

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada
Gerencia de Posgrado



*Insertos elaborados mediante impresión 3D para embalajes
en la cadena de suministro de la industria automotriz*

TESIS QUE PRESENTA

I.M. Ismael Alejandro Muñoz Salazar
Asesor: Dra. Mayra del Angel Monroy

Para obtener el grado de

Maestro en
Manufactura Avanzada

Aguascalientes, Aguascalientes
enero, 2024

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



**GOBIERNO DE
MÉXICO**



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



CIATEQ

Sal Luis Potosí, S.L.P., 13 de noviembre del 2023.

Mtro. Geovany González Carlos
Gerencia de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial de Maestría e Ismael Alejandro Muñoz Salazar, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "Insertos Elaborados Mediante Impresión 3D Para Embalajes En La Cadena De Suministro De La Industria Automotriz" **autorizo** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **maestro**.

Sin otro particular por el momento, agradezco la atención prestada.

Firma

Mayra del Angel Monroy

Dra. Mayra del Angel Monroy

Asesor Académico

F31a Revisión: 01-Jun-2021



2023
AÑO DE
**Francisco
VILLA**

EL HALL OF FAME DEL MUNDO

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



**GOBIERNO DE
MÉXICO**



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



CIATEQ

Santiago de Querétaro, Querétaro, 09 de enero del 2024.

Mtro. Geovany González Carlos
Gerencia de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno **Ismael Alejandro Muñoz Salazar**, cuyo título es:

**"Insertos elaborados mediante impresión 3D para embalajes en
la cadena de suministro de la industria automotriz"**

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,


Mtra, Juanita Hincapié Bedoya

Av. del Retablo No. 150, Col. Constituyentes Fovissste, CP. 76150, Querétaro, Qro., México.
Tel: +52 (442) 211 2679 www.ciateq.mx



DEDICATORIA

A mi esposa e hijo por el incondicional apoyo constante en esta etapa de mi vida. A mis padres y hermanos, por su compañía y aliento en los momentos más difíciles. A mi tutora, por su guía en la elaboración de este trabajo, reconocerle su enorme esfuerzo por todo el momento procurarme las herramientas adecuadas aun cuando fuese algún tema que no estuviera dentro de su alcance, nuevamente mi más sincero agradecimiento con usted. A su colega que por el apoyo recibido de su parte muy valioso para llevar a acabe este proyecto. Y a todas las personas que han sido parte de mi camino, gracias por ser una fuente de inspiración y motivación para alcanzar mis metas. Sin su ayuda, este trabajo no habría sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutora, el Dra. Mayra del Angel Monroy, por su orientación y soporte en la elaboración de este trabajo. Sus valiosos consejos y sugerencias fueron fundamentales para el éxito de este proyecto. También agradecer a mi esposa y a mi hijo reconocerles su enorme esfuerzo para cederme parte de su muy valioso tiempo teniéndome la paciencia necesaria para que pueda sacar adelante este proyecto, a mis padres y hermanos Ismael, Alicia, Enrique y Evelyn por el incondicional y constante apoyo en cada etapa de mi vida. A mis compañeros de trabajo y de clases por compartir sus aprendizajes y ser el epicentro ideal para poner en práctica los conocimientos adquiridos, así como el lugar para mejorarlos e incrementar el intelecto. Y a todas las personas que han sido parte de mi camino, gracias por ser una fuente de inspiración y motivación para alcanzar mis metas. Sin su ayuda, esto no habría sido posible.

RESUMEN

Los insertos de empaque son esenciales para proteger los productos de daños durante el transporte. Sin embargo, los métodos tradicionales de diseño y producción pueden ser poco confiables.

Este estudio utilizó la impresión 3D para crear un inserto de empaque más confiable. La impresión 3D permite una mayor flexibilidad de diseño y la capacidad de crear insertos personalizados.

También en este estudio se utilizó el método de elemento finito para diseñar y crear un inserto de empaque más confiable. El método de elemento finito se utilizó para simular el comportamiento del inserto bajo carga, y la impresión 3D se utilizó para crear el inserto a partir de un material de poliuretano termoplástico (TPU).

Los resultados del estudio mostraron que el inserto diseñado y elaborado mediante impresión 3D es capaz de soportar el peso previsto sin sufrir daños y, por lo tanto, viable para poder contemplarse como una opción más de proceso para la elaboración insertos de empaque.

Palabras clave: Inserto para empaque; Análisis por elemento finito; Impresión 3D.

ABSTRACT

Packaging inserts are essential to protect products from damage during transportation. However, traditional design and production methods can be unreliable.

This study used 3D printing to create a more reliable packaging insert. 3D printing allows for greater design flexibility and the ability to create custom inserts.

Also in this study, the finite element method was used to design and create a more reliable packaging insert. The finite element method was used to simulate the behavior of the insert under load, and 3D printing was used to create the insert from a thermoplastic polyurethane (TPU) material.

The results of the study showed that the insert designed and manufactured using 3D printing is capable of supporting the expected weight without suffering damage and therefore viable to be considered as another process option for the production of packaging inserts.

Keywords: Packaging insert; Finite element analysis; 3D printing.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
GLOSARIO	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	5
1.3. JUSTIFICACIÓN	8
1.4. OBJETIVO	12
1.4.1. Objetivo general.....	12
1.4.2. Objetivos específicos	12
1.5. HIPÓTESIS.....	13
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1. ADMINISTRACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO.....	14
2.1.1. Actualidad en la administración de la cadena de suministro.....	14
2.2. HISTORIA DEL EMPAQUE.....	14
2.2.1. Retrospectiva del empaque	14
2.2.2. Evolución de las características del empaque con respecto a las necesidades	15
2.3. EL EMPAQUE	16
2.3.1. Importancia del empaque.....	16
2.3.2. Función del empaque	17
2.4. DAÑOS EN LOS EMPAQUES Y CONTRAMEDIDAS PARA EVITARLOS.....	20
2.4.1. Efectos que causan daños en empaques y ruptura de piezas en la cadena de suministro	20
2.4.2. Métodos para contrarrestar daños en piezas.....	21
2.4.3. Pruebas de laboratorio para desempeño del empaque	21
2.5 INSERTOS	23
2.5.1. Empaque interno.....	23
2.6 MANUFACTURA ADITIVA	24

2.6.1. Concepto de manufactura aditiva.....	24
2.6.2. Procesos actuales de manufactura aditiva.....	25
2.6.3. Ventajas y retos de la manufactura aditiva	27
2.6.4. Comparación de costos y capacidad elástica y de tensión de distintos materiales	30
2.6.5. FEA de simulación numérica	33
2.6.6. Integración de impresión 3D y FEA	34
2.6.7. Termoplástico de poliuretano (TPU).....	35
3. PROCEDIMIENTO.....	38
3.1. Impresión de inserto.....	38
3.1.1. Características de la impresora 3D.....	38
3.1.2. Propiedades del filamento de impresión 3D.....	39
3.2. Diseño de inserto.....	39
3.3. Análisis de elementos finitos.....	40
3.4. Propiedades de malla de elementos finitos.....	41
3.5. Características y parámetros de la impresora 3D	43
3.6. Prueba de compresión norma ASTM D642.....	44
3.7. Procedimiento de prueba de compresión.....	44
4. RESULTADOS	46
CONCLUSIONES	50
RECOMENDACIONES	52
APORTACIÓN DE LA TESIS.....	54
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.....	55
REFERENCIAS.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño de "brackets" para realizar la comparación y producción de 50 piezas.....	29
Figura 2. Gráfico de comportamiento de los procesos de manufactura aditiva...	30
Figura 3. Tablas Ashby con lecturas de resistencia materiales naturales y artificiales	31
Figura 4. Tablas Ashby con lecturas de costo de materiales	32
Figura 5. Artillery Genius estructura y dimensiones exteriores y de espacio de impresión	39
Figura 6. Estructura propuesta para el inserto polimérico	40
Figura 7. Condiciones frontera de la pieza para realizar simulación	42
Figura 8. Resultado final del inserto de empaque impreso en 3D	44
Figura 9. Inserto de prueba en máquina de compresión del laboratorio	45
Figura 10. Representación de las tres coordenadas analizadas	47
Figura 11. Las fuerzas simuladas muestran a la pieza flexionándose, sin riesgo de colapso	47
Figura 12. Deformación por desplazamiento no compromete el desempeño	48
Figura 13. Gráfico de comportamiento de la prueba donde se nota desplazamiento en la pieza sin llegar a un punto de ruptura	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Procesos de fabricación aditiva más habituales.....	26
Tabla 2. Ventajas y retos en la manufactura aditiva	27
Tabla 3. Principales características de procesos de manufactura aditiva.....	28
Tabla 4. Desglose de costo y tiempo por método de manufactura.....	29
Tabla 5. Propiedades mecánicas del filamento de TPU (poliuretano termoplástico)	41
Tabla 6. Resultados de convergencia de malla	42
Tabla 7. Parámetros Para Imprimir TPU	43

GLOSARIO

Cadena de suministro: Proceso que involucra a muchas personas y organizaciones para mover un producto o servicio desde el punto de origen hasta el punto de consumo.

Carga: Fuerza que actúa sobre un cuerpo y puede causarle deformación o movimiento.

Compresión: Aplicación de fuerzas equilibradas hacia adentro a diferentes puntos de un material o estructura.

Deformación: Es el cambio en la forma o el tamaño de un cuerpo que se produce como consecuencia de la aplicación de fuerzas externas.

Desplazamiento: Es la distancia y dirección que recorre un cuerpo desde un punto inicial hasta un punto final.

Embalaje: Proceso que consiste en proteger, agrupar y presentar un producto para su transporte, almacenamiento y venta.

Empaque: Es un sistema de elementos para distribuir, almacenar, presentar, usar y desechar cuando producto empacado.

Impresión 3D: Este es un proceso de fabricación por adición que consiste en crear un objeto tridimensional a partir de un modelo digital.

Inserción: Es el proceso de agregar un elemento nuevo a una estructura o secuencia.

Insero de empaque: Es un elemento de soporte que se coloca dentro del empaque para proteger el producto, proporcionar información o mejorar la presentación del producto.

Termoplástico: Es un material polimérico que se puede fundir y moldear repetidamente sin perder sus propiedades.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de trasladar materiales de un punto a otro de la cadena de suministro, especialmente en el sector de la automoción, exige la creación de contenedores o dispositivos que permitan trasladar las piezas conservando su calidad (United Parcel Service of America, 2023). Adicionalmente, de esta forma se evitan daños generados por el movimiento durante el manejo, tales como impactos, vibraciones, caídas, suciedad y tacones (Emblem & Emblem, 2012).

Una forma de contrarrestar los daños es creando medios de sujeción de las piezas que impidan movimientos inadecuados que dañen el material. Estos medios de sujeción son comúnmente conocidos como insertos o empaque interior para empaques en la cadena de suministro de la industria automotriz (Selke,, Culter, Auras, & Rabnawaz, 2012), (Giles & Bain, 2001). Estos elementos forman una geometría específica, que puede ser de diferentes materiales con distintas propiedades mecánicas, como compresión, flexión, tenacidad, rugosidad y condiciones térmicas. Estas propiedades se eligen en función del tipo de producto que se almacenará y dónde se ubicará físicamente el producto, como almacenes, fábricas, puertos marítimos o puntos de venta (Theobald & Winder, 2008). El diseño de los elementos corresponde a la adecuación del producto y las condiciones donde será almacenado o trasladado (Al Rashid, Khan, G. Al-Ghamdi, & Koç,, 2020).

Esta investigación se enfoca en la simulación numérica del análisis de elementos finitos para un inserto utilizado en el empaque de un faro automotriz. El elemento se imprimió utilizando la tecnología de deposición fundida (FDM) en función de su rentabilidad y eficiencia del tiempo de producción, lo que lo convierte en la opción más adecuada para producir el material de inserción previsto. Actualmente, los métodos de fabricación convencionales, como la inyección de plástico o el desprendimiento de material, producen insertos de embalaje. Sin embargo, estos métodos limitan las formas, geometrías y materiales que los fabricantes pueden usar, lo que resulta en mayores costos y tiempos de fabricación y márgenes de falla

de sujeción potencialmente más amplios debido a la ausencia de las posibilidades mencionadas anteriormente. Con estas premisas, la fabricación aditiva es el método que ofrece más ventajas, ya que permite producir insertos únicos con la libertad formal deseada.

En concreto, la impresión 3D es la forma más extendida de aplicar la fabricación aditiva. Tiene una ventaja crucial: la producción es económica si cada pieza es diferente (Cattenone, Morganti, & Alaim, 2019) . Aunque estas tecnologías son relativamente nuevas, es probable que su uso aumente con el tiempo, ya que la demanda de objetos con formas complejas y personalizadas también aumenta. En consecuencia, esto afectará en la reducción de sus precios y sus excelentes aplicaciones industriales (United Parcel Service of America, 2023), (Selke,, Culter, Auras, & Rabnawaz, 2012), (Giles & Bain, 2001).

El proyecto de investigación utilizó el análisis de elemento finito para simular el comportamiento de nuevos insertos internos para el empaque de faros automotrices. Los insertos se imprimieron con el proceso FDM y se sometieron a la prueba de laboratorio con la norma ASTM D642 (Malhotra & Malhotra , 2021) para confirmar los resultados de la simulación recreando la carga a la que se someterían los insertos en caso de ser utilizados en una operación real de estiba. El resultado ayudara a comprobar si los insertos desarrollados mediante manufactura aditiva cumplen la función.

1.1. ANTECEDENTES

El concepto de manufactura aditiva (MA) nace en los 80's teniendo la idea de crear de manera rápida prototipos a través de una técnica que consiste en utilizar una fina de material de fotopolímero expuesta a la luz UV para endurecer una pieza.

Las técnicas, materiales y máquinas para producción se han diversificado desde entonces, mostrando ser una manera eficiente de cubrir necesidades e incluso

sustituir métodos actuales; sin embargo, esta tecnología para muchos sigue siendo desconocida o de reciente creación y la encuentran muy limitada en sus aplicaciones con respecto a su potencial (Emblem & Emblem, 2012).

Existen ya empresas a nivel global que intentan implementar esta tecnología en sus procesos; sin embargo, terminan por limitar su participación a trabajos esporádicos. Lo anterior se debe mucho a que la manufactura aditiva se asigna a áreas que terminan por usar este método como un soporte adicional a sus procedimientos actuales perdiendo de vista las ventajas cuantificables de los beneficios que se pudieran obtener.

Por otra parte, los embalajes han acompañado al ser humano desde sus inicios. Nuestros antepasados utilizaban fibras vegetales y animales para proteger y transportar objetos frágiles o de valor, pero principalmente para resguardar alimentos que al ser conservados lo mejor posible podían servirles en épocas de escases, los griegos y romanos utilizaban botas de tela y barriles de madera para conservar sus bebidas (Moya Jimenez, 2011).

Actualmente existen trabajos de simulación de piezas hechas específicamente para mejorar el desempeño de absorción de impacto un ejemplo de esto es la investigación de "Análisis de resistencia al impacto de materiales impresos en 3D Parachoques de automóvil PA de carbono para mejorar la absorción de energía mediante el uso LS-DYNA" (Yeshanew, y otros, 2023). Este trabajo de investigación propuso un nuevo diseño de parachoques de automóvil fabricado con poliamida de carbono. El objetivo era mejorar la resistencia a los choques de los parachoques existentes para minimizar las lesiones por choques.

Mediante simulación realizada por análisis de elemento finito mostraron que el parachoques de poliamida de carbono tiene una serie de ventajas sobre los parachoques de acero y aluminio existentes. Los investigadores recopilaron datos de un fabricante de automóviles que posteriormente usaron como datos de entrada en un software de modelado de sólidos para crear una pieza en CAD del

parachoques con las especificaciones existentes. Una vez que se completó el modelo, se importó a otro software especializado en simulaciones de análisis de elemento finito para realizar una simulación de choque frontal. Obteniendo así los resultados necesarios para comprobar y mencionar las ventajas de esta propuesta de material para elaborar parachoques.

Otro ejemplo de trabajo de investigación similar es "Insertos de embalaje de alimentos impresos en 3D con elastómeros termoplásticos biodegradables" (Jandyal, Chatuvedi, Wazir, Raina, & Haq, 2022). Esta investigación trata de los insertos de empaques de alimentos que son componentes importantes que pueden ayudar a proteger los alimentos de daños y contaminación. Los insertos tradicionales suelen estar hechos de materiales no biodegradables, como plástico o metal. Esto puede representar un problema medioambiental, ya que estos materiales pueden tardar cientos de años en descomponerse.

El trabajo investigó la viabilidad de utilizar elastómeros termoplásticos biodegradables para fabricar insertos de empaques de alimentos. Los termoplásticos biodegradables son materiales compuestos que combinan las propiedades de los plásticos y los elastómeros. Son flexibles, resistentes y biodegradables.

Los investigadores utilizaron un proceso de impresión 3D para fabricar insertos con este termoplástico con diferentes geometrías y composiciones. Evaluaron las propiedades mecánicas y térmicas de los insertos. Los resultados mostraron que los insertos tenían buenas propiedades mecánicas y térmicas, lo que los hace adecuados para aplicaciones de empaques de alimentos. Además, los insertos eran biodegradables, lo que puede ayudar a reducir el impacto medioambiental.

En general, los resultados del trabajo son prometedores, los insertos impresos en 3D ofrecen una serie de ventajas sobre los insertos tradicionales, incluyendo: flexibilidad, biodegradabilidad y mayor resistencia. Pueden fabricarse con diferentes geometrías y composiciones, lo que permite personalizarlos para

diferentes aplicaciones. Se espera que la investigación en el área de los insertos de empaques de alimentos impresos en 3D continúe desarrollándose en los próximos años. A medida que la tecnología de impresión 3D se vuelva más asequible y accesible, es probable que veamos una mayor adopción de esta tecnología para la fabricación de insertos de empaques de alimentos.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La administración de la cadena de suministro en la industria automotriz es fundamental para su funcionamiento, ya que el tiempo es un factor determinante. Cualquier retraso en la cadena de suministro puede provocar defectos de calidad, retrasos en las entregas y sobrecostos.

La cadena de suministro abarca desde el suministro de materias primas hasta la entrega del producto final al cliente. Es un proceso complejo y dinámico que requiere precisión y coordinación.

El empaque es un componente esencial de la cadena de suministro, ya que tiene como función proteger los productos durante su transporte, almacenamiento y manipulación. El empaque debe ser capaz de proteger los productos de daños físicos, contaminación y deterioro.

El empaque puede clasificarse en dos categorías principales: empaque primario y empaque secundario. El empaque primario es el que está en contacto directo con el producto. El empaque secundario es el que rodea al empaque primario y proporciona protección adicional.

Los insertos son componentes del empaque que ayudan a minimizar el movimiento de las piezas y a absorber los impactos. Los insertos se suelen utilizar en el empaque primario para proteger productos frágiles o sensibles a los golpes.

La selección de los insertos adecuados es importante para reducir las pérdidas y garantizar la seguridad del producto durante su movimiento. La selección de los insertos adecuados es importante para garantizar la protección del producto durante su transporte. Los factores que se deben considerar al seleccionar los insertos incluyen:

- Las características del producto: el tamaño, la forma, el peso y la fragilidad del producto son factores importantes a considerar al seleccionar los insertos.
- Las condiciones de transporte: la distancia de transporte, el medio de transporte y el entorno de almacenamiento son factores que también deben considerarse.
- Los requisitos de seguridad: los insertos deben cumplir con los requisitos de seguridad específicos para el producto.

Existen una variedad de tipos de insertos disponibles, cada uno con sus propias ventajas y desventajas. Los tipos de insertos más comunes incluyen:

- Insertos de espuma: los insertos de espuma son una opción económica y versátil. Son efectivos para absorber impactos y amortiguar el movimiento de las piezas.
- Insertos de plástico: los insertos de plástico son una opción más resistente que los insertos de espuma. Pueden soportar cargas más pesadas y son menos propensos a deformarse.
- Insertos de madera: los insertos de madera son una opción duradera y resistente. Son adecuados para productos pesados o voluminosos.
- Insertos de cartón: los insertos de cartón son una opción ligera y económica. Son adecuados para productos de bajo peso o que no requieren una protección especial.

Los objetivos de hacer insertos de empaque impresos en 3D son varios:

- Mejorar la protección del producto: los insertos impresos en 3D pueden diseñarse para adaptarse a la forma específica del producto, lo que proporciona una protección óptima. Además, los materiales utilizados para

la impresión 3D pueden tener propiedades mecánicas superiores a las de los materiales tradicionales, lo que los hace más resistentes a los impactos.

- Reducir los costes: la impresión 3D puede ser una forma más eficiente de fabricar insertos que los métodos tradicionales. Esto se debe a que la impresión 3D permite la producción de piezas complejas con un solo proceso, lo que puede reducir los costes de mano de obra y materiales.
- Personalizar los insertos: la impresión 3D permite personalizar los insertos para adaptarse a las necesidades específicas de cada producto. Esto puede ser útil para proteger productos de formas o tamaños inusuales, o para satisfacer requisitos de seguridad específicos.

El alcance de los insertos de empaque impresos en 3D puede ser amplio, ya que pueden utilizarse para proteger una amplia gama de productos. Algunos ejemplos de productos que podrían beneficiarse de los insertos impresos en 3D incluyen:

- Productos electrónicos: los productos electrónicos, como los ordenadores portátiles, los teléfonos móviles y los televisores, son especialmente susceptibles a los daños físicos. Los insertos impresos en 3D pueden ayudar a proteger estos productos de golpes, caídas y otros daños.
- Productos frágiles: los productos frágiles, como la cerámica, el cristal y la porcelana, también pueden beneficiarse de los insertos impresos en 3D. Los insertos pueden ayudar a proteger estos productos de roturas y daños.
- Productos voluminosos: los productos voluminosos, como los muebles y los electrodomésticos, pueden ser difíciles de transportar y almacenar. Los insertos impresos en 3D pueden ayudar a proteger estos productos durante el transporte y almacenamiento, y también pueden ayudar a organizarlos de forma más eficiente.

Los insertos de empaque impresos en 3D presentan una serie de ventajas sobre los insertos tradicionales, en términos de eficiencia energética, reducción de residuos y complejidad de diseño. En general, los insertos de empaque impresos en 3D son una opción más sostenible y eficiente que los insertos tradicionales (Jandyal, Chatuvedi, Wazir, Raina, & Haq, 2022).

1.3. JUSTIFICACIÓN

Los contratiempos en la cadena de suministro presentados en el apartado del empaque anteriormente expuestos requieren de una solución de tiempo reducido y accesible evitando los impedimentos mencionados como altos costos, daños en las piezas mientras se trasladan, incrementos de tiempo de entrega, retrabajos y por lo tanto un desempeño bajo, lo que provocaría una pérdida de competitividad en las empresas.

La manufactura aditiva muestra ser la solución ideal para cubrir estos contratiempos ya que cuenta con la flexibilidad de realizar estructuras geométricas complicadas, a un coste competitivo, en un corto lapso y en diversos materiales que han sido utilizados como remplazos en otros sectores de los materiales que actualmente se utilizan en la industria automotriz.

La MA implementada en la generación de empaques internos en la cadena de suministro permitiría evitar actuales contratiempos como, desperdicios de materiales y altas inversiones de herramientas, beneficiando a todos los involucrados en esta actividad desde productores pasando por intermediarios y clientes.

El análisis de los empaques internos elaborados mediante manufactura aditiva vislumbraría optimizar rubros como los costos, la calidad, el tiempo y el impacto ambiental en la cadena de suministros. En este proyecto se utilizará la técnica de impresión 3D por deposición fundida, la manufactura aditiva por deposición fundida es un proceso de fabricación que consiste en construir una pieza capa por capa, depositando material fundido sobre una plataforma de construcción. El material se funde utilizando un cabezal de impresión, que se mueve sobre la plataforma en un patrón determinado.

Esta tecnología tiene una serie de ventajas, entre ellas:

- Libertad de diseño: la FDM permite crear piezas con formas complejas que serían difíciles o imposibles de fabricar con métodos de fabricación tradicionales.
- Eficiencia: la FDM puede ser una forma eficiente de fabricar piezas, ya que permite la producción de piezas complejas con un solo proceso.
- Personalización: la FDM permite personalizar las piezas para adaptarse a las necesidades específicas de cada aplicación.

La FDM se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo:

- Prototipado: la FDM es una tecnología popular para el prototipado rápido, ya que permite crear prototipos de piezas complejas en poco tiempo.
- Fabricación: la FDM se utiliza en la fabricación de piezas para una variedad de aplicaciones, incluyendo la industria automotriz, la industria aeroespacial y la industria médica.

La FDM es una tecnología de fabricación aditiva en rápido crecimiento, ya que ofrece una serie de ventajas sobre los métodos de fabricación tradicionales.

Se utilizará como material el termoplástico de poliuretano esto por una serie de propiedades específicas del material como:

- Flexibilidad: el TPU es un material flexible, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren piezas que puedan doblarse o estirarse sin romperse. Por ejemplo, el TPU se utiliza para fabricar fundas de teléfonos móviles, correas de reloj y otros productos que deben ser flexibles.
- Resistencia al desgaste: el TPU es un material resistente al desgaste, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren piezas que puedan soportar la abrasión. Por ejemplo, el TPU se utiliza para fabricar ruedas, engranajes y otros productos que están expuestos a la abrasión.
- Resistencia a los impactos: el TPU es un material resistente a los impactos, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren piezas que puedan soportar golpes o caídas. Por ejemplo, el TPU se utiliza para fabricar

protectores de pantalla, parachoques y otros productos que están expuestos a impactos.

Además de estas propiedades, el TPU también es un material duradero y fácil de imprimir. Esto lo hace una opción atractiva para una variedad de aplicaciones de impresión 3D.

Algunos ejemplos específicos de aplicaciones que utilizan TPU para impresiones 3D incluyen:

- Industria automotriz: se utiliza para fabricar piezas de automóviles, como juntas, sellos y protectores.
- Industria aeroespacial: se utiliza para fabricar piezas de aviones, como componentes electrónicos y paneles de instrumentos.
- Industria médica: se utiliza para fabricar implantes, prótesis y otros dispositivos médicos.
- Consumo: se utiliza para fabricar juguetes, artículos deportivos y otros productos de consumo.

En general, el TPU es un material versátil que ofrece una serie de ventajas para las impresiones 3D.

La necesidad de realizar un análisis de elemento finito (FEA) surge de la intención de predecir el comportamiento de una estructura o componente bajo cargas y condiciones específicas. El FEA es una herramienta computacional que permite modelar y analizar estructuras y componentes complejos.

El FEA tiene una serie de ventajas sobre los métodos de análisis tradicionales, incluyendo:

- Precisión: el FEA puede proporcionar resultados más precisos que los métodos de análisis tradicionales, ya que tiene en cuenta la geometría, las

propiedades del material y las condiciones de carga de la estructura o componente.

- Versatilidad: el FEA puede utilizarse para analizar una amplia gama de estructuras y componentes, incluidas estructuras complejas con formas irregulares.
- Eficiencia: el FEA puede ser una forma eficiente de analizar estructuras y componentes, ya que puede realizarse en un ordenador.

El FEA se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo:

- Diseño: el FEA se utiliza para diseñar estructuras y componentes seguros y eficientes.
- Validación: el FEA se utiliza para validar el diseño de estructuras y componentes existentes.
- Optimización: el FEA se utiliza para optimizar el diseño de estructuras y componentes para mejorar su rendimiento.

Algunos ejemplos específicos de aplicaciones que utilizan el FEA incluyen:

- Ingeniería mecánica: el FEA se utiliza para analizar estructuras mecánicas, como puentes, edificios y aviones.
- Ingeniería civil: el FEA se utiliza para analizar estructuras civiles, como presas, túneles y puentes.
- Ingeniería aeroespacial: el FEA se utiliza para analizar estructuras aeroespaciales, como aviones, cohetes y satélites.
- Ingeniería biomédica: el FEA se utiliza para analizar implantes médicos, prótesis y otros dispositivos médicos.

En general, el FEA es una herramienta valiosa que puede utilizarse para una amplia gama de aplicaciones.

1.4. OBJETIVO

El empaque es fundamental dentro de la disciplina de logística ya que participa desde inicio en el punto de producción del material, hasta el final del trayecto que es la entrega del producto al cliente o para el fin que éste requiera.

Los resultados de este proyecto se espera que contribuyan a la mejora del desempeño en los empaques y, por lo tanto, en la logística. Se espera que las conclusiones del estudio ayuden a la industria automotriz a desarrollar sus propios insertos bajo esta línea de trabajo que permita mejorar la calidad de sus entregas.

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño mediante simulación por elemento finito de empaques internos fabricados mediante el proceso de manufactura aditiva de impresión 3D por deposición fundida para garantizar que se cumple con la norma internacional ASTM D642 que establece los requisitos para la determinación de la resistencia a la compresión de contenedores de envío, componentes y unidades de carga. En este proyecto se realizará específicamente con un componente que es el inserto. El valor por cumplir requerido por la norma para componentes debe ser de al menos 150 psi (1034 kPa). Con lo anterior se espera proponer una alternativa más para la elaboración de este tipo de componentes.

1.4.2. Objetivos específicos

- Fabricar un inserto mediante el proceso FMD de manufactura aditiva.
- Realizar una simulación de análisis de elemento finito para verificar que la geometría seleccionada para el inserto es la adecuada para soportar la carga de estiba.
- Realizar pruebas de compresión en una prensa hidráulica en base a la norma ASTM D642 para confirmar la funcionalidad del inserto.

1.5. HIPÓTESIS

Los insertos fabricados mediante manufactura aditiva pueden cumplir con el requerimiento de compresión estandarizado que solicita una resistencia a la compresión de los componentes de al menos 150 psi (1034 kPa) solicitado por la cadena de suministro automotriz convirtiéndose en otra opción para fabricar estos componentes.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ADMINISTRACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO

2.1.1. Actualidad en la administración de la cadena de suministro

El estudio de la administración de la cadena de suministro (SCM / Supply Chain Management), inicialmente introducida en el año 1982 ha ganado un tremendo interés tanto en lo académico como en lo industrial. Desde entonces practicantes y académicos han tratado varias maneras de mejorar y gestionar las cadenas de suministro, las cuales son utilizadas para resolver problemas y retos complejos que enfrentan una moderna y dinámica industria/economía. Temas de investigación como la coordinación, la resiliencia, la logística reversa, la integración, las finanzas, las practicas sustentables, son exploradas para beneficiar el desarrollo de la SCM. Con la actual globalización donde la presión por la demanda y variedad de productos, la innovación y el volumen de producción extraterritorial se encuentran en su punto máximo, los problemas de la cadena de suministro ya no son simples, ya que envuelve sistemas complejos que incluyen flujo internacional de material, flujo de finanzas, políticas foráneas, responsabilidad social, negocios de riesgo, etcétera. Por lo tanto, la administración de la cadena de suministro sigue siendo una disciplina que requiere una atención académica significativa (Daim & Yalçın, 2022).

Se hace notable que la SCM ha crecido de la mano con la globalización, resaltando la necesidad de continuamente dedicar atención a esta línea para poder hacerla sostenible y más eficiente para ser capaces de cubrir demandas complejas que se presentan en esta actividad.

2.2. HISTORIA DEL EMPAQUE

2.2.1. Retrospectiva del empaque

La historia del empaque es corta porque no ha sido bien documentada, no hay muchos registros históricos sobre el desarrollo del empaque debido en general, a que las personas han prestado más atención al contenido que al empaque, lo que

dificulta la comprensión de su evolución. El hecho de que las personas han prestado más atención al contenido que al empaque significa que, durante mucho tiempo, el empaque se ha visto como una necesidad secundaria, un elemento que simplemente sirve para proteger y transportar el producto.

Lo anterior explica dos razones principales referentes al contexto del empaque en donde el registro de la historia es corto y se atribuye a que el principal interés con respecto a un embalaje está más enfocado al producto que lleva que el medio para contenerlo, pasando este a un segundo plano. Dado lo anterior, no se lleva un registro histórico de estos componentes como tal, el conocimiento que se tiene de los empaques es por relatos donde se mencionan como complemento del factor principal que se priorizaba mover o almacenar. Los empaques son tan antiguos como la necesidad que tenían los primeros hombres por alimentarse ya que no siempre podían estar dependientes cada día de encontrar alimento donde se encontraban o a donde viajaran, el ser humano pronto se dio cuenta de lo necesario que le era contar con un medio para mover y salvaguardar insumos indispensables como su alimento y herramientas, de ahí que el empaque fue un avance en la evolución para contar con la disponibilidad inmediata de recursos necesarios para su vida diaria.

Los humanos primitivos eran principalmente recolectores, por lo que desarrollaron técnicas para conservar los alimentos con la finalidad de tener reservas en caso de escasez.

2.2.2. Evolución de las características del empaque con respecto a las necesidades

Conforme avanzaba la evolución del ser humano se encontraban nuevos retos que tenían que ser afrontados y solucionados, el empaque no fue la excepción; surgían necesidades de transportar insumos y bienes como materiales, alimentos y herramientas, a lugares más lejanos, más volumen, por caminos más complejos y por más tiempo. Para lidiar con esto se comenzaba a dedicar más tiempo en la conceptualización y desarrollo del empaque. Es así como los primeros pobladores

comenzaban ya a experimentar con diversos recursos naturales como pieles, troncos y fibras naturales para transportar y conservar por más tiempo sus bienes; conforme al paso del tiempo para muchos productos se procedió a ya no solo utilizar los elementos de la naturaleza para sus fines, si no a procesar estos para tener mayor aprovechamiento y comodidad en el manejo de bienes. Se comenzó a notar que ya no únicamente se tenía que trabajar en un envase, si no en un embalaje integral que permitiera cumplir funciones de protección, almacenaje y transporte. Posteriormente, cuestiones como navegar, explorar nuevos territorios, comerciar hasta la etapa industrial, que consistía en producir, almacenar y distribuir, requería de empaques con características como alta capacidad volumétrica para almacenar, capacidad de estibarse para optimizar áreas de resguardo, a partir de materiales más complejos que resistieran el manejo del empaque; razón que resultó en la generación de complementos para el empaque como el hecho de adicionar brebajes como vinagre o vino para conservar el agua dentro de sus contenedores, utilizar tapones de arcilla embadurnadas con yeso para cerrar ánforas (recipientes de barro cocido), alforjas y serones para cargar los contenedores o estibarlos y etiquetas para identificar el contenido.

En las décadas siguientes, la cantidad y variedad de productos envasados aumentó considerablemente. Para 1920, la mitad de los productos que se vendían en los mercados industrializados estaban envasados (Fantoni, 2003).

2.3. EL EMPAQUE

2.3.1. Importancia del empaque

Las funciones principales de los envases en la cadena de suministro son la protección, la contención y la conservación. Además de estas funciones tradicionales, existe una creciente conciencia de los beneficios de los envases más eficientes y respetuosos con el medio ambiente (Emblem & Emblem, 2012), (Giles & Bain, 2001). Tanto desde la perspectiva financiera como desde la sostenible, el embalaje eficiente conduce a una cadena de suministro más eficiente. La reducción de los materiales de embalaje es uno de los esfuerzos representativos

que mejora el desempeño ambiental y reduce los costos operativos. Además, debido a los cambios legislativos recientes con respecto a los envases y los residuos de envases, muchas empresas deben reconsiderar el uso de envases (Theobald & Winder, 2008).

El empaque es una barrera que protege los productos de daños físicos y deterioro durante el transporte y el almacenamiento. Esto ayuda a garantizar que los productos lleguen a los consumidores en buenas condiciones y que se puedan usar durante el tiempo especificado por el fabricante.

2.3.2. Función del empaque

De acuerdo con el International Trade Center UNCTAD/WTO el empaque tiene cuatro funciones básicas:

- 1) Contener
- 2) Proteger
- 3) Facilitar el manejo
- 4) Promover las ventas

Cada paquete y cada parte del paquete debe cumplir estas cuatro funciones esenciales de la manera más económica posible. Las primeras tres funciones apoyan el diseño estructural, mientras que la última se relaciona con el método gráfico.

Los materiales de embalaje que protegen los artículos frágiles, como los electrónicos y el vidrio, son cruciales y requieren un diseño y una producción cuidadosa (International Trade Center, 2000). Estos materiales deben tener excelentes propiedades de amortiguación para proteger eficazmente los productos envasados, al mismo tiempo que debe de tener una baja densidad para reducir los costos de transporte, buenas propiedades de barrera para evitar la humedad y buena procesabilidad para una amortiguación adecuada. El factor más crucial en la selección de materiales de embalaje acolchados es su capacidad para absorber la energía del impacto y controlar la aceleración del

impacto dentro del rango de fragilidad del producto. Además, al usar menos material de diseño, el empaque debe proporcionar una amortiguación eficiente para absorber la energía del impacto. Las espumas plásticas y el poliestireno tienen altos costos de elaboración, constituyen la mayor parte de los materiales de embalaje de protección y amortiguación y plantean notables problemas de eliminación de estos por su degradación retardada (Blanco, 2020). Por lo tanto, ha surgido la demanda de materiales de amortiguación sostenibles y biodegradables, lo que ha llevado a la creación de materiales celulares de ingeniería con formas, tamaños y densidades definidos utilizando tecnología de impresión 3D (Colorado, Velásquez, & Montero, 2020). Las estructuras de celosía hechas de estos materiales son materiales absorbentes de energía eficientes y superiores con el potencial de escalamiento en aplicaciones de ingeniería (Elmrabet & Siegkas, 2020), (Wittbrodt & Pearce, 2015), (Schmitt, Mehta, & Kim, 2020). Por ejemplo, los investigadores han demostrado la capacidad de absorción acústica de las espumas de poliácido láctico con varios tamaños de celdas y distribuciones producidas con tecnología de impresión 3D (Ambekar, y otros, 2021), (American Society for Testing and Materials, 2014). Un punto esencial por considerar son las propiedades mecánicas de las piezas impresas en 3D. Las propiedades mecánicas de los componentes impresos en 3D pueden variar según varios factores, incluida la tecnología de impresión, el material utilizado, el diseño de la pieza y las técnicas de procesamiento empleadas posteriormente.

Esta investigación está relacionada directamente con la función de protección del empaque, específicamente en la cadena de suministro de faros para el sector automotriz.

Algunas propiedades mecánicas comunes de las piezas impresas en 3D que es importante tener en cuenta son las siguientes (International Organization for Standardization, 2019), (El Moumen, Tarfaoui, & Lafdi, 2019), (Yao, Deng, Zhang, & Li, 2019):

- La fuerza: se refiere a la carga o tensiones máximas que una pieza impresa en 3D puede soportar antes de romperse. Está influenciado por el material utilizado, la orientación de la impresión, la densidad del relleno y el grosor de la capa.
- Rigidez: se refiere a la capacidad de una pieza impresa en 3D para resistir la deformación bajo una carga aplicada que está influenciada por el material utilizado y la geometría de la pieza.
- Dureza: se refiere a la capacidad de una pieza impresa en 3D para absorber energía antes de fracturarse. Está influenciado por el material utilizado y los parámetros de impresión.
- Resistencia a la fatiga: se refiere a la capacidad de una pieza impresa en 3D para soportar cargas repetidas a lo largo del tiempo. Está influenciada por el material utilizado, la orientación de la impresión, la densidad del relleno y las técnicas de post procesamiento empleadas.
- Resistencia a la fluencia: se refiere a la capacidad de una pieza impresa en 3D para resistir la deformación bajo una carga constante a lo largo del tiempo. Está influenciada por el material utilizado y los parámetros de impresión.

Es esencial tener en cuenta estas propiedades mecánicas al diseñar piezas impresas en 3D para aplicaciones específicas. Además, la realización de pruebas y análisis puede determinar las propiedades mecánicas de una pieza impresa en 3D y optimizar su rendimiento (American Society for Testing and Materials, 2014), (International Organization for Standardization, 2019).

Tomando nuevamente en consideración al International Trade Center UNCTAD/WTO se señala que un empaque debe proteger contra:

- 1) Deterioro
- 2) Ruptura
- 3) Humedad
- 4) Robo

Con respecto a la función de protección del empaque, para este proyecto se trabajó específicamente el aspecto de proteger contra la ruptura a la pieza que

se encuentra dentro del empaque, por lo tanto, la protección para los elementos de deterioro, humedad y robo, no serán motivo de toma de decisión para este proyecto.

2.4. DAÑOS EN LOS EMPAQUES Y CONTRAMEDIDAS PARA EVITARLOS

2.4.1. Efectos que causan daños en empaques y ruptura de piezas en la cadena de suministro

El trayecto de una pieza o producto, desde que sale de la línea donde es producida hasta el punto final a donde debe de llegar, está expuesto a peligros en el trayecto que pueden provocar daño en el elemento fabricado. Los efectos más comunes a los que se somete una pieza en la cadena de suministros son:

- 1) Vibraciones: Este fenómeno ocurre en los transportes que trasladan el producto pueden ser vía marítima, terrestre, aéreo o combinaciones de estos medios. Es producto del ambiente por el cual se mueven los transportes, por ejemplo: caminos complicados, amortiguación del vehículo en malas condiciones o por la misma naturaleza del transporte que se genera este efecto afectando al producto transportado.
- 2) Golpes, caídas e impactos: Estos suelen darse por el manejo del material cuando, por lo general por falta de conciencia se suele golpear al contenedor del material con el montacargas, o en procesos de cargas y descargas de material en el que se puede dejar mal colocado el empaque o lanzarlo provocando caídas que dañarían su contenido.
- 3) Cargas de compresión: Este efecto se refiere a cargas estáticas a las que se someten los empaques debido a que se coloca peso encima de este, generalmente suelen ser otros empaques los que se estiban comprimiendo el material del empaque y en casos serios, llegando estas fuerzas hasta la pieza dañándola.
- 4) Condiciones atmosféricas: Las altas o bajas temperaturas a las que se expone el empaque según la geografía por donde se esté trasladado el material.

2.4.2. Métodos para contrarrestar daños en piezas

El empaque es una barrera que protege los productos de daños físicos, deterioro y contaminación. El tipo de empaque que se necesita depende del tipo de producto y de los factores a los que se expone durante el transporte y el almacenamiento.

