



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TESIS

**DISEÑO Y DESARROLLO DE MOLDES
PARA ADOCRETOS MEDIANTE TECNOLOGÍAS CAX.**

**CASO: EMPRESA DE PREFABRICADOS DE CONCRETO,
MINERAL DEL CHICO, HIDALGO.**

Para obtener el grado de
Maestra en Ciencias en Ingeniería Industrial

PRESENTA

Ing. Leticia Tapia Ignacio

Director

Dr. César Alfonso Arroyo Barranco

Codirector

Dr. Iván Alonso Lira Hernández

Ciudad del Conocimiento Mineral de la Reforma, Hidalgo., marzo de 2026.



12/Marzo/2026
Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado
Directora de Administración Escolar
Presente

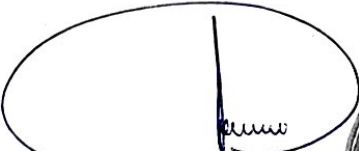
El Comité Tutorial de la tesis de posgrado titulada **“Diseño y desarrollo de moldes para adocretos mediante tecnologías CAX. Caso: Empresa de prefabricados de concreto, Mineral del Chico, Hidalgo”**, realizada por la sustentante **Leticia Tapia Ignacio** con número de cuenta **166801**, perteneciente al programa de **Maestría en Ciencias en Ingeniería Industrial**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:


AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN


Por lo que la sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.


Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”


El Comité Tutorial


Dr. César Alfonso Arroyo Barranco
Director


Dr. Sergio Blas Ramírez Reyna
Miembro del comité




Dr. César Alonso Lira Hernández
Codirector


Dr. Heriberto Niccolás Morales
Miembro del comité

“Amor, Orden y Progreso”

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40031, 40030
aai_icbi@uaeh.edu.mx



ÍNDICE

Dedicatorias	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	V
Introducción	VII
CAPÍTULO 1. PROPÓSITO Y ORGANIZACIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Propósito de la investigación	5
1.3 Justificación.....	6
1.4 Objetivo General	7
1.5 Objetivos Específicos	8
1.6 Alcances y Limitaciones	9
1.6.1 Alcances.....	9
1.6.2 Limitaciones.....	10
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Diseño.....	11
2.1.1 Diseño industrial.....	13
2.2 Adocretos.....	15
2.2.1 Material para la fabricación de adocretos.....	19
2.3 Sistemas de producción	21
2.3.1 Clasificación de los sistemas de producción	26
2.3.2 Sistemas de producción aplicados a la manufactura de adocretos .	28
2.4 Sistemas de manufactura	29
2.5 Procesos de manufactura.....	36
2.5.1 Manufactura aditiva.....	40
2.5.2 Manufactura sustractiva.....	57
2.5.3 Manufactura híbrida.....	64
2.6 Moldes para adocretos	68
2.6.1 Moldes tradicionales para adocretos	69
2.6.2 Moldes fabricados mediante manufactura aditiva (FDM)	70
2.6.3 Tendencias en la manufactura digital de moldes.....	71

2.6.4	Estudios relevantes sobre moldes manufacturados mediante manufactura aditiva.....	71
2.7	Tecnologías CAX.....	73
2.8	Transición e integración de CAX hacia el diseño asistido en la manufactura de moldes para adocretos.....	76
	CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA (PARÁMETROS)	79
3.1	Tipo de investigación.....	80
3.2	Nivel de investigación	81
3.3	Diseño de la investigación.....	82
3.4	Población	83
3.5	Ubicación del objeto de estudio	84
3.6	Variables.....	84
3.6.1	Dependientes	85
3.6.2	Variables independientes	85
3.6.3	Variables contextuales (de diagnóstico mediante encuestas).....	86
3.6.4	Variables de control.....	87
3.7	Descripción de las variables.....	87
3.7.1	Conceptual	87
3.7.2	Operacional	90
3.8	Instrumento de medición	94
3.9	Determinación del tamaño de la muestra	96
3.10	Recolección y experimentación de datos	98
	CAPÍTULO 4. RESULTADOS, EXPERIMENTACIÓN Y PROPUESTA	99
4.1	Resultados del diagnóstico empresarial	99
4.2	Diseño del prototipo en CAD	109
4.3	Prototipo fabricado mediante impresión 3D.....	111
4.4	Condiciones de operación del molde propuesto.....	113
4.4.1	Presión aplicada durante la compactación.....	114
4.4.2	Configuración del molde híbrido.....	115
4.5	Obtención de las propiedades mecánicas de los materiales.....	117
4.5.1	Obtención del límite elástico para PLA y PETG.....	120
4.5.2	Obtención del límite de compresión para PLA y PETG	123

4.5.3	Obtención de la densidad y coeficiente de Poisson para PLA y PETG	125
4.6	Pruebas y simulaciones numéricas en SolidWorks.....	126
4.6.1	Primera configuración geométrica: molde circular.....	129
4.6.2	Segunda configuración geométrica: molde cuadrangular.....	133
4.6.3	Tercera configuración geométrica: molde hexagonal.....	138
4.7	Implicaciones del análisis estructural y de manufactura en el diseño del molde.....	146
4.8	Impacto en tiempos, costos y personalización del proceso productivo..	148
4.9	Propuesta de diseño y desarrollo de moldes para adocretos mediante CAX	150
	CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	154
5.1	Conclusiones generales.....	154
5.2	Aportaciones del estudio.....	156
5.3	Recomendaciones para trabajos futuros.....	157
	BIBLIOGRAFÍA	159
	ANEXOS	172
7.1	ANEXOS A.....	172
7.2	ANEXO B.....	175
7.3	ANEXO C.....	179
7.4	Anexo D.....	183
	GLOSARIO	189
	TABLA DE SIMBOLOGÍAS	195

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Elemento de un sistema aplicado al diseño de moldes.....	26
Figura 2.2	Transformación física/química para cambiar forma, propiedades o aparición.....	30
Figura 2.3	Clasificación de los procesos de manufactura con tecnología.....	30
Figura 2.4	Alcance y estructura de la manufactura.	31
Figura 2.5	Esquema del proceso de diseño para la manufactura y ensamblaje....	34
Figura 2.6	Clasificación de los procesos de manufactura.	37
Figura 2.7	Clasificación de los procesos de manufactