Van Natta F J, J. Am. Chem. Soc., 54, 761-72, 1932; Filachione, E M, US Patent 2.396.994, USA, Mar. 19, 1946. |
| Date | - | 1932, 1946 | |
| Details | - | first synthesis by DuPont scientists; lactic acid was polymerized in the presence of p-toluenesulfonic acid | |

| | | | |
|--|--------------------|---|--|
| SYNTHESIS | | | |
| Monomer(s) structure | - |  | |
| Monomer(s) CAS number(s) | - | 4511-42-6 | |
| Monomer(s) molecular weight(s) | dalton, g/mol, amu | 144.13 | |
| Monomer ratio | - | 100% or less (in blends) | |
| Concentration of L-lactide | % | 94-98 | |
| Formulation example | - | lactic acid and tin catalyst | |
| Method of synthesis | - | lactic acid is heated at 150°C to obtain oligomeric PLA (polymerization degree: 1-8). Oligomers are heated at 180°C under vacuum for 5 hours to give PLA having molecular weight of 100,000 | Bastoli, C, Handbook of Biodegradable Polymers, Rapra, 2005. |
| Temperature of polymerization | °C | 150-180 | |
| Time of polymerization | h | 5 | |
| Pressure of polymerization | Pa | vacuum | |
| Catalyst | - | tin | |
| Number average molecular weight, M_n | dalton, g/mol, amu | 74,000-660,000 | |
| Mass average molecular weight, M_w | dalton, g/mol, amu | 80,000-380,000; 4000-6000 (DL); 100000 (L) | |
| Polydispersity, M_w/M_n | - | 1.5-3.79 | Bastoli, C, Handbook of Biodegradable Polymers, Rapra, 2005. |

| PARAMETER | UNIT | VALUE | REFERENCES |
|----------------------------|------|---|---|
| STRUCTURE | | | |
| Crystallinity | % | 20-47; 25-70 (L-PLA); 10-20 (film); 65 (fiber), 20-36 (DSC); 20-44 (WAXD) | Bastoli, C, Handbook of Biodegradable Polymers, Rapra, 2005; Rudnik, E; Briassoulis, D, Ind. Crops Prod., 33, 648-58, 2011; Tsai, C-C; Wu, R-J; Cheng, H-Y; Li, S-C; Siao, Y-Y; Kong, D-C; Jang, G-W, Polym. Deg. Stab., 95, 1292-98, 2010. |
| Cell type (lattice) | - | orthorhombic (α), hexagonal (α'), trigonal (β), monoclinic (γ) | |
| Cell dimensions | nm | a:b:c=1.06:0.61:2.88 (orthorhombic, α); a=b:c=1.052:0.88 (trigonal, β); a:b:c=0.995:0.625:0.88 (monoclinic, γ) | Johnson, C M; Sugiharto, A B; Roke, S, Chem. Phys. Lett., 449, 191-95, 2007; Lin, T T; Liu, X Y; He, C, Polymer, 51, 2779-85, 2010. |
| Polymorphs | - | α , α' , β , γ | Kalish, J P; Zeng, X; Yang, X; Hsu, S L, Polymer, in press, 2011. |
| Lamellae thickness | nm | 2.03-28.6 | Tsai, C-C; Wu, R-J; Cheng, H-Y; Li, S-C; Siao, Y-Y; Kong, D-C; Jang, G-W, Polym. Deg. Stab., 95, 1292-98, 2010. |
| Avrami constants, k/n | - | n=1.8-2.3 | Tsai, C-C; Wu, R-J; Cheng, H-Y; Li, S-C; Siao, Y-Y; Kong, D-C; Jang, G-W, Polym. Deg. Stab., 95, 1292-98, 2010. |
| COMMERCIAL POLYMERS | | | |
| Some manufacturers | - | Cargill; Durect | |
| Trade names | - | PLA; Lactel | |

| | | | |
|--|---|---------------------------------|---|
| COMMERCIAL POLYMERS | | | |
| Some manufacturers | - | Cargill; Durect | |
| Trade names | - | PLA; Lactel | |
| PHYSICAL PROPERTIES | | | |
| Density at 20°C | g cm ⁻³ | 1.21-1.29 | |
| Refractive index, 20°C | - | 1.35-1.45 | |
| Transmittance | % | 2.2 | |
| Melting temperature, DSC | °C | 164-178; 180-184 (L-PLA) | Bastoli, C, Handbook of Biodegradable Polymers, Rapra, 2005. |
| Decomposition temperature | °C | >200 | |
| Glass transition temperature | °C | 55-75 | Bastoli, C, Handbook of Biodegradable Polymers, Rapra, 2005. |
| Specific heat capacity | J K ⁻¹ kg ⁻¹ | 540-600 | |
| Heat of fusion | kJ mol ⁻¹ | 146 | |
| Vicat temperature VST/A/50 | °C | 55-60 | |
| Enthalpy of fusion | J g ⁻¹ | 21.9-43.8 | |
| Hansen solubility parameters, dD, dP, dH | (J cm ⁻³) ^{0.5} | 18.50, 9.70, 6.0 | Agrawal, A; Saran, A D; Rath, S S; Khanna, A, Polymer, 45, 8603-12, 2004. |
| Radius of interaction | (J cm ⁻³) ^{0.5} | 13.53 | Agrawal, A; Saran, A D; Rath, S S; Khanna, A, Polymer, 45, 8603-12, 2004. |
| Hildebrand solubility parameter | MPa ^{0.5} | calc.=19.2-20.3; exp.=19.0-21.0 | Auras, R; Harte, B; Selke, S, Antec, 2862-6, 2003. |
| Surface resistivity | ohm | 1.9E11 | Khoddami, A; Avinc, O; Ghahremanzadeh, F; Prog. Org. Coat., in press, 2011. |
| Permeability to nitrogen, 25°C | cm ³ cm ⁻³ cmHg ⁻¹ x 10 ⁴ | 2.2 | Bao, L; Dorgan, J R; Knauss, D; Hait, S; Oliveira, N S; Maruccho, I M, J. Membrane Sci., 166-172, 2006. |

| PARAMETER | UNIT | VALUE | REFERENCES |
|-----------------------------------|---|---------|--|
| Permeability to oxygen, 25°C | cm ³ cm ⁻³ cmHg ⁻¹ x 10 ⁴ | 2.2-4.9 | Bao, L; Dorgan, J R; Knauss, D; Hait, S; Oliveira, N S; Maruccho, I M, J. Membrane Sci., 166-172, 2006. |
| Permeability to water vapor, 25°C | cm ³ m ⁻² 24h ⁻¹ | 110 | Zenkiewicz, M; Richert, J; Rytlewski, P; Moraczewski, K; Stepczynska, M; Karasiewicz, T, Polym. Test., 28, 412-18, 2009. |
| Diffusion coefficient of nitrogen | cm ² s ⁻¹ x10 ⁹ | 2.4 | Bao, L; Dorgan, J R; Knauss, D; Hait, S; Oliveira, N S; Maruccho, I M, J. Membrane Sci., 166-172, 2006. |
| Diffusion coefficient of oxygen | cm ² s ⁻¹ x10 ⁹ | 5.6-7.6 | Bao, L; Dorgan, J R; Knauss, D; Hait, S; Oliveira, N S; Maruccho, I M, J. Membrane Sci., 166-172, 2006. |

| MECHANICAL & RHEOLOGICAL PROPERTIES | | | |
|---|----------------------|------------------------------|---|
| Tensile strength | MPa | 52-72; 27-41 (DL); 55-82 (L) | |
| Tensile modulus | MPa | 2700-16000 | |
| Tensile stress at yield | MPa | 65.6-77 | Carrasco, F; Pages, P; Gamez-Perez, J; Santana, O O; Maspoch, M L, Polym. Deg. Stab., 95, 116-25, 2010. |
| Tensile creep modulus, 1000 h, elongation 0.5 max | MPa | 48-70 | |
| Elongation | % | 4-6; 3-10 (DL); 5-10 (L) | |
| Tensile yield strain | % | 2.4-10 | |
| Flexural strength | MPa | 83 | |
| Flexural modulus | MPa | 1,000-3,800 | |
| Young's modulus | MPa | 3,700-4,100 | |
| Izod impact strength, notched, 23°C | J m ⁻¹ | 13-24.6 | |
| Tenacity (fiber) | cN tex ⁻¹ | 32-36 | |
| Intrinsic viscosity, 25°C | dl g ⁻¹ | 0.15-1.2 | |
| Melt index, 230°C/3.8 kg | g/10 min | 3-30 | |
| Water absorption, equilibrium in water at 23°C | % | 0.5 | |

| CHEMICAL RESISTANCE | | | |
|--------------------------|--------------------|--|---|
| Alcohols | - | poor | |
| Aromatic hydrocarbons | - | poor | |
| Esters | - | poor | |
| Greases & oils | - | good | |
| Halogenated hydrocarbons | - | poor | |
| Ketones | - | poor | |
| Good solvent | - | acetone, benzene, chloroform, m-cresol, dichloromethane, dioxane, DMF, ethyl acetate, isoamyl alcohol, toluene, xylene | |
| FLAMMABILITY | | | |
| Limiting oxygen index | % O ₂ | 19; 23-26 (with flame retardant) | |
| Heat release | kW m ⁻² | 427 | Wei, L-L; Wang, D-Y; Chen, H-B; Chen, L; Wang, X-L; Wang, Y-Z, Polym. Deg. Stab., in press, 2011. |

| PARAMETER | UNIT | VALUE | REFERENCES |
|--|---------------------------------|---|--|
| NBS smoke chamber | m ² kg ⁻¹ | 63 | |
| Char at 500°C | % | 0-1.4; 1.4-3.2 (with flame retardant) | Wei, L-L; Wang, D-Y; Chen, H-B; Chen, L; Wang, X-L; Wang, Y-Z, <i>Polym. Deg. Stab.</i> , in press, 2011. |
| Heat of combustion | J g ⁻¹ | 19,000 | Perepelkin, K E, <i>Fibre Chem.</i> , 34, 2, 2002. |
| UL 94 rating | - | V-0 (FR) | |
| WEATHER STABILITY | | | |
| Depth of UV penetration | µm | bulk erosion | |
| Important initiators and accelerators | - | nano-titanium dioxide | |
| Products of degradation | - | double bonds, chain cleavage | |
| Stabilizers | - | Phenolic antioxidant: pentaerythritol tetrakis(3-(3,5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenyl)propionate); HAS: decanedioic acid, bis(2,2,6,6-tetramethyl-1-(octyloxy)-4-piperidiny) ester, reaction products with 1,1-dimethylethylhydroperoxide and octane; Phosphite: bis(2-ethylhexyl)phosphite | |
| BIODEGRADATION | | | |
| Typical biodegradants | - | composting: complete fragmentation in 15 days; degradation complete in 4.8 years at 25°C; lipases from <i>Cryptococcus sp.</i> and proteases from <i>Bacillus</i> strains | Hartmann, M; Whiteman, N, <i>Antec.</i> 4-8, 2001; Kawai, F; Nakadai, KK; Nishioka, E; Nakajima, H; Ohara, H; Masaki, Iefuji, H, <i>Polym. Deg. Stab.</i> , 96, 1343-48, 2011. |
| TOXICITY | | | |
| NFPA: Health, Flammability, Reactivity rating | - | 1/1/0 | |
| Carcinogenic effect | - | not listed by ACGIH, NIOSH, NTP | |
| Oral rat, LD ₅₀ | mg kg ⁻¹ | >5,000 | |
| Skin rabbit, LD ₅₀ | mg kg ⁻¹ | >2,000 | |
| ENVIRONMENTAL IMPACT | | | |
| Aquatic toxicity, <i>Daphnia magna</i> , LC ₅₀ , 48 h | mg l ⁻¹ | 1,000 | |
| Power consumption for production | MJ kg ⁻¹ | 92 (fiber) | Perepelkin, K E, <i>Fibre Chem.</i> , 34, 2, 2002. |
| CO ₂ liberation | kg kg ⁻¹ | 4.1-6.5 | Perepelkin, K E, <i>Fibre Chem.</i> , 34, 2, 2002. |
| PROCESSING | | | |
| Typical processing methods | - | extrusion, extrusion coating, injection molding, microcellular foaming, spinning | |
| Preprocess drying: temperature/time/residual moisture | °C/h/% | 80 (vac)/8/ | |
| Processing temperature | °C | 220-255 (extrusion); 280-300 (fibers) | |
| Processing pressure | MPa | 82 (injection) | |
| Process time | min | | |