La elección de materiales y protecciones adicionales para el empaque nace primeramente de la naturaleza del producto que lleva, y del ambiente logístico en el que se encontrará; es decir, las características del transporte, almacenamiento, interacción con trabajadores, entre otros. Para mitigar las cargas y fatigas a las que puede estar sometido un producto, se busca que el empaque cumpla con los siguientes puntos:

- Inmovilizar el producto que contiene el empaque, para reducir las vibraciones.
- Proporcionar amortiguación para los impactos que se presentan por caídas.
- Fortalecimiento del empaque, mediante rellenos o refuerzos para soportar cargas sobre el empaque.
- Modulación y unificación, para proporcionar rigidez.
- Sellado del empaque con cinta, pegamento, grapas etc.
- Empaques herméticos y disecantes para contrarrestar la humedad y evitar oxidación y corrosión en los productos.

Como se mencionó anteriormente, uno de los objetivos del presente proyecto fue desarrollar empaques internos (insertos) que sirvan para contrarrestar las vibraciones, cargas e impactos en faros de vehículos (Klimchuk, 2012).

2.4.3. Pruebas de laboratorio para desempeño del empaque

Como en todos los campos, el rol de las pruebas de desempeño en un laboratorio es fundamental para confirmar la calidad del producto y la protección de la seguridad para quienes interactúan con este. El caso de los embalajes no es la excepción, se requiere de validaciones conforme a estándares de nivel global para confirmar que se cumplen con las regulaciones solicitadas para transitar en determinados territorios.

Dependiendo el contexto del empaque como: constitución propia del producto que contiene (si es alimento, medicamento, o si contiene agentes tóxicos o de fácil inflamabilidad), materiales utilizados en el embalaje (cartón, madera, metal, polímeros entre otros.), el transporte que en el que se moverá (ferrocarril, tráiler, avión o combinación de varios), donde por determinado tiempo se almacenará, así como las condiciones ambientales y el territorio a donde entrará, se solicitan pruebas de acuerdo a estándares internacionales. Dichos estándares pueden ser:

- ISTA (International Safe Transit Association) ISTA Lab Certification
- ISO (International Organization for Standardization)
- ASTM International (American Society for Testing and Materials)
- CEN (European Committee for Standardization)
- TAPPI (Technical Association for the Pulp and Paper Industry)
- NMFTA (National Motor Traffic Association) FCDC Lab Certification

De los estándares previamente mencionados, para el caso de la industria automotriz en la región de Norte América las pruebas más comunes que ayudan a predecir el comportamiento del empaque son las siguientes:

- ASTM D642: método estándar para determinar la resistencia de compresión de embalajes y sus componentes.
- ASTM D4169: estándar para pruebas de rendimiento de contenedores y sistemas de envío. Esta prueba proporciona una base para evaluar la capacidad de las unidades de envío para validar que pueden soportar el entorno de distribución. Esto se logra sometiendo a un plan de pruebas (compresión, caída libre, vibración y cámara de humedad) que simula una secuencia de elementos de peligro anticipados encontrados en varios ciclos de distribución.

Otro estándar de pruebas comúnmente utilizada por la industria automotriz en Norte América son las normas ISTA descrita a continuación de manera general.

- ISTA General Simulation Performance Tests: estos protocolos son pruebas generales de simulación que están diseñadas para recrear en un laboratorio los movimientos, fuerzas, condiciones y secuencias que producen daños en

los entornos de transporte. Las pruebas que se realizan bajo esta norma incluyen vibraciones aleatorias de forma simple, pruebas de caída a diferentes altura y pruebas climatológicas que simulan ambientes como el tropical o invernal.

Cabe hacer mención que el prototipo de este proyecto se sometió a la prueba de compresión de acuerdo con la norma ASTM D642.

2.5 INSERTOS

2.5.1. Empaque interno

El inserto es el componente que refuerza el embalaje, ya que debe proteger el producto de impactos y vibraciones y volver a su forma original para proporcionar una mayor amortiguación.

A continuación, se mencionan las características de algunos empaques internos que son ampliamente utilizados en la actualidad:

- Lose Fill (reellenos): se utilizan para rellenar espacios vacíos adicionando rigidez y amortiguamiento al producto transportado. Suelen ser de poliestireno expandido o plástico.
- Encapsulados de aire: material de embalaje hecho de burbujas de aire encerradas entre dos láminas de polietileno a medida que se sellan entre sí. Este proceso permite que el aire encapsulado proporcione un colchón para proteger contra golpes.
- Láminas de FOAM (Polietileno espumado): material de lámina de espuma ligera, suave y resistente que proporciona una excelente protección de la superficie y propiedades de amortiguación.
- Bolsas de aire: el empaque inflable utiliza presión de aire para asegurar y mantener los productos en su lugar dentro del embalaje y proporciona una barrera de aire de amortiguación.
- FOAM (Polietileno) Expandido: está formado por una mezcla química que se expande en forma de espuma y genera un molde protector alrededor del

contenido o producto. La espuma en el lugar forma un molde alrededor de cualquier producto, apoya las esquinas, protege los bordes y es útil donde se necesita amortiguación.

- Papel Kraft: el papel Kraft se envuelve y arruga para llenar el espacio vacío dentro de un embalaje, proporciona rigidez y amortiguamiento.
- FOAM (Poliestireno) expandido: es una espuma moldeable, liviana y de bajo costo con capacidades mínimas de amortiguación de impactos. El EPS a menudo se diseña con costillas que se comprimirán con el impacto y volverán a su forma original. No es tan resistente como otras espumas de polietileno o poliuretano (United Parcel Service of America, 2023).

Es importante resaltar que los materiales y el proceso de manufactura aditiva no han sido considerados para la elaboración de empaques internos.

2.6 MANUFACTURA ADITIVA

2.6.1. Concepto de manufactura aditiva

La manufactura aditiva es el término formalizado de lo que solía ser considerado prototipado rápido: sin embargo, los usuarios de esta tecnología se dieron cuenta de que este término es inadecuado debido a que únicamente está enfocado a prototipos no funcionales. Actualmente, las mejoras en la calidad del producto final que se obtiene de estas tecnologías han alcanzado a reproducir resultados que cumplen con las características necesarias para ser considerados un producto final y que, de hecho, ya muchas partes son elaboradas mediante este medio de manufactura.

El principio básico de esta tecnología es generar un modelo 3D haciendo uso de un sistema de diseño asistido por computadora (CAD) o con un escáner 3D, obteniendo un concepto digital de la pieza que posteriormente es dividido en capas individuales para posteriormente generar un código con el patrón de la figura para reproducirse en una máquina de manufactura aditiva.

2.6.2. Procesos actuales de manufactura aditiva

La norma ISO/ASTM52900-15 es un estándar para la fabricación aditiva (MA) (Wang, Zou, Xiao, Ding, & Huang, 2019), que proporciona un conjunto estándar de terminología, principios de proceso y metodologías de control de procesos para la industria de MA. El propósito principal de esta norma es establecer una base para la comunicación y el entendimiento entre las partes interesadas en la industria de MA, incluidos los diseñadores, fabricantes, investigadores y reguladores (Wang, Zou, Xiao, Ding, & Huang, 2019).

La norma ISO/ASTM52900-15 proporciona un marco integral para todo el proceso de MA, incluidos el diseño, los materiales, los parámetros del proceso, el post procesamiento, las pruebas y el control de calidad. Además, incluye lineamientos para la caracterización, validación y verificación de procesos, así como requisitos de documentación y trazabilidad. La norma también define términos y conceptos clave utilizados en MA, como el grosor de la capa, la orientación de la construcción y la plataforma de construcción.

La norma ISO/ASTM52900-15 tiene como objetivo promover la estandarización y la consistencia en la industria MA, lo que puede ayudar a mejorar la calidad, reducir los costos y acelerar la adopción de la tecnología MA. Además, al proporcionar un lenguaje común y una comprensión compartida de los procesos de MA, esta norma puede ayudar a facilitar la colaboración y la innovación en la industria al tiempo que garantiza la seguridad y el cumplimiento normativo. Por ejemplo, según la ISO/ASTM52900-15 relativa a la norma de categorización del proceso de fabricación aditiva, existen siete procesos de fabricación aditiva, descritos a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Procesos de fabricación aditiva más habituales

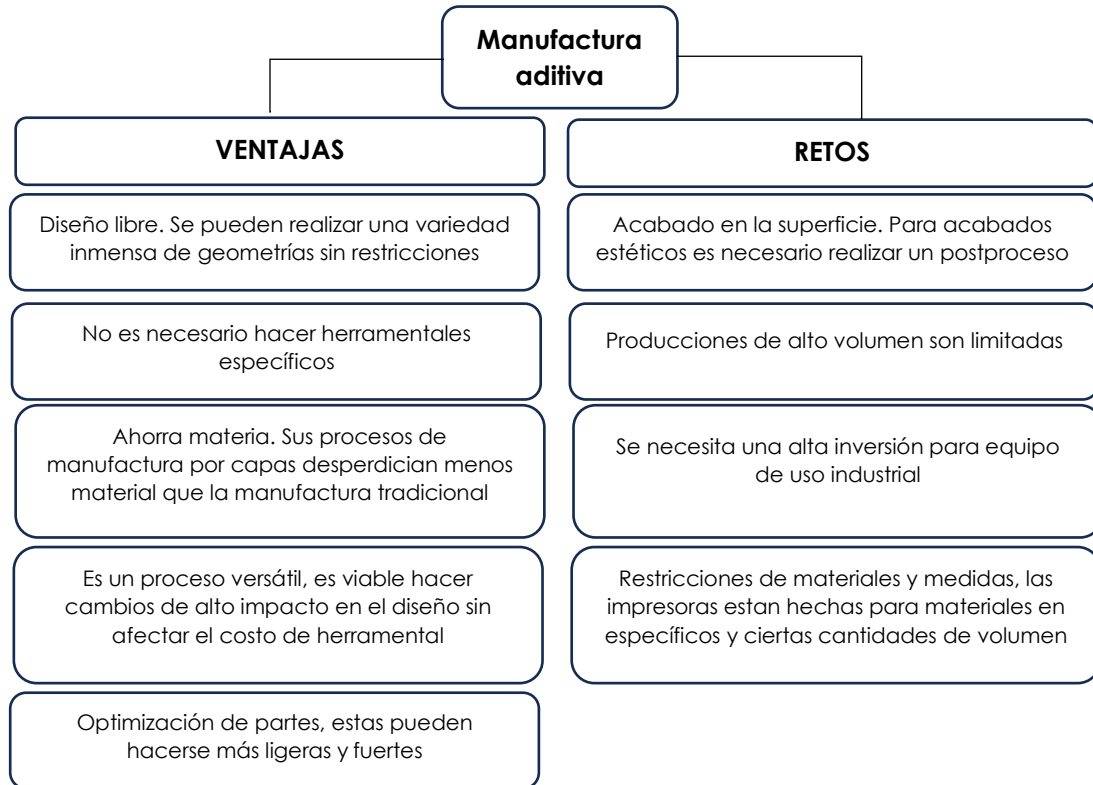
Proceso manufactura aditiva	Descripción del proceso de manufactura aditiva
Binder Jetting	Un proceso de impresión 3D que deposita un agente líquido sobre una cama de polvo, solidificando las capas para crear una figura. El proceso se puede utilizar para crear figuras de yeso, arena, vidrio, metal y otros materiales pulverizados.
DED (Directed Energy Deposition)	La impresión 3D por fusión láser es un proceso de fabricación aditiva que utiliza un láser para fundir metal en polvo o alambre. El láser se mueve a lo largo de un brazo robótico multi ejes, creando una capa de metal fundido. El proceso se repite hasta que se crea la figura complete.
Extrusión de material	Un proceso de impresión 3D que deposita un material líquido sobre un sustrato capa por capa. El material puede ser un filamento termoplástico, concreto, arcilla, tejidos orgánicos o incluso comida.
Material Jetting	La impresión 3D por estereolitografía utiliza cabezales de impresión para rociar una resina líquida sobre un sustrato. La resina se endurece mediante luz ultravioleta, creando una capa de la figura.
Powder bed fusion	La impresión 3D por fusión de lecho de polvo utiliza una fuente de energía, como un láser o un haz de electrones, para calentar las partículas de polvo hasta derretirlas y unificarlas.
Sheet lamination	En la impresión 3D por laminación de hojas, las hojas de un material son fusionadas capa por capa para crear la forma deseada. Este proceso es relativamente raro, pero se puede utilizar con una variedad de materiales, incluyendo papel, plástico y metal.
Vat photopolymerization	Una resina de fotopolímero es expuesta a una fuente de energía, como un haz de láser o un proyector digital de luz. La energía endurece el material capa por capa, creando la pieza deseada. Este proceso se suele utilizar con plásticos termoestables, que son materiales que se endurecen permanentemente cuando se exponen a la luz ultravioleta.

(Zhang & Jung, 2018)

2.6.3. Ventajas y retos de la manufactura aditiva

En la Tabla 2 se muestra de manera general las principales ventajas y retos aún por resolver de la manufactura aditiva.

Tabla 2. Ventajas y retos en la manufactura aditiva



(Zhang & Jung, 2018)

Las principales ventajas y desventajas de los procesos de manufactura aditiva más utilizados actualmente se concentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Principales características de procesos de manufactura aditiva

Proceso manufactura aditiva	Ventajas	Desventajas
SLA	Tecnología de manufactura aditiva más establecida que cuenta con varios fabricantes de insumos y este tipo de máquinas	Procesar materiales como polímero-cerámico y metamaterial es complicado en esta tecnología
FMD	Mejor relación costo / desempeño	Lento proceso de construcción capa por capa
SLS	Capaz de elaborar partes de alto desempeño a base de polímeros	Posibilidad de impresiones con textura granulada que requerirían post proceso para tener un acabado más estético
Material jetting	Más exactitud de impresión de geometrías	Está limitado en cuanto a materiales para trabajar
Binder jetting	Alta resolución visual	Riesgo de variación en forma y dimensiones por la distribución del polvo en el proceso

(Zhang & Jung, 2018)

En la Tabla 4 se muestra una comparación de costos por equipo de manufactura aditiva y convencional con sus respectivos materiales, así como el tiempo de entrega de la producción de Brackets de acuerdo con cada método de manufactura contemplado en este análisis para la manufactura de 50 piezas con una geometría específica, ver Figura 1.

En la siguiente imagen se puede observar el costo total de manufactura y tiempo de entrega de la producción de Brackets de acuerdo con cada método de manufactura contemplado en este análisis.

Tabla 4. Desglose de costo y tiempo por método de manufactura

Proceso de manufactura	Material	Costo \$USD	Tiempo (días)
CNC	Aluminio	\$ 1,990.00	9
Inyección por molde	ABS	\$ 5,000.00	9
FDM	PLA	\$ 2,000.00	3
SLA	Resina fotopolímera	\$ 7,000.00	3
SLS	Nylon	\$ 3,150.00	3
SLS	Acero	\$ 8,920.00	21

(Phalen, 2021)

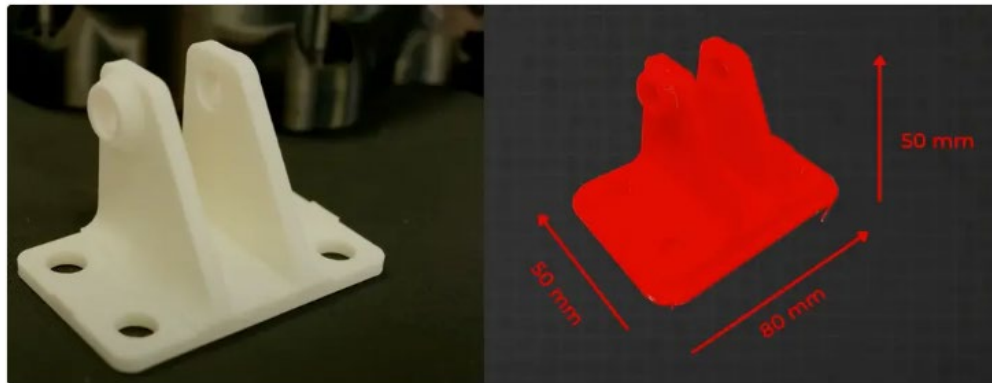


Figura 1. Diseño de "brackets" para realizar la comparación y producción de 50 piezas (Phalen, 2021)

En la siguiente gráfica (Figura 2) se puede notar el comportamiento de la comparación entre costos, proceso de manufactura aditiva, tiempo de entrega y materiales utilizados donde se nota que los procesos más balanceados son los de manufactura aditiva SLS y FMD.

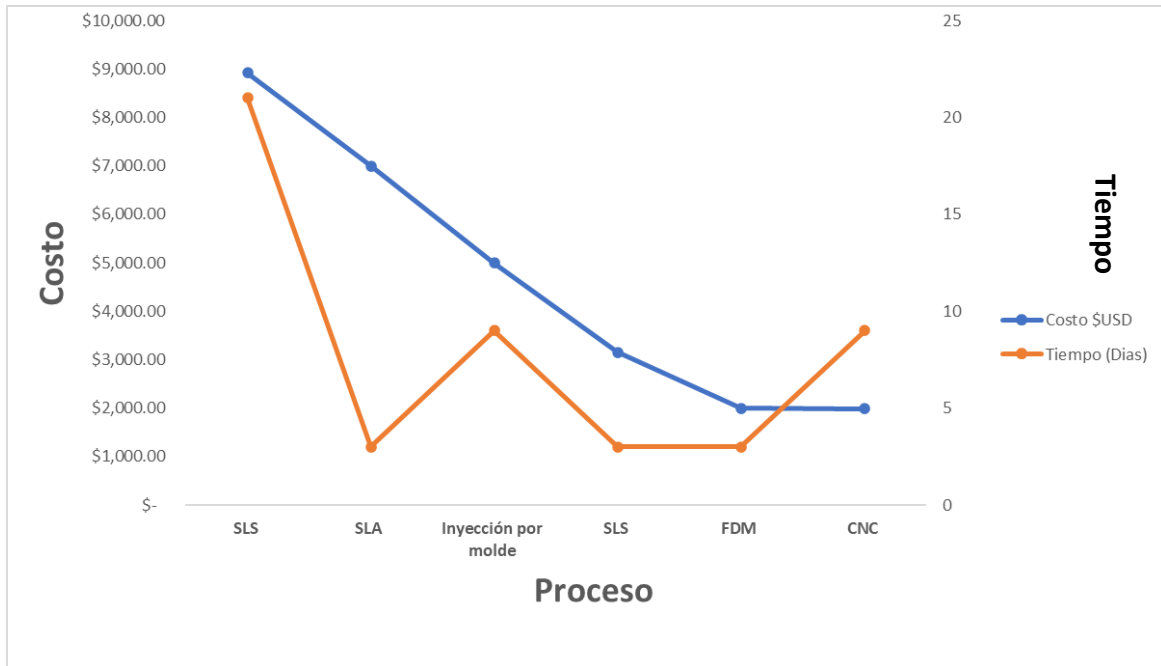


Figura 2. Gráfico de comportamiento de los procesos de manufactura aditiva
Elaboración propia

2.6.4. Comparación de costos y capacidad elástica y de tensión de distintos materiales

Utilizando las tablas de Ashby como referencia se analizaron las propiedades de diferentes materiales tanto naturales como artificiales en cuanto a resistencia a la tensión (ver Figura 3); así como el costo y capacidad elástica (ver Figura 4).

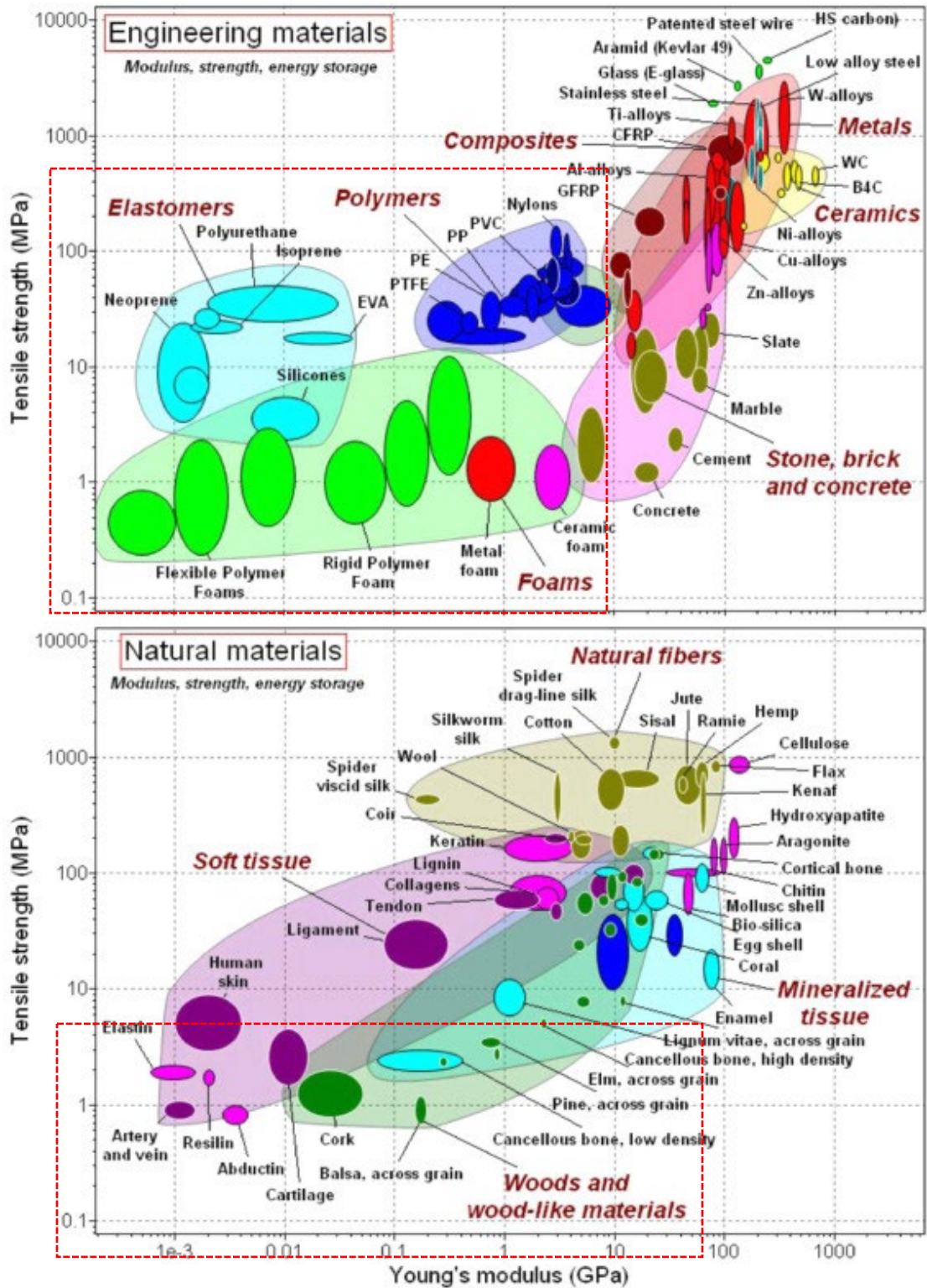


Figura 3. Tablas Ashby con lecturas de resistencia materiales naturales y artificiales (Ashby, 2017)

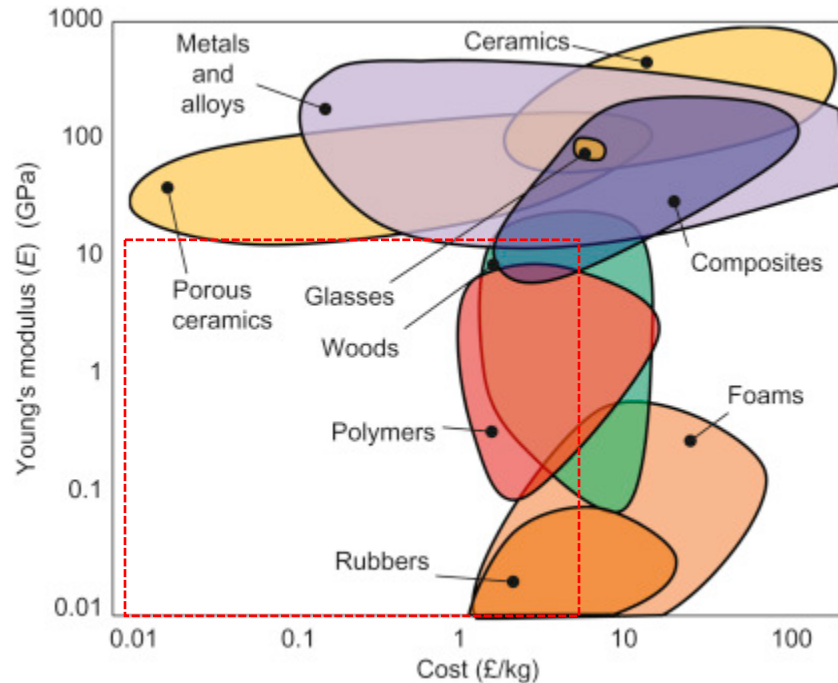


Figura 4. Tablas Ashby con lecturas de costo de materiales (Ashby, 2017)

Como conclusión en este proyecto, el inserto se fabricará mediante el proceso FMD (Fused Deposition Modeling) y el material TPU (Thermoplastic Polyurethane). Esta combinación ofrece una serie de ventajas, incluyendo:

- Coste: el proceso FMD es relativamente asequible, y el material TPU es un material económico.
- Tiempo de producción: el proceso FMD es rápido, lo que permite fabricar piezas en poco tiempo.
- Propiedades mecánicas: el material TPU tiene una resistencia a la compresión adecuada para soportar los esfuerzos a los que se someten los productos en los transportes. Además, es un material flexible, lo que permite sujetarse a las piezas sin dañarlas.

Por lo tanto, la combinación de proceso FMD y material TPU es una opción adecuada para la fabricación de este inserto.

2.6.5. FEA de simulación numérica

El Análisis de Elementos Finitos (FEA) es la simulación de cualquier fenómeno físico dado usando la técnica numérica llamada método de elementos finitos. El software FEA reduce la cantidad de prototipos físicos y experimentos y optimiza los componentes en su fase de diseño para desarrollar mejores productos más rápido y ahorrar en gastos (American Society of Testing and Materials, 2021). Es necesario utilizar las matemáticas para comprender y cuantificar cualquier fenómeno físico de manera integral. El desarrollo de FEA ha sido impulsado por el deseo de cálculos de diseño más precisos en situaciones más complejas, lo que permite mejoras en los procedimientos y productos de diseño (American Society of Testing and Materials, 2021), (Andleeb, Khawaja, Andersen, & Moatamedi, 2022). Para este proyecto se utilizó el análisis de carga estática que implica los siguiente:

1. La descomposición de una estructura unificada en varias partes independientes.
2. La explicación del comportamiento mecánico de cada elemento de una manera sencilla.
3. La unión de elementos mediante nodos que permiten la transferencia de fuerzas.

Este proceso utiliza un conjunto de ecuaciones para describir el equilibrio de cada nodo de la estructura, para determinar los valores del campo en los nodos de una estructura, se puede utilizar un proceso de minimización de una función en particular (ecuación 1), como la energía total. Este proceso genera un conjunto de ecuaciones algebraicas que se pueden expresar en forma matricial (Ibáñez Juárez, 2015).

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (\text{Ecuación 1}).$$

Donde:

$[K]$ = Matriz de rigidez

$\{u\}$ = Desplazamiento en nodos

$\{F\}$ = Carga nodal

2.6.6. Integración de impresión 3D y FEA

Las herramientas de simulación por computadora se han vuelto cada vez más populares en los últimos años para evaluar y mejorar varios procesos, incluidos muchos para la fabricación de componentes en diferentes aplicaciones. En particular, la tecnología de impresión 3D con herramientas de simulación avanzadas ha permitido a los ingenieros dar vida a los diseños virtuales en la realidad física, proporcionando una nueva y poderosa herramienta para la innovación y la optimización del diseño (Scapin & Peroni, 2021), (Alharbi, Kong, & Patel).

Las herramientas de simulación digital avanzada pueden someter prototipos o piezas de prueba creadas a través de la impresión 3D a diversas condiciones de funcionamiento simuladas, por ejemplo. Al ajustar el diseño mediante este proceso iterativo, los ingenieros pueden identificar y corregir posibles defectos de diseño o problemas de rendimiento antes de fabricar el producto (Zhang, Wang, Yu, & Deng, 2017), (Xia, Lu, & Tryggvason, 2019), (Chadha, y otros, 2019) . Además de mejorar el diseño y el rendimiento de los productos existentes, la impresión 3D y las herramientas de simulación avanzadas también facilitan la creación de aplicaciones completamente nuevas. Por ejemplo, los investigadores han utilizado estas herramientas para desarrollar estructuras y dispositivos complejos a microescala con funcionalidades únicas, como materiales bio inspirados, sensores y actuadores (Garzon Hernandez, Garcia Gonzalez, Jérusalem, & Arias, 2020), (Armillotta, Bellotti, & Cavallaro, 2018), (Wickramasinghe, Do, & Tran, 2020).