| | | | |
|---|---------------------|--|--|
| Additives used in final products | - | Plasticizers: polyethylene glycol, polypropylene glycol, partial fatty ester, glucose monoester, citrate, adipate and azelate esters, epoxidized soybean oil, acetylated coconut oil, linseed oil, acetyl tributyl citrate, glycerol triacetate, glycerol tripropionate; Antistatics: ethoxylated fatty amines, polyethylene glycol ester, quaternary ammonium salt; Antiblocking: diatomaceous earth, talc; Slip: erucamide | |
| Applications | - | clip, envelope with window, fabrics, fibers, film, sheet, shopping bag, synthetic paper, trash bag | |
| Outstanding properties | - | sustainable, biodegradable | |
| BLENDS | | | |
| Suitable polymers | - | chitosan, PC, PCL, PEG, PET, PR, PVP, starch | |
| ANALYSIS | | | |
| FTIR (wavenumber-assignment) | cm ⁻¹ /- | C=O – 1748; reference – 1451 | Rudnik, E; Briassoulis, D, Ind. Crops Prod., 33, 648-58, 2011. |
| Raman (wavenumber-assignment) | cm ⁻¹ /- | C-O – 1128; C-C – 1044 | Yang, X; Kang, S, Yang, Y, Aou, K; Hsu, S L, Polymer, 45, 4241-48, 2004. |
| NMR (chemical shifts) | ppm | C NMR: C=O – 170.8; -CH – 70.5; -CH ₃ – 18.1 | Zhang, X; Espiritu, M; Bilyk, A; Kurniawan, L, Polym. Deg. Stab., 93, 1964-70, 2008. |

| PARAMETER | UNIT | VALUE | REFERENCES |
|---|---------------------|--|--|
| Additives used in final products | - | Plasticizers: polyethylene glycol, polypropylene glycol, partial fatty ester, glucose monoester, citrate, adipate and azelate esters, epoxidized soybean oil, acetylated coconut oil, linseed oil, acetyl tributyl citrate, glycerol triacetate, glycerol tripropionate; Antistatics: ethoxylated fatty amines, polyethylene glycol ester, quaternary ammonium salt; Antiblocking: diatomaceous earth, talc; Slip: erucamide | |
| Applications | - | clip, envelope with window, fabrics, fibers, film, sheet, shopping bag, synthetic paper, trash bag | |
| Outstanding properties | - | sustainable, biodegradable | |
| BLENDS | | | |
| Suitable polymers | - | chitosan, PC, PCL, PEG, PET, PR, PVP, starch | |
| ANALYSIS | | | |
| FTIR (wavenumber-assignment) | cm ⁻¹ /- | C=O – 1748; reference – 1451 | Rudnik, E; Briassoulis, D, Ind. Crops Prod., 33, 648-58, 2011. |
| Raman (wavenumber-assignment) | cm ⁻¹ /- | C-O – 1128; C-C – 1044 | Yang, X; Kang, S, Yang, Y, Aou, K; Hsu, S L, Polymer, 45, 4241-48, 2004. |
| NMR (chemical shifts) | ppm | C NMR: C=O – 170.8; -CH – 70.5; -CH ₃ – 18.1 | Zhang, X; Espiritu, M; Bilyk, A; Kurniawan, L, Polym. Deg. Stab., 93, 1964-70, 2008. |

APÉNDICE B: CÓDIGO G Y M DEL MODELO ESPOL

| | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| G90 | G1 E1.0000 F1800 |
| M83 | G1 X112.916 Y95.800 E13.7465 F1800 |
| M106 S0 | G1 X115.376 Y98.260 E1.8516 |
| M104 S190 T0 | G1 X115.376 Y124.092 E13.7465 |
| M109 S190 T0 | G1 X112.916 Y126.552 E1.8516 |
| G28 ; home all axes | G1 X87.084 Y126.552 E13.7465 |
| ; process Process1 | G1 X84.624 Y124.092 E1.8516 |
| ; layer 1, Z = 0.400 | G1 X84.624 Y98.260 E13.7465 |
| T0 | G1 X87.084 Y95.800 E1.8516 |
| M102 | M102 |
| G1 E-1.0000 F1800 | G1 E-1.0000 F1800 |
| M103 | M103 |
| ; feature skirt | ; feature inner perimeter |
| ; tool H0.400 W0.400 | G1 X93.802 Y103.302 F4800 |
| G1 Z0.400 F1000 | M101 |
| G1 X86.919 Y95.400 F4800 | G1 E1.0000 F1800 |
| M101 | G1 X94.066 Y103.375 E0.1456 F1350 |
| G1 E1.0000 F1800 | G1 X94.066 Y109.999 E3.5251 |
| G1 X113.081 Y95.400 E13.9228 F1800 | G1 X94.271 Y110.723 E0.4004 |
| G1 X115.776 Y98.095 E2.0279 | G1 X94.059 Y110.869 E0.1373 |
| G1 X115.776 Y124.257 E13.9228 | G1 X93.780 Y110.661 E0.1852 |
| G1 X113.081 Y126.952 E2.0279 | G1 X93.267 Y110.369 E0.3138 |
| G1 X86.919 Y126.952 E13.9228 | G1 X92.899 Y110.044 E0.2614 |
| G1 X84.224 Y124.257 E2.0279 | G1 X92.604 Y109.652 E0.2614 |
| G1 X84.224 Y98.095 E13.9228 | G1 X92.395 Y109.207 E0.2614 |
| G1 X86.919 Y95.400 E2.0279 | G1 X92.280 Y108.730 E0.2614 |
| M102 | G1 X92.265 Y108.214 E0.2746 |
| G1 E-1.0000 F1800 | G1 X92.349 Y107.296 E0.4906 |
| M103 | G1 X92.518 Y106.380 E0.4955 |
| G1 X87.084 Y95.800 F4800 | G1 X92.771 Y105.484 E0.4956 |
| M101 | G1 X93.104 Y104.614 E0.4956 |