La integración de la impresión 3D y las herramientas de simulación avanzadas proporcionan un nuevo y poderoso enfoque para el diseño de ingeniería que impulsa la innovación y mejora la calidad final de muchos productos en diversas industrias, incluidas la aeroespacial, automotriz, médica y de bienes de consumo (González Bautista, Mercado Lemus, Hernández Hernández, Garduño Olvera, & Arcos Gutiérrez, 2022). A medida que estas tecnologías evolucionen y se adopten más ampliamente, es probable que sus aplicaciones potenciales continúen expandiéndose, así como las metodologías de inteligencia artificial como el

aprendizaje automático y los algoritmos de redes neuronales (Tamir, y otros, 2023), (Nguyen, Nguyen, Tao, Vogel, & Nguyen-Xuan, 2022), (Nasiri & Khosravani, 2021) , (Goh, Sing, & Yeong, 2021).

Para este proyecto se utilizará el software de SolidWorks ya que es una herramienta de diseño asistido por computadora (CAD) que se utiliza para crear modelos 3D de piezas y componentes. También incluye herramientas de análisis de elementos finitos (FEA) que se pueden utilizar para predecir el comportamiento de las estructuras y componentes bajo cargas y condiciones específicas.

SolidWorks es una buena opción para análisis de elementos finitos porque permite crear modelos 3D precisos, ofrece una amplia gama de herramientas y es relativamente fácil de aprender y usar.

En resumen, SolidWorks es una herramienta poderosa y versátil que puede utilizarse para realizar análisis de elementos finitos precisos y eficientes.

2.6.7. Termoplástico de poliuretano (TPU)

El TPU, o poliuretano termoplástico, es un material plástico flexible y resistente que se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la impresión 3D, la fabricación de productos, y la industria automotriz.

El TPU tiene una serie de propiedades que lo hacen un material versátil y atractivo para una variedad de aplicaciones. Estas propiedades incluyen:

- **Flexibilidad:** el TPU es un material flexible que puede soportar grandes deformaciones sin romperse. Esta propiedad lo hace ideal para aplicaciones que requieren una resistencia al impacto y a la vibración.
- **Resistencia:** el TPU es un material resistente que puede soportar cargas pesadas sin deformarse ni romperse. Esta propiedad lo hace ideal para aplicaciones que requieren una resistencia a la compresión, a la tracción, o a la flexión.

- **Durabilidad:** el TPU es un material duradero que puede resistir los efectos de la abrasión, el desgaste, y los agentes químicos. Esta propiedad lo hace ideal para aplicaciones que requieren una resistencia a la corrosión o a la degradación.
- **Calidad de impresión:** el TPU es un material fácil de imprimir con una buena calidad de acabado. Esto lo hace una buena opción para aplicaciones que requieren una apariencia estética.

El TPU se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo:

- **Impresión 3D:** el TPU es un material popular para la impresión 3D, ya que ofrece una buena combinación de flexibilidad, resistencia, y durabilidad. Se puede utilizar para crear una variedad de piezas, incluyendo prototipos, piezas funcionales, y piezas de uso cotidiano.
- **Fabricación de productos:** el TPU se utiliza en la fabricación de una variedad de productos, incluyendo calzado, ropa, artículos deportivos, y juguetes. Sus propiedades de flexibilidad, resistencia, y durabilidad lo hacen ideal para estas aplicaciones.
- **Industria automotriz:** el TPU se utiliza en la industria automotriz para crear una variedad de piezas, incluyendo sellos, juntas, y componentes de suspensión. Sus propiedades de resistencia a la abrasión y a la corrosión lo hacen ideal para estas aplicaciones.

Las principales ventajas del TPU son su flexibilidad, resistencia, durabilidad, y calidad de impresión. Estas propiedades lo hacen un material versátil y atractivo para una variedad de aplicaciones.

Algunas de las desventajas del TPU incluyen su precio relativamente alto y su menor resistencia a la temperatura que otros materiales plásticos.

Como conclusión, el TPU es un material versátil y atractivo que ofrece una buena combinación de flexibilidad, resistencia, y durabilidad. Se utiliza en una amplia

gama de aplicaciones, incluyendo la impresión 3D, la fabricación de productos, y la industria automotriz.

3. PROCEDIMIENTO

En esta sección se describen las propiedades del material de impresión, las características del equipo de impresión y los parámetros de impresión 3D utilizados. También se describen las condiciones de simulación y las pruebas de laboratorio.

3.1. Impresión de inserto

Para fines del presente proyecto se empleó el proceso de modelado por deposición fundida (FDM) para fabricar el inserto. Se eligió un filamento de poliuretano termoplástico (TPU) por sus propiedades mecánicas, específicamente su capacidad para soportar elongación y tensión, que son esenciales para soportar las tensiones del producto durante el transporte. Además, la flexibilidad del TPU le permite sujetar las piezas de forma segura sin causar ningún daño. El análisis de elementos finitos se realizó utilizando el software SolidWorks (Dassault Systèmes SolidWorks, s.f.).

3.1.1. Características de la impresora 3D

En cuanto a la fabricación del inserto, en esta investigación se utilizó una impresora modelo Artillery Genius Pro con dimensiones del volumen de impresión son 220 x 220 x 250 mm, cama calefactable que aumenta la temperatura ambiente de 0° a 120 °C en 3 minutos y soporta materiales flexibles. Además, cuenta con una plataforma de vidrio templado y tornillo de doble accionamiento, lo que permite una impresión más estable con alta precisión y velocidad de movimiento.



Figura 5. Artillery Genius estructura y dimensiones exteriores y de espacio de impresión
Elaboración propia

3.1.2. Propiedades del filamento de impresión 3D

El filamento para la impresora 3D utilizado en esta investigación es de Amazon Basics con un diámetro de 1,75 mm +/- 0,05 mm; de color negro; la bobina contiene 1 Kg de filamento. El material corresponde al poliuretano termoplástico (TPU), con alta resistencia a la tracción (26 MPa) y alta flexibilidad (4,3 MPa), y resiste aceites, grasas y rayones; resiste bien el uso más riguroso.

3.2. Diseño de inserto

El inserto diseñado en este estudio es circular, lo que facilita su adaptación al perfil del faro del automóvil. El inserto consta de dos círculos concéntricos, uno con un diámetro de 150 mm y el otro con un diámetro de 200 mm; así como un espesor de toda la pieza de 10 mm. Los círculos concéntricos están unidos por 27 radios flexibles de 30 mm de longitud y también de 10 mm de espesor que sirven de soporte, contrarrestando las cargas sobre la pieza (Figura 6). En particular, el diseño del inserto se inspiró en el proyecto titulado "Estudio teórico de la heterogeneidad de las fuerzas en neumáticos sin aire fabricados con poliuretanos elásticos" (Mazur, 2022), que presenta una estructura para un neumático sin aire que sirvió de base para el diseño del inserto.

La estructura del inserto permite la flexibilidad para adaptarse a las diferentes geometrías de los productos a contener y la capacidad de trabajar cargas de compresión.

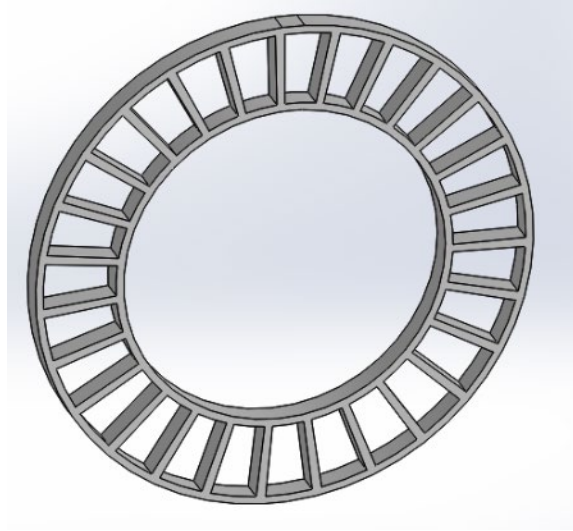


Figura 6. Estructura propuesta para el inserto polimérico
Elaboración propia

3.3. Análisis de elementos finitos

El inserto está diseñado para contener un faro, y el proceso de estiba consiste en colocar peso gradualmente sobre la caja de cartón. Este peso creará los módulos de material que se transferirán como producto final. Dado lo anterior, las condiciones de contorno para este análisis serán un punto de apoyo fijo en la parte inferior del inserto, otro punto de apoyo fijo en el interior del inserto que simulará la pieza que está en su interior y una carga puntual de compresión en la parte superior. La carga de compresión será de 50 Kg (500 N); este es el producto de la suma de la carga del peso de 5 faros dentro de sus bultos con un peso aproximado de 5 Kg cada uno, más el peso de un pallet de madera estándar (1140 x 1180 x 160 mm) con un peso estimado de 25 Kg. La Tabla 5 muestra las propiedades mecánicas del material TPU utilizado para imprimir el inserto para la simulación numérica.

Tabla 5. Propiedades mecánicas del filamento de TPU (poliuretano termoplástico)

Propiedad	Valor	Unidades
Modulo elástico	26000000	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.45	N/D
Módulo Shear	318900000	N/m ²
Densidad	1250	Kg/m ³
límite de tensión	1500000000	N/m ²
Limite elástico	39000000	N/m ²

Elaboración propia

3.4. Propiedades de malla de elementos finitos

Se realizaron varias propuestas de mallado hasta completar un cálculo y arrojar un resultado que permitió observar las zonas de máxima tensión y los desplazamientos de la pieza, este mallado encontrado otorgo la viabilidad para validar el diseño para confirmar su desempeño para el trabajo previsto. Lo último se logró con una malla de densidad media con las siguientes características: malla de tipo sólido con 20022 nodos y 9349 elementos, basada en curvatura, con cuatro puntos jacobianos, con una calidad de elementos cuadráticos de alto orden de 2,12 mm y una relación de 1,5. Se representa la ubicación de las condiciones de contorno, incluidos los puntos de apoyo representados en verde y la carga del punto de compresión en púrpura, junto con la malla correspondiente (Figura7).

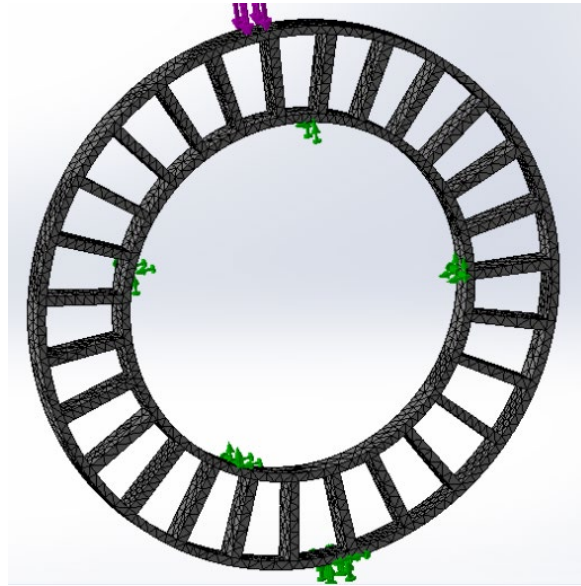


Figura 7. Condiciones frontera de la pieza para realizar simulación
Elaboración propia

Para garantizar los resultados de la simulación se realizó un ejercicio de convergencia de mallas. El objetivo es asegurar que los resultados de la simulación no se vean afectados por el tamaño de la malla. Si los resultados cambian significativamente al cambiar el tamaño de la malla, entonces la malla no está convergiendo y los resultados no son confiables. La Tabla 6 resume las características y los resultados de convergencia obtenidos para las tres mallas estudiadas.

Tabla 6. Resultados de convergencia de malla

Tamaño del elemento	Numero de nodos	Número de elementos	Carga máxima (MPa)	Desplazamiento (mm)
3.18	28273	13858	4.599×10^6	5.402
2.65	48719	25930	4.407×10^6	5.083
2.12	89879	50454	4.324×10^6	5.161

Elaboración propia

3.5. Características y parámetros de la impresora 3D

Como se mencionó anteriormente, elegir los parámetros de impresora 3D adecuados es fundamental para lograr resultados óptimos. Los parámetros de impresión para el filamento TPU son diferentes a los de otros materiales, como el PLA o el ABS. El TPU es un material flexible por lo que es importante ajustar los parámetros para garantizar que la impresión se adhiera correctamente a la plataforma de impresión y no se deforme. En este caso, la pieza se imprimió a una velocidad de 40 mm/segundo, utilizando una temperatura de extrusor de 220°C y una temperatura de cama de impresión de 30°C lo anterior de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del filamento TPU y a la experiencia adquirida de previas impresiones realizadas con este material tabla 7. Estos ajustes garantizan una adhesión adecuada entre las capas y evitan deformaciones, lo que da como resultado una impresión de alta calidad. Además, se utilizó un patrón de cuadrícula de relleno de material al 100 %. El relleno de material ayuda a fortalecer la pieza y darle más rigidez. Un relleno al 100 % proporciona la mayor resistencia posible, pero también puede aumentar el tiempo de impresión. La figura 8 ilustra el inserto de embalaje impreso en 3D. El inserto de embalaje impreso en 3D es un ejemplo de cómo los parámetros de impresión adecuados pueden producir una pieza de alta calidad.

Tabla 7. Parámetros Para Imprimir TPU

Parámetro	Valor	Unidades	Origen
Temperatura del extrusor	220	°C	Recomendación del fabricante de TPU
Temperatura de cama de impresión	35	°C	Recomendación del fabricante de TPU
Velocidad de Impresión	40 (31)	mm/seg	Recomendación del fabricante de TPU
Retracción del filamento	NO	mm	Experiencia de impresión con TPU
Velocidad de retracción	NO	mm/seg	Experiencia de impresión con TPU
Mínimo avance para activar retracción	NO	mm	Experiencia de impresión con TPU
Tasa de flujo del filamento	100	%	Experiencia de impresión con TPU
Relleno de la impresión	100	%	Experiencia de impresión con TPU
Enfriamiento del ventilador	5	%	Experiencia de impresión con TPU

Elaboración propia



Figura 8. Resultado final del inserto de empaque impreso en 3D
Elaboración propia

3.6. Prueba de compresión norma ASTM D642

Esta norma que es un método de prueba estándar utilizado para determinar la resistencia a la compresión de contenedores de envío, componentes y cargas de unidades. La resistencia a la compresión es una de las propiedades utilizadas para evaluar la capacidad de los contenedores de envío, componentes y cargas de unidades para sobrevivir con éxito a las fuerzas de compresión a las que están sujetos durante el almacenamiento y la distribución.