G1 X93.516 Y103.777 E0.4965
G1 X93.802 Y103.302 E0.2955
M102
G1 E-1.0000 F1800
M103
G1 X95.274 Y111.973 F4800
M101
G1 E1.0000 F1800
G1 X95.532 Y112.169 E0.1725 F1350
G1 X95.996 Y112.418 E0.2797
G1 X96.329 Y112.682 E0.2263
G1 X96.611 Y113.001 E0.2263
G1 X96.832 Y113.364 E0.2262
G1 X96.986 Y113.760 E0.2263
G1 X97.068 Y114.177 E0.2263
G1 X97.076 Y114.628 E0.2402
G1 X97.005 Y115.592 E0.5143
G1 X96.843 Y116.544 E0.5136
G1 X96.593 Y117.476 E0.5135
G1 X96.255 Y118.380 E0.5135
G1 X95.833 Y119.247 E0.5135
G1 X95.529 Y119.746 E0.3109
G1 X95.266 Y119.672 E0.1451
G1 X95.266 Y112.841 E3.6351
G1 X95.060 Y112.120 E0.3994
G1 X95.274 Y111.973 E0.1381
M102
G1 E-1.0000 F1800
M103
G1 X103.063 Y109.207 F4800
M101
G1 E1.0000 F1800
G1 X102.948 Y108.729 E0.2614 F1350

G1 X102.933 Y108.214 E0.2746
G1 X103.017 Y107.296 E0.4906
G1 X103.186 Y106.380 E0.4955
G1 X103.439 Y105.484 E0.4955
G1 X103.772 Y104.614 E0.4955
G1 X104.184 Y103.777 E0.4966
G1 X104.470 Y103.302 E0.2954
G1 X104.734 Y103.375 E0.1456
G1 X104.734 Y109.999 E3.5253
G1 X104.939 Y110.723 E0.4002
G1 X104.727 Y110.869 E0.1374
G1 X104.447 Y110.661 E0.1854
G1 X103.935 Y110.369 E0.3137
G1 X103.567 Y110.044 E0.2613
G1 X103.272 Y109.652 E0.2614
G1 X103.063 Y109.207 E0.2614
M103
G1 X105.728 Y112.120 F4800
M101
G1 X105.942 Y111.973 E0.1381 F1350
G1 X106.200 Y112.169 E0.1724
G1 X106.663 Y112.418 E0.2798
G1 X106.997 Y112.682 E0.2263
G1 X107.279 Y113.000 E0.2263
G1 X107.500 Y113.363 E0.2263
G1 X107.654 Y113.760 E0.2263
G1 X107.736 Y114.177 E0.2263
G1 X107.744 Y114.628 E0.2402
G1 X107.673 Y115.592 E0.5143
G1 X107.511 Y116.544 E0.5136
G1 X107.261 Y117.476 E0.5135
G1 X106.923 Y118.380 E0.5136
G1 X106.501 Y119.247 E0.5134

G1 X106.197 Y119.746 E0.3110
G1 X105.934 Y119.672 E0.1451
G1 X105.934 Y112.842 E3.6348
G1 X105.728 Y112.120 E0.3997
M102
G1 E-1.0000 F1800
M103
; feature outer perimeter
G1 X110.976 Y122.152 F4800
M101
G1 E1.0000 F1800
G1 X89.024 Y122.152 E11.6820 F900
G1 X89.024 Y100.200 E11.6820
G1 X110.976 Y100.200 E11.6820
G1 X110.976 Y122.152 E11.6820
M103
G1 X110.868 Y122.044 F4800
M101
G1 X110.868 Y100.308 E11.5671 F900
G1 X105.938 Y100.308 E2.6234
G1 X105.562 Y101.145 E0.4885
G1 X105.310 Y101.903 E0.4252
G1 X105.134 Y102.695 E0.4314
G1 X105.134 Y109.944 E3.8576
G1 X105.296 Y110.515 E0.3159
G1 X105.573 Y111.033 E0.3126
G1 X105.954 Y111.480 E0.3126
G1 X106.417 Y111.832 E0.3095
G1 X106.884 Y112.082 E0.2819
G1 X107.273 Y112.390 E0.2640
G1 X107.602 Y112.762 E0.2640
G1 X107.860 Y113.186 E0.2640
G1 X108.040 Y113.648 E0.2640

G1 X108.135 Y114.135 E0.2640
G1 X108.144 Y114.640 E0.2687
G1 X108.070 Y115.640 E0.5340
G1 X107.903 Y116.629 E0.5338
G1 X107.642 Y117.598 E0.5338
G1 X107.291 Y118.537 E0.5338
G1 X106.852 Y119.439 E0.5337
G1 X106.040 Y120.770 E0.8299
G1 X105.784 Y121.262 E0.2950
G1 X105.446 Y122.044 E0.4533
G1 X110.868 Y122.044 E2.8853
M102
G1 E-1.0000 F1800
M103
G1 X105.424 Y120.897 F4800
M101
G1 E1.0000 F1800
G1 X105.534 Y120.359 E0.2918 F900
G1 X105.534 Y112.898 E3.9707
G1 X105.369 Y112.320 E0.3199
G1 X105.086 Y111.796 E0.3166
G1 X104.697 Y111.346 E0.3166
G1 X104.228 Y110.996 E0.3115
G1 X103.702 Y110.696 E0.3225
G1 X103.272 Y110.317 E0.3050
G1 X102.927 Y109.859 E0.3050
G1 X102.683 Y109.340 E0.3050
G1 X102.550 Y108.783 E0.3050
G1 X102.532 Y108.201 E0.3095
G1 X102.620 Y107.241 E0.5133
G1 X102.796 Y106.289 E0.5150
G1 X103.059 Y105.358 E0.5150
G1 X103.405 Y104.454 E0.5150

G1 X103.833 Y103.585 E0.5153
G1 X104.749 Y102.064 E0.9454
G1 X105.087 Y101.328 E0.4307
G1 X105.433 Y100.308 E0.5732
G1 X95.270 Y100.308 E5.4080
G1 X94.894 Y101.145 E0.4885
G1 X94.642 Y101.903 E0.4252
G1 X94.466 Y102.695 E0.4314
G1 X94.466 Y109.943 E3.8574
G1 X94.628 Y110.515 E0.3160
G1 X94.905 Y111.033 E0.3127
G1 X95.286 Y111.480 E0.3127
G1 X95.749 Y111.832 E0.3096
G1 X96.216 Y112.082 E0.2818
G1 X96.605 Y112.390 E0.2640
G1 X96.934 Y112.762 E0.2641
G1 X97.192 Y113.186 E0.2640
G1 X97.372 Y113.648 E0.2640
G1 X97.467 Y114.135 E0.2640
G1 X97.476 Y114.640 E0.2687
G1 X97.402 Y115.640 E0.5340
G1 X97.235 Y116.629 E0.5338
G1 X96.974 Y117.598 E0.5338
G1 X96.623 Y118.537 E0.5338
G1 X96.184 Y119.439 E0.5337
G1 X95.372 Y120.770 E0.8299
G1 X95.116 Y121.262 E0.2950
G1 X94.778 Y122.044 E0.4533
G1 X105.059 Y122.044 E5.4711
G1 X105.281 Y121.412 E0.3564
G1 X105.424 Y120.897 E0.2847
M102
G1 E-1.0000 F1800

M103
G1 X94.866 Y120.359 F4800
M101
G1 E1.0000 F1800
G1 X94.866 Y112.897 E3.9710 F900
G1 X94.701 Y112.320 E0.3198
G1 X94.418 Y111.796 E0.3165
G1 X94.030 Y111.346 E0.3165
G1 X93.560 Y110.996 E0.3114
G1 X93.034 Y110.696 E0.3225
G1 X92.604 Y110.317 E0.3051
G1 X92.259 Y109.859 E0.3051
G1 X92.016 Y109.340 E0.3050
G1 X91.882 Y108.783 E0.3051
G1 X91.864 Y108.201 E0.3095
G1 X91.952 Y107.241 E0.5133
G1 X92.128 Y106.289 E0.5150
G1 X92.391 Y105.358 E0.5150
G1 X92.737 Y104.454 E0.5150
G1 X93.165 Y103.585 E0.5154
G1 X94.081 Y102.064 E0.9454
G1 X94.419 Y101.328 E0.4307
G1 X94.765 Y100.308 E0.5732
G1 X89.132 Y100.308 E2.9975
G1 X89.132 Y122.044 E11.5671
G1 X94.391 Y122.044 E2.7987
G1 X94.613 Y121.412 E0.3564
G1 X94.756 Y120.897 E0.2847
G1 X94.866 Y120.359 E0.2918
M103
; feature gap fill
G1 X95.079 Y119.831 F4800
M101

G1 X95.471 Y120.224 E0.2951 F1800

G1 X95.257 Y120.575 E0.2190

G1 X95.065 Y120.383 E0.1441

G1 X94.969 Y120.853 E0.2551

G1 X95.058 Y120.941 E0.0664

G1 X94.935 Y121.176 E0.1409

G1 X94.872 Y121.322 E0.0845

G1 X94.852 Y121.301 E0.0156

M102

G1 E-1.0000 F1800

M103

G1 X94.192 Y111.025 F4800

M101

G1 E1.0000 F1800

G1 X95.048 Y111.881 E0.6441 F1800

G1 X95.277 Y111.724 E0.1478

G1 X95.148 Y111.626 E0.0863

G1 X94.739 Y111.146 E0.3356

G1 X94.578 Y110.845 E0.1814

G1 X94.494 Y110.762 E0.0631

M103

G1 X93.877 Y102.790 F4800

M101

G1 X94.266 Y103.179 E0.2928 F1800

G1 X94.266 Y102.673 E0.2695

G1 X94.277 Y102.624 E0.0264

G1 X94.090 Y102.437 E0.1408

G1 X94.258 Y102.157 E0.1740

G1 X94.295 Y102.077 E0.0469

G1 X94.380 Y102.161 E0.0635

G1 X94.449 Y101.850 E0.1698

G1 X94.495 Y101.711 E0.0779

G1 X94.473 Y101.689 E0.0164

M103

G1 X94.785 Y100.870 F4800

M101

G1 X94.794 Y100.879 E0.0066 F1800

G1 X94.970 Y100.489 E0.2277

G1 X94.929 Y100.448 E0.0309

M102

G1 E-1.0000 F1800

M103

G1 X104.575 Y102.740 F4800

M101

G1 E1.0000 F1800

G1 X104.934 Y103.099 E0.2701 F1800

G1 X104.934 Y102.673 E0.2269

G1 X104.959 Y102.559 E0.0621

G1 X104.788 Y102.387 E0.1291

G1 X104.926 Y102.157 E0.1430

G1 X104.988 Y102.022 E0.0790

G1 X105.062 Y102.096 E0.0555

G1 X105.117 Y101.850 E0.1340

G1 X105.183 Y101.651 E0.1116

G1 X105.166 Y101.634 E0.0124

M103

G1 X105.474 Y100.810 F4800

M101

G1 X105.487 Y100.824 E0.0100 F1800

G1 X105.662 Y100.434 E0.2277

G1 X105.629 Y100.400 E0.0253

M102

G1 E-1.0000 F1800

M103

G1 X105.131 Y110.650 F4800

M101

G1 E1.0000 F1800
G1 X105.154 Y110.673 E0.0175 F1800
G1 X105.407 Y111.146 E0.2855
G1 X105.816 Y111.626 E0.3355
G1 X105.945 Y111.724 E0.0864
G1 X105.764 Y111.848 E0.1172
G1 X104.908 Y110.992 E0.6442
G1 X104.726 Y111.118 E0.1176
G1 X104.834 Y111.199 E0.0722
G1 X105.252 Y111.682 E0.3398
G1 X105.511 Y112.162 E0.2900
G1 X105.535 Y112.185 E0.0177
M103
G1 X105.858 Y119.863 F4800
M101
G1 X106.170 Y120.174 E0.2342 F1800
G1 X105.955 Y120.525 E0.2190
G1 X105.734 Y120.304 E0.1664
G1 X105.734 Y120.380 E0.0401
G1 X105.651 Y120.787 E0.2211
G1 X105.753 Y120.889 E0.0768
G1 X105.603 Y121.176 E0.1726
G1 X105.565 Y121.266 E0.0520
G1 X105.537 Y121.239 E0.0208
M103
; feature solid layer
G1 X106.307 Y119.181 F4800
M101
G1 X106.134 Y119.007 E0.1306 F1440
G1 X106.134 Y118.441 E0.3010
G1 X106.495 Y118.802 E0.2717
G1 X106.680 Y118.422 E0.2252
G1 X106.134 Y117.876 E0.4110