3.7. Procedimiento de prueba de compresión

Para realizar la prueba se utilizó una máquina de compresión con cabeza fija para lograr una orientación vertical del espécimen sujeta de la parte superior e inferior, que es como ésta contendría el faro y como se colocaría dentro de la caja de cartón para ser trasladado y almacenado (Figura 9). Una vez colocada la pieza en la maquina se procedió con la prueba, comenzando con una precarga de 50 Lb (22.69 Kg), llegando a este punto se incrementó la carga hasta 110 Lb (50 Kg), que es la carga estimada a la que están sometidas los faros en campo.



Figura 9. Inserto de prueba en máquina de compresión del laboratorio
Elaboración propia

4. RESULTADOS

El análisis por elementos finitos del inserto reveló un comportamiento de flexión en las áreas circundantes, que estarán sometidas directamente a esfuerzos de compresión. No se observó que la pieza alcanzara un punto de rotura. Como se muestra en la figura 10 se analizaron coordenadas en diferentes zonas de la sección del inserto que presenta mayor esfuerzo: 1) ubicadas $x=94.5$, $y=2.81$, $z=10$ mm, con una fuerza de 4.59×10^6 MPa; 2) ubicado $X=94.5$, $Y=2.81$, $Z=1.67$ mm con una fuerza de 4.20×10^6 MPa; 3) ubicada $X=94.5$, $Y=2.81$, $C=1.67$ mm con una fuerza de 3.62×10^6 MPa. Solo las dos zonas en los bordes de la sección están por encima del máximo admisible para la TPU; sin embargo, su impacto fue insuficiente para llevar todo el inserto al estado de cedencia. El valor de presión máxima encontrado es de 4,59 MPa. La figura 11 ilustra las cedencias observadas en todo el inserto, este se muestra integro en su mayoría solo se deforma en la zona donde se presenta el esfuerzo principal que es en el punto de contacto del inserto con la carga que sostiene. La estructura es capaz de soportar su máxima carga de diseño sin colapsar. En cuanto al desplazamiento, queda evidenciado que tampoco existe algún inconveniente y/o riesgo en la ejecución del trabajo previsto para lo cual fue hecho este inserto. La remoción calculada para este tramo es de aproximadamente 5,75 mm, frente a los 30 mm de medida por cada radio, lo que indica un margen suficiente para considerar que este desplazamiento no supone un peligro para el inserto o la pieza transportada; esta observación se representa en la figura 12.

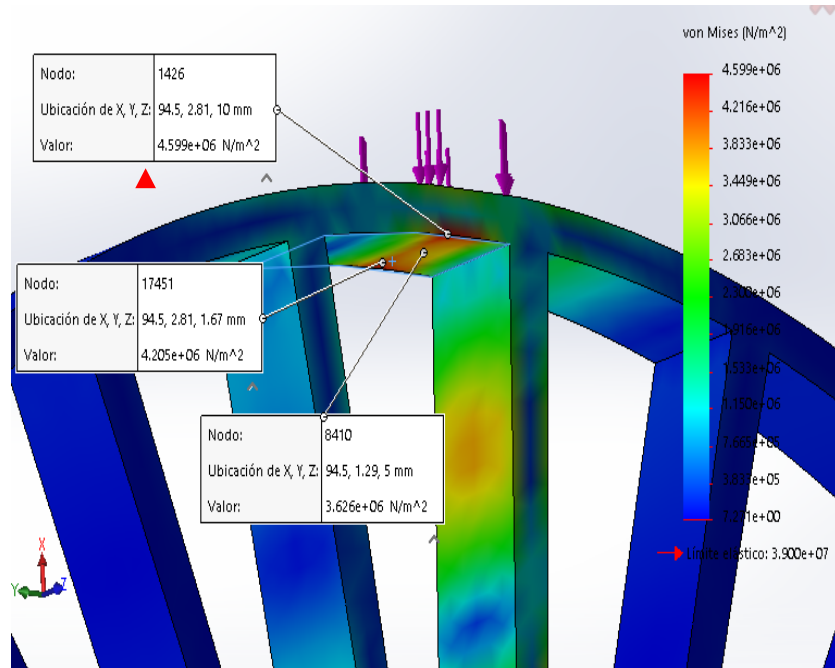


Figura 10. Representación de las tres coordenadas analizadas
Elaboración propia

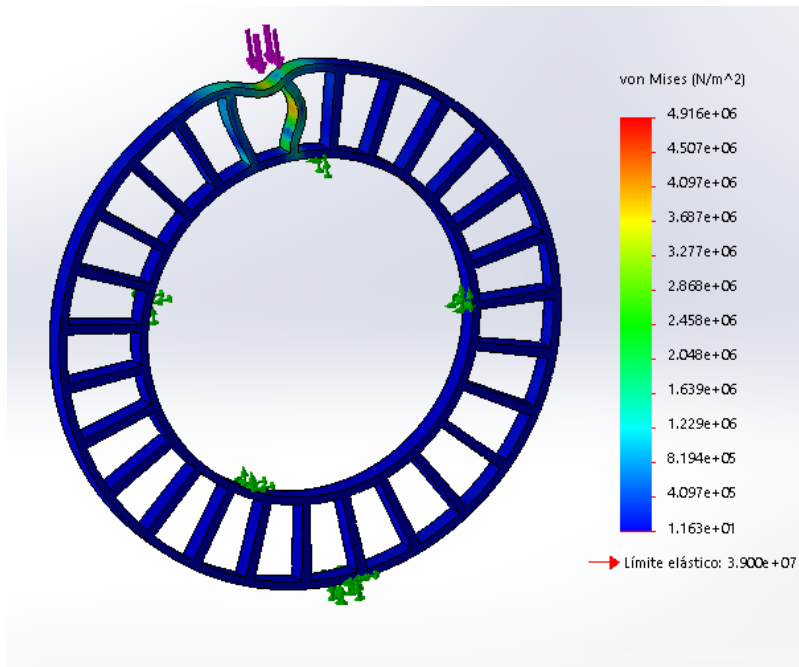


Figura 11. Las fuerzas simuladas muestran a la pieza flexionándose, sin riesgo de colapso
Elaboración propia

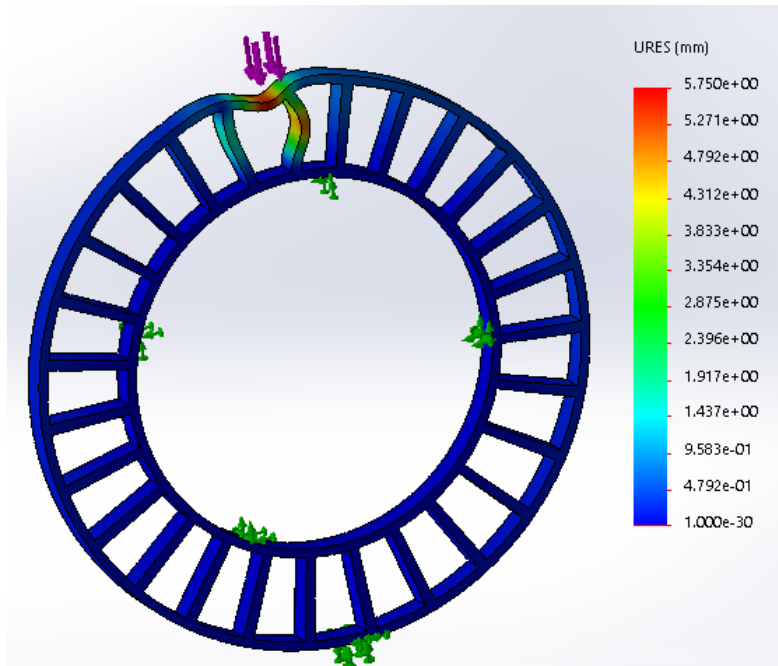


Figura 12. Deformación por desplazamiento no compromete el desempeño
Elaboración propia

La simulación muestra que el diseño, el material y las dimensiones del inserto pueden soportar la carga de compresión esperada. Cada faro usará dos insertos por pieza ya que se requiere uno para cada extremo (lado izquierdo y lado derecho); por lo tanto, la resistencia a la compresión actualmente demostrada por inserto sería proporcionalmente mayor que la que se muestra en la simulación numérica.

En cuanto al resultado del laboratorio en la figura 9 se muestra el gráfico de comportamiento arrojado por la prueba donde se llevó al punto de condición máximo de carga que es de 50 kg, el desplazamiento del inserto en este punto máximo fue de 0.58 pulgadas (14.73 mm) considerando que el que se cuenta con 30 mm de longitud de cada radio, este sigue siendo seguro para su uso previsto. Sostendrá la pieza que traslade sin colapsar bajo las cargas esperadas. La carga y el desplazamiento están correlacionados de forma exponencial, sin que el inserto colapse. Al terminar la prueba el inserto regresó a su condición original, mostrando un comportamiento elástico.

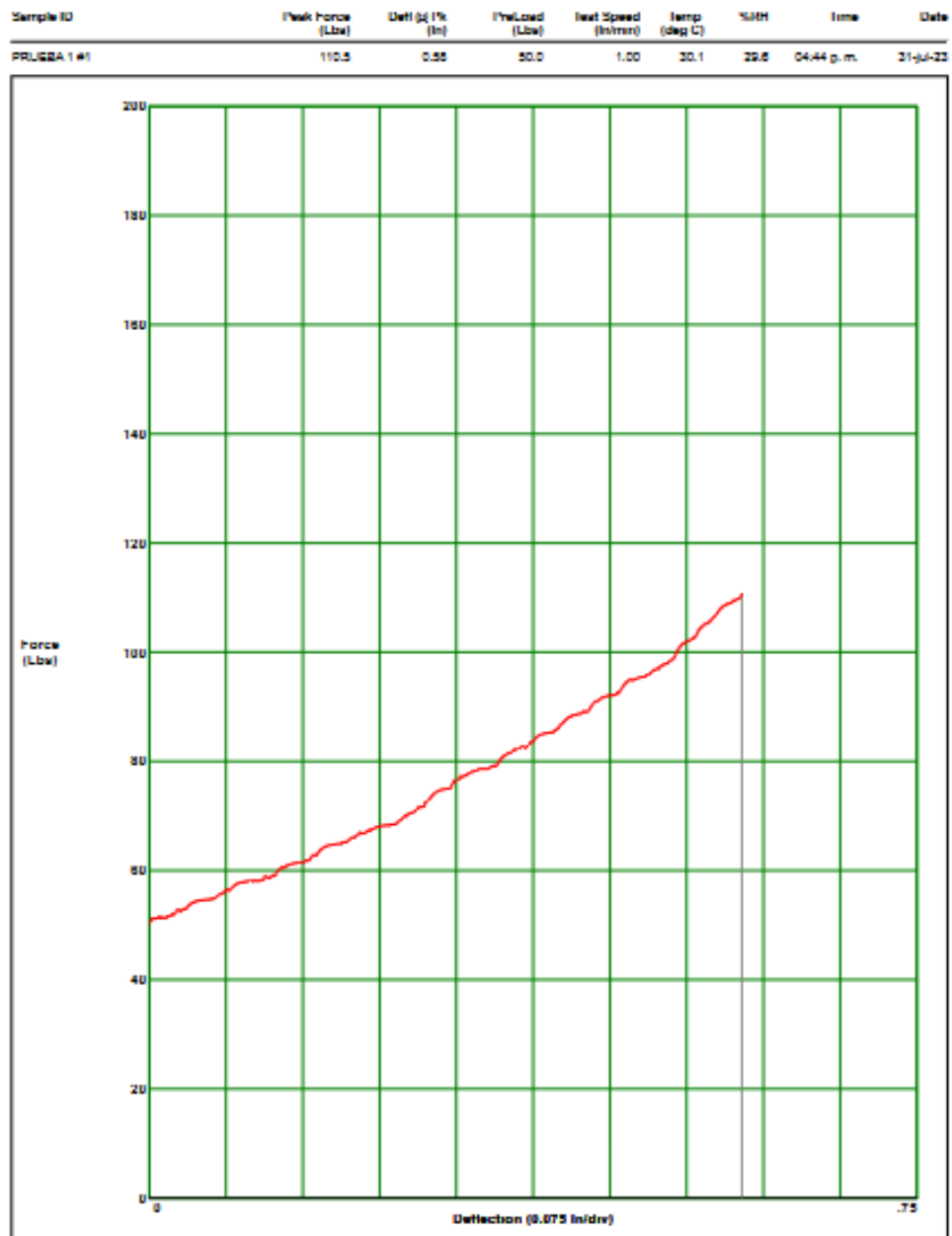


Figura 13. Gráfico de comportamiento de la prueba donde se nota desplazamiento en la pieza sin llegar a un punto de ruptura
Elaboración propia

CONCLUSIONES

El diseño del inserto de embalaje impreso en 3D se validó mediante la realización de un análisis de elementos finitos y una prueba de laboratorio para garantizar su funcionalidad bajo las cargas planteadas. Fue posible reproducir el diseño y el material del inserto propuesto a través de la impresión 3D. El modelado de filamentos fundidos se utilizó como método adicional para la fabricación de insertos de embalaje, además de los procesos tradicionales de desprendimiento de material.

Sin embargo, es esencial tener en cuenta que el análisis de elementos finitos por sí solo puede no ser suficiente para calcular fenómenos de carga dinámica, como impactos o vibraciones. Para tales fenómenos, se requiere un software que pueda calcular comportamientos no lineales. Por lo tanto, sería necesario un análisis completo asistido por computadora para validar tales actividades.

El uso de la fabricación aditiva para la creación de insertos permite una mayor flexibilidad en el diseño, una mejor adaptación a las piezas según la aplicación y la optimización de tiempos de fabricación, cantidades de material y costes. El próximo paso en esta investigación sería explorar nuevas posibilidades para usar diseños únicos, nuevos materiales y otras tecnologías de fabricación aditiva para adaptar estos insertos más ampliamente en las industrias automotriz y no automotriz.