G1 X106.134 Y117.310 E0.3010
G1 X106.844 Y118.020 E0.5342
G1 X106.998 Y117.608 E0.2339
G1 X106.134 Y116.744 E0.6501
G1 X106.134 Y116.179 E0.3010
G1 X107.134 Y117.178 E0.7523
G1 X107.254 Y116.733 E0.2456
G1 X106.134 Y115.613 E0.8426
G1 X106.134 Y115.047 E0.3010
G1 X107.355 Y116.269 E0.9192
G1 X107.437 Y115.785 E0.2611
G1 X106.134 Y114.482 E0.9809
G1 X106.134 Y113.916 E0.3010
G1 X107.495 Y115.277 E1.0246
G1 X107.534 Y114.750 E0.2812
G1 X106.134 Y113.350 E1.0537
G1 X106.134 Y112.814 E0.2854
G1 X106.122 Y112.773 E0.0228
G1 X107.533 Y114.184 E1.0620
G1 X107.461 Y113.816 E0.1997
G1 X107.320 Y113.452 E0.2074
G1 X107.246 Y113.330 E0.0761
G1 X106.440 Y112.525 E0.6059
M103
G1 X104.211 Y110.296 F4800
M101
G1 X103.427 Y109.512 E0.5900 F1440
G1 X103.253 Y109.141 E0.2186
G1 X103.148 Y108.703 E0.2396
G1 X103.147 Y108.666 E0.0197
G1 X104.544 Y110.063 E1.0519
G1 X104.534 Y110.027 E0.0200
G1 X104.534 Y109.487 E0.2872

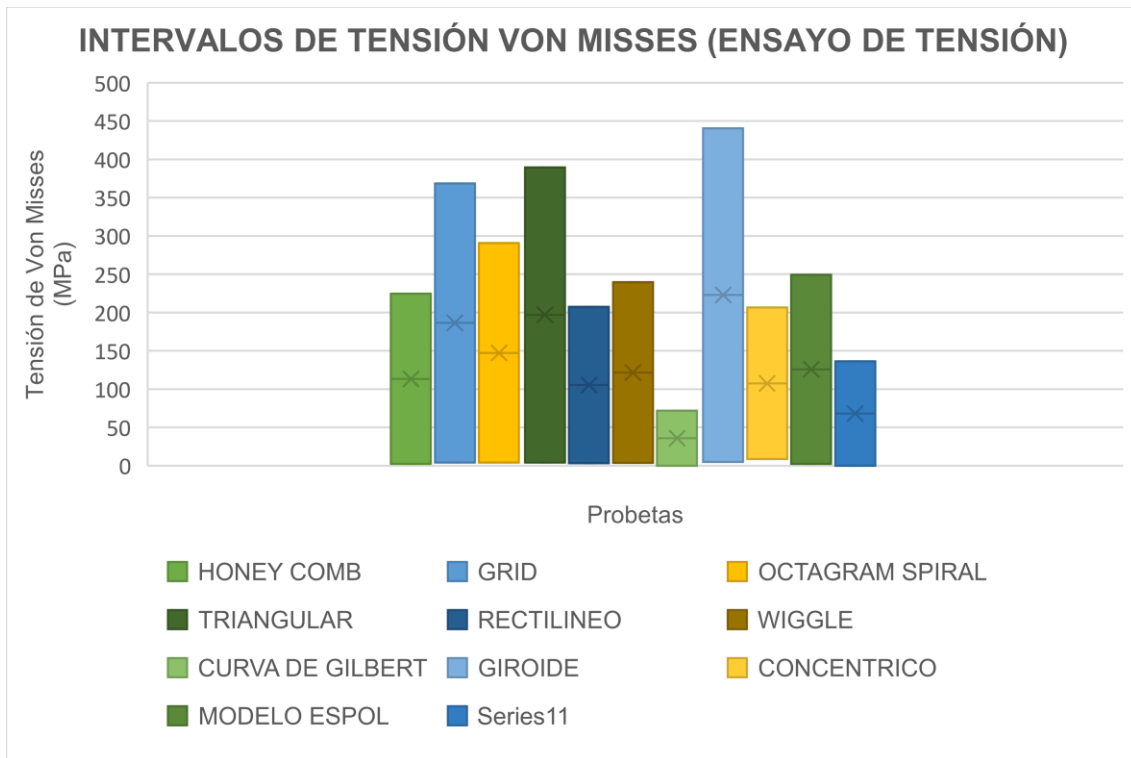
G1 X103.144 Y108.098 E1.0460
G1 X103.192 Y107.579 E0.2769
G1 X104.534 Y108.922 E1.0102
G1 X104.534 Y108.356 E0.3010
G1 X103.260 Y107.082 E0.9589
G1 X103.348 Y106.605 E0.2583
G1 X104.534 Y107.790 E0.8925
G1 X104.534 Y107.225 E0.3010
G1 X103.459 Y106.150 E0.8091
G1 X103.583 Y105.708 E0.2440
G1 X104.534 Y106.659 E0.7156
G1 X104.534 Y106.093 E0.3010
G1 X103.728 Y105.287 E0.6065
G1 X103.885 Y104.878 E0.2331
G1 X104.534 Y105.528 E0.4886
G1 X104.534 Y104.962 E0.3010
G1 X104.058 Y104.486 E0.3583
G1 X104.245 Y104.107 E0.2248
G1 X104.534 Y104.396 E0.2178
G1 X104.534 Y103.831 E0.3010
G1 X104.441 Y103.738 E0.0699
M102
G1 E-1.0000 F1800
M103
G1 X93.743 Y103.788 F4800
M101
G1 E1.0000 F1800
G1 X93.866 Y103.911 E0.0925 F1440
G1 X93.866 Y104.476 E0.3010
G1 X93.550 Y104.160 E0.2377
G1 X93.364 Y104.540 E0.2248
G1 X93.866 Y105.042 E0.3782
G1 X93.866 Y105.608 E0.3010

G1 X93.195 Y104.936 E0.5053
G1 X93.038 Y105.345 E0.2331
G1 X93.866 Y106.173 E0.6232
G1 X93.866 Y106.739 E0.3010
G1 X92.898 Y105.771 E0.7288
G1 X92.773 Y106.212 E0.2440
G1 X93.866 Y107.305 E0.8223
G1 X93.866 Y107.870 E0.3010
G1 X92.668 Y106.672 E0.9019
G1 X92.579 Y107.149 E0.2583
G1 X93.866 Y108.436 E0.9684
G1 X93.866 Y109.002 E0.3010
G1 X92.517 Y107.653 E1.0153
G1 X92.469 Y108.171 E0.2769
G1 X93.866 Y109.567 E1.0511
G1 X93.866 Y110.027 E0.2444
G1 X93.908 Y110.175 E0.0822
G1 X92.494 Y108.761 E1.0645
G1 X92.585 Y109.141 E0.2079
G1 X92.776 Y109.548 E0.2395
G1 X92.960 Y109.793 E0.1632
G1 X93.287 Y110.120 E0.2457
M103
G1 X95.600 Y112.432 F4800
M101
G1 X96.673 Y113.505 E0.8075 F1440
G1 X96.793 Y113.816 E0.1772
G1 X96.868 Y114.198 E0.2074
G1 X96.869 Y114.268 E0.0371
G1 X95.466 Y112.865 E1.0562
G1 X95.466 Y113.430 E0.3010
G1 X96.861 Y114.825 E1.0496
G1 X96.822 Y115.352 E0.2812

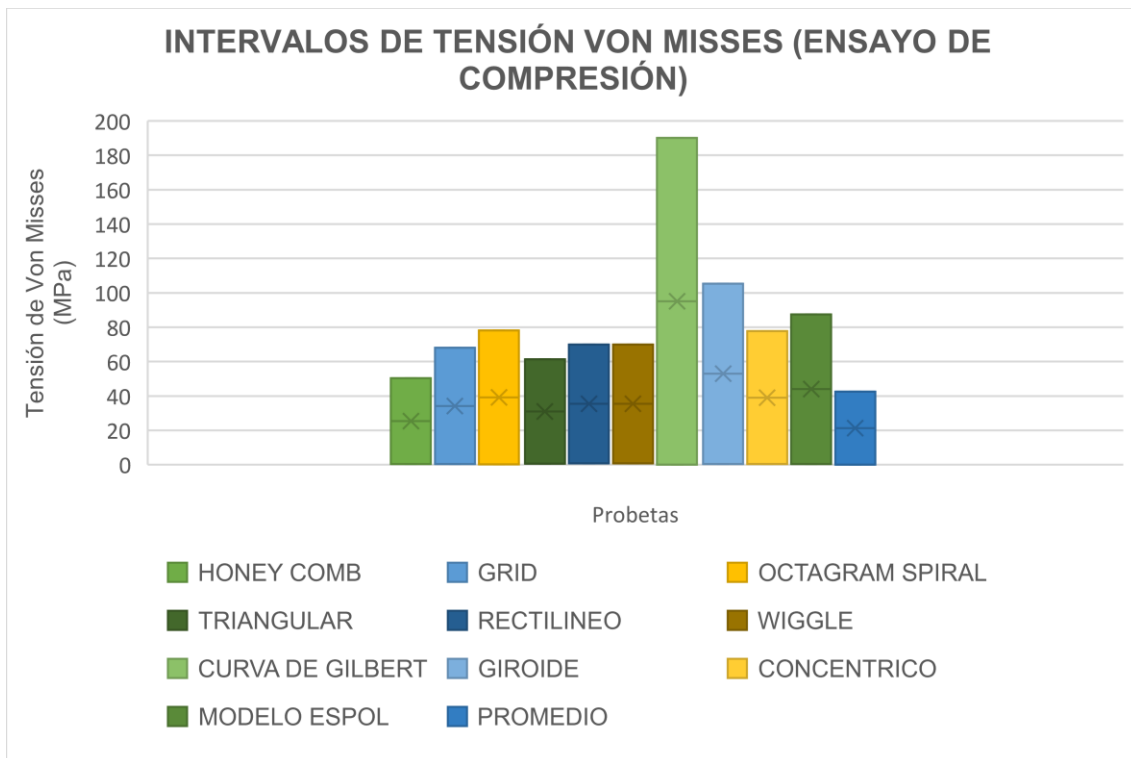
G1 X95.466 Y113.996 E1.0205
G1 X95.466 Y114.562 E0.3010
G1 X96.758 Y115.853 E0.9721
G1 X96.676 Y116.337 E0.2611
G1 X95.466 Y115.127 E0.9104
G1 X95.466 Y115.693 E0.3010
G1 X96.569 Y116.796 E0.8298
G1 X96.449 Y117.241 E0.2456
G1 X95.466 Y116.259 E0.7396
G1 X95.466 Y116.824 E0.3010
G1 X96.308 Y117.666 E0.6337
G1 X96.154 Y118.078 E0.2339
G1 X95.466 Y117.390 E0.5178

G1 X95.466 Y117.956 E0.3010
G1 X95.986 Y118.476 E0.3912
G1 X95.801 Y118.856 E0.2252
G1 X95.466 Y118.521 E0.2520
G1 X95.466 Y119.087 E0.3010
G1 X95.609 Y119.230 E0.1077
M102
G1 E-1.0000 F1800
M103
; layer end
M104 S0 ; turn off extruder
M140 S0 ; turn off bed
M84 ; disable motors

APÉNDICE C: INTERVALOS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN PROBETAS