Los principales hallazgos de esta investigación incluyen la reproducción exitosa del diseño y material del inserto propuesto a través de la impresión 3D y los beneficios potenciales de la fabricación aditiva en términos de flexibilidad, adaptación y optimización de los procesos de fabricación:

- 1) La simulación numérica permite darse cuenta de que el peso impacta principalmente en la zona receptora del inserto.
- 2) Hay zonas por encima del límite elástico del TPU ($3,9 \times 10^6$ MPa), pero es mínimo, lo que no representa un riesgo considerable para el inserto.

- 3) Las pruebas virtuales por análisis por elementos finitos pueden proporcionar información sobre la viabilidad del diseño y el material seleccionado para insertos de empaque.
- 4) La prueba en laboratorio estandarizada de compresión de envases para envíos mostro la validez del análisis realizado de manera virtual.
- 5) Es posible generar insertos mediante fabricación aditiva, concretamente mediante tecnología FDM.
- 6) El TPU ha demostrado ser un material ideal para realizar esta tarea debido a sus propiedades mecánicas como excepcional resistencia al desgarro, dureza y elongación.

RECOMENDACIONES

1. Considerar el producto que se empaquetará. ¿Qué propiedades son necesarias para el empaque? ¿Qué condiciones ambientales se encontrarán durante el transporte y almacenamiento?
2. Investigar las opciones disponibles. Hay una amplia gama de materiales de empaque disponibles, cada uno con sus propias propiedades y ventajas.
3. Comparar los materiales. Compare los materiales en función de sus propiedades, costo y sostenibilidad.
4. Es importante considerar las propiedades del producto que se empaquetará para garantizar que el empaque sea adecuado.
5. Las propiedades del producto que deben considerarse incluyen el peso, el tamaño, la forma, la fragilidad, la sensibilidad a la humedad y la temperatura.
6. Hay una amplia gama de materiales de empaque disponibles, cada uno con sus propias propiedades y ventajas.
7. Es importante investigar las opciones disponibles para encontrar el material que mejor se adapte al producto y las condiciones ambientales.
8. Las fuentes de información sobre materiales de empaque incluyen libros, artículos, sitios web y fabricantes.
9. Una vez que se hayan identificado las opciones disponibles, es importante compararlas en función de sus propiedades, costo y sostenibilidad.
10. Las propiedades del material que deben compararse incluyen la resistencia, la rigidez, la impermeabilidad, la barrera al gas, la barrera al calor, la resistencia a la corrosión y el peso.

Para la generación del análisis de elemento finito:

1. Considerar todos los factores relevantes: al definir el problema, es importante considerar todos los factores relevantes, como la geometría de la estructura, las cargas y las condiciones de contorno.

2. Establecer objetivos claros: es importante establecer objetivos claros para el análisis. Esto ayudará a garantizar que el análisis sea adecuado para el propósito previsto.

Para la prueba en laboratorio:

1. Seguir las instrucciones de la norma cuidadosamente: las normas ASTM proporcionan instrucciones detalladas sobre cómo realizar las pruebas. Es importante seguir estas instrucciones cuidadosamente para obtener resultados precisos.
2. Utilizar equipos y materiales adecuados: los equipos y materiales utilizados para las pruebas deben estar en buen estado y cumplir con los requisitos de la norma.
3. Registrar los resultados de las pruebas de forma precisa: los resultados de las pruebas deben registrarse de forma precisa para que puedan ser interpretados y utilizados de forma adecuada.
4. Preparar las muestras: si es necesario, prepare las muestras de acuerdo con los requisitos de la norma.
5. Realizar las pruebas con cuidado: siga las instrucciones de la norma cuidadosamente y realice las pruebas con cuidado para evitar errores.
6. Interpretar los resultados de forma adecuada: interprete los resultados de las pruebas de acuerdo con los requisitos de la norma.

APORTACIÓN DE LA TESIS

Mejorar la protección de los productos durante el transporte y almacenamiento. Los insertos impresos en 3D pueden diseñarse de forma personalizada para adaptarse a los productos específicos que se están empaquetando. Esto puede ayudar a garantizar que los productos estén adecuadamente protegidos contra daños físicos, contaminación y deterioro.

Reducir el costo de los empaques. La impresión 3D es un proceso de fabricación aditivo que puede producir piezas complejas con un costo relativamente bajo. Esto podría ayudar a las empresas a reducir los costos de empaques sin sacrificar la calidad.

Mejorar la eficiencia de la cadena de suministro. Los insertos impresos en 3D pueden diseñarse para facilitar el manejo y el almacenamiento de los productos. Esto podría ayudar a las empresas a mejorar la eficiencia de su cadena de suministro.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

Reducir el impacto ambiental de los empaques. La impresión 3D puede utilizar materiales reciclados o renovables. Esto podría ayudar a las empresas a reducir el impacto ambiental de sus empaques. Los insertos impresos en 3D podrían utilizarse para crear inserciones personalizadas que se adapten a los productos específicos que se están empaquetando. Esto podría ayudar a reducir el desperdicio de materiales al garantizar que se utilice la cantidad correcta de material para cada producto. Los insertos impresos en 3D podrían utilizarse para crear empaques que sean más fáciles de abrir y cerrar. Esto podría ayudar a mejorar la eficiencia de la cadena de suministro al reducir el tiempo que se tarda en manipular los productos automotrices. La investigación sobre insertos impresos en 3D para empaques automotrices es un campo relativamente nuevo, pero tiene el potencial de mejorar la seguridad, la sostenibilidad y la eficiencia de la industria automotriz.

REFERENCIAS

- Al Rashid, A., Khan, S., G. Al-Ghamdi, S., & Koç, M. (2020). Additive manufacturing: technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. *Automation in Construction*, 118, 103268. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103268>
- Alharbi, M., Kong, I., & Patel, V. (s.f.). Simulation of uniaxial stress–strain response of 3D-printed polylactic acid by nonlinear finite element analysis. *Applied Adhesion Science*, 8(1), 1-10. doi:<https://doi.org/10.1186/s40563-020-00128-1>
- Ambekar, R., Kushwaha, B., Sharma, P., Bosia, F., Fraldi, M., Pugno, N., & Tiwary, C. (2021). Topologically engineered 3D printed architectures with superior mechanical strength. *Materials Today*, 48, 72-94. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.014>
- American Society for Testing and Materials. (2014). ASTM D638: Standard test method for tensile properties of plastics. Obtenido de <https://www.astm.org/d0638-14.html>
- American Society of Testing and Materials. (2021). ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing. General principles. Fundamentals and vocabulary. Obtenido de <https://www.astm.org/f3177-21.html>
- Andleeb, Z., Khawaja, H., Andersen, K., & Moatamedi, M. (2022). Finite element analysis to determine the impact of infill density on mechanical properties of 3D printed materials. *The International Journal of Multiphysics*, 16(3), 317-335. doi:<https://doi.org/10.21152/1750-9548.16.3.317>
- Armillotta, A., Bellotti, M., & Cavallaro, M. (2018). Warpage of FDM parts. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 50(C), 140-152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.09.007>
- Ashby, M. F. (2017). *Materials selection in mechanical design* (5 ed.). Elsevier Science.
- Blanco, I. (2020). The use of composite materials in 3D printing. *Journal of Composites Science*, 4(2), 42. doi:<https://doi.org/10.3390/jcs4020042>
- Cattenone, A., Morganti, S., & Alaim, G. (2019). Finite element analysis of additive manufacturing based on fused deposition modeling: distortions prediction and comparison with experimental data. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(1), 17 p. doi:<https://doi.org/10.1115/1.4041626>
- Chadha, A., Ul Haq, M., Raina, A., Singh, R., Penumarti, N., & Bishnoi, M. (2019). Effect of fused deposition modelling process parameters on mechanical properties of 3D printed parts. *World Journal of Engineering*, 16(4), 550-559. doi:<https://doi.org/10.1108/WJE-09-2018-0329>

- Colorado, H., Velásquez, E., & Montero, S. (2020). Sustainability of additive manufacturing: The circular economy of materials and environmental perspectives. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8221-8234. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.062>
- Daim, T., & Yalçın, H. (2022). *Digital transformations: new tools and methods for mining technological intelligence*. Edward Elgar Publishing.
- Dassault Systèmes SolidWorks. (s.f.). *SolidWorks*. Obtenido de <https://www.solidworks.com/>
- El Moumen, A., Tarfaoui, M., & Lafdi, K. (2019). Modelling of the temperature and residual stress fields during 3D printing of polymer composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(5), 1661-1676. doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-019-03965-y>
- Elmrabet, N., & Siegkas, P. (2020). Dimensional considerations on the mechanical properties of 3D printed polymer parts. *Polymer Testing*, 90, 106656. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106656>
- Emblem, A., & Emblem, H. (Edits.). (2012). *Packaging technology: fundamentals, materials and processes*. Cambridge : Woodhead.
- Fantoni, C. (2003). *Envase y embalaje: la venta silenciosa*. Madrid: ESIC.
- Garzon Hernandez, S., Garcia Gonzalez, D., Jérusalem, A., & Arias, A. (2020). Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties. *Materials & Design*, 188, 108414. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108414>
- Giles, G., & Bain, D. (Edits.). (2001). *Technology of plastics packing for the consumer market*. Oxford: Wiley and Sons.
- Goh, G., Sing, S., & Yeong, W. (2021). A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges. *Artificial Intelligence Review*, 54, 63-94. doi:<https://doi.org/10.1007/s10462-020-09876-9>
- González Bautista, N., Mercado Lemus, V., Hernández Hernández, M., Garduño Olvera, I., & Arcos Gutiérrez, H. (2022). Methodology to implement CAE validation in repair & redesign parts process of plastic injection molds. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 5(1), 176-193. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8450244>
- Ibáñez Juárez, C. R. (2015). Elemento finito aplicado a la estática una alternativa para el análisis de ingeniería aplicada. *Materiales de Investigación*, 12 p. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.11777/917>
- International Organization for Standardization. (2019). ISO 527-1: Plastics determination of tensile properties Part 1: General principles. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/75824.html>

- International Trade Center. (2000). *Packaging design: a practitioner's manual*. Génova: International Trade Center.
- Jandyal, A., Chatuvedi, I., Wazir, I., Raina, A., & Haq, M. (2022). 3D printing: a review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 33-42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>
- Klimchuk, M. R. (2012). *Packaging design: successful product branding from concept to shelf*. John Wiley & Sons.
- Malhotra, V., & Malhotra, G. (2021). *The profitable corrugated box code*. New Delhi: Gullybaba Publishing House.
- Mazur, V. V. (2022). Theoretical study of the force heterogeneity of airless tires made of elastic polyurethanes. En A. Radionov, & V. Gasiyarov (Ed.), *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)* (págs. 13-20). Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-85233-7_2
- Moya Jimenez, R. C. (2011). *Diseño de empaques hechos de resina poliéster reforzado con fibra de abacá para la exportación de artesanías (Tesis para obtener el título de Diseñador Profesional)*. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Facultad de Arquitectura, Diseño y Artes . Obtenido de <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/13241>
- Nasiri, S., & Khosravani, M. (2021). Machine learning in predicting mechanical behavior of additively manufactured parts. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 1137-1153. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.004>
- Nguyen, P., Nguyen, T., Tao, Q., Vogel, F., & Nguyen-Xuan, H. (2022). A data-driven machine learning approach for the 3D printing process optimisation. *Virtual and Physical Prototyping*, 17 (4), 768-786. doi:<https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2068446>
- Phalen, N. (2021). *Traditional vs. additive manufacturing price comparison*. Obtenido de ALL3DPRO: <https://all3dp.com/1/traditional-vs-additive-manufacturing-price-comparison/>
- Scapin, M., & Peroni, L. (2021). Numerical simulations of components produced by fused deposition 3D printing. *Materials*, 14(16), 4625. doi:<https://doi.org/10.3390/ma14164625>
- Schmitt, M., Mehta, R., & Kim, I. (2020). Additive manufacturing infill optimization for automotive 3D-printed ABS components. *Rapid Prototyping Journal*, 26(1), 89-99. doi:<https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2019-0007>
- Selke, S., Culter, J., Auras, R., & Rabnawaz, M. (2012). *Plastics packaging: properties, processing, applications, & regulations* (3 ed.). Munich: Hanser.

- Tamir, T., Xiong, G., Fang, Q., Yang, Y., Shen, Z., Zhou, M., & Jiang, J. (2023). Machine-learning-based monitoring and optimization of processing parameters in 3D printing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(9), 1362-1378.
doi:<https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2145019>
- Theobald, N., & Winder, B. (Edits.). (2008). *Packaging closures and sealing systems*. Wiley-Blackwell.
- United Parcel Service of America. (5 de abril de 2023). www.ups.com. Obtenido de <https://www.ups.com/us/en/Home.page>
- Wang, P., Zou, B., Xiao, H., Ding, S., & Huang, C. (2019). Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK. *Journal of Materials Processing Technology*, 271, 62-74. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.016>
- Wickramasinghe, S., Do, T., & Tran, P. (2020). Fdm-based 3d printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. *Polymers*, 12(7), 1529.
doi:<https://doi.org/10.3390/polym12071529>
- Wittbrodt, B., & Pearce, J. (2015). The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Additive Manufacturing*, 8, 110-116.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.006>
- Xia, H., Lu, J., & Tryggvason, G. (2019). A numerical study of the effect of viscoelastic stresses in fused filament fabrication. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 346, 242-259.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.11.031>
- Yao, T., Deng, Z., Zhang, K., & Li, S. (2019). A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations. *Composites Part B: Engineering*, 163, 393-402.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.025>
- Yeshanew, E., Ahmed G., M., Sinha, D., Badruddin, I., Kamangar, S., Alarifi, I., & Hadidi, H. (2023). Experimental investigation and crashworthiness analysis of 3D printed carbon PA automobile bumper to improve energy absorption by using LS-DYNA. *Advances in Mechanical Engineering*, 15(6).
doi:<https://doi.org/10.1177/16878132231181058>
- Zhang, J., & Jung, Y.-G. (Edits.). (2018). *Additive manufacturing: materials, processes, quantifications and applications*. Elsevier Science : Butterworth-Heinemann. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812155-9.00010-4>
- Zhang, J., Wang, X., Yu, W., & Deng, Y. (2017). Numerical investigation of the influence of process conditions on the temperature variation in fused

deposition modeling. *Materials & Design*, 130, 59-68.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.05.040>