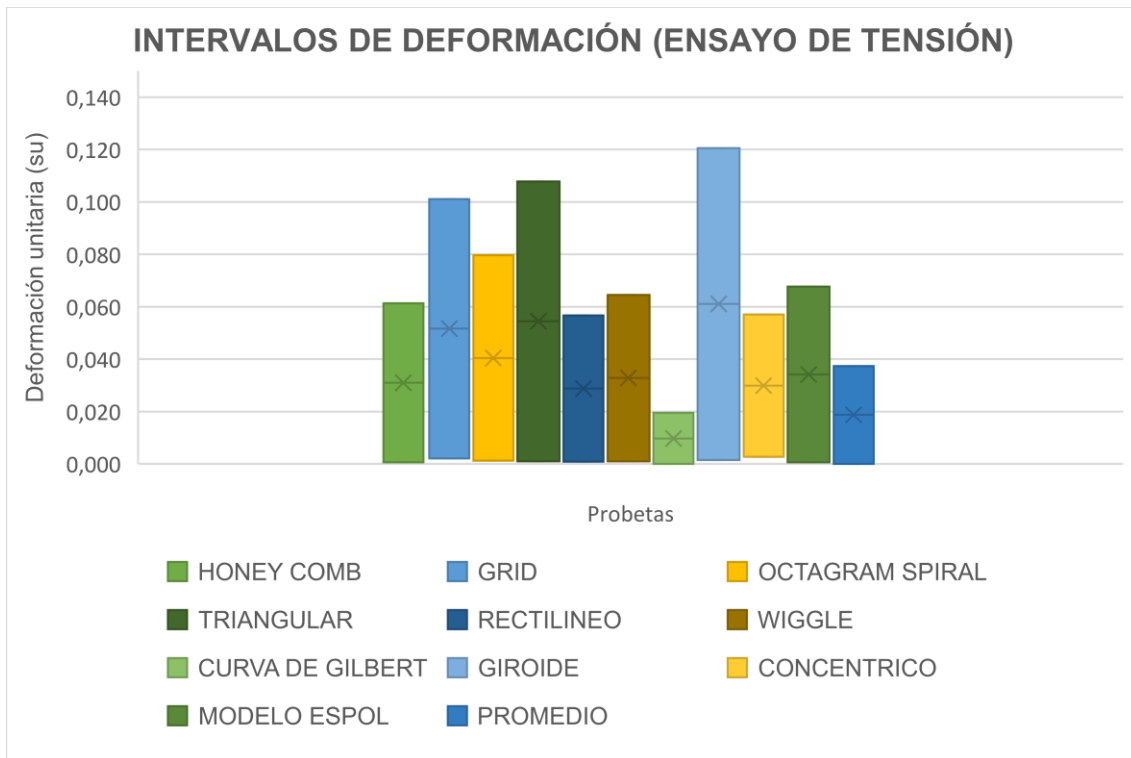


(a)

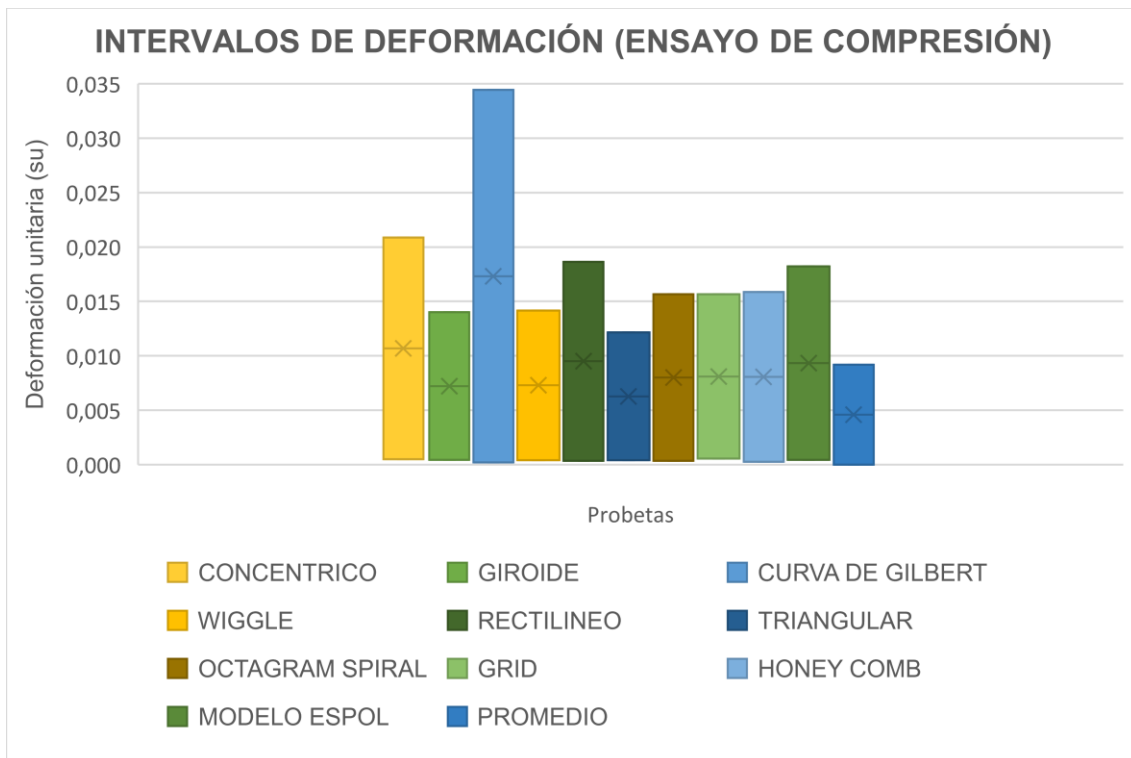


(b)

Figura C.1 (a) Intervalos de esfuerzo de Von Mises obtenidos mediante simulación de ensayos de tensión (b) Intervalos de esfuerzo de Von Mises obtenidos mediante simulación de ensayos de compresión
[Elaboración propia]



(a)



(b)

Figura C.2 (a) Intervalos de deformación de las probetas obtenidos mediante simulación de ensayos de tensión (b) Intervalos de deformación obtenidos mediante simulación de ensayos de compresión.

[Elaboración propia]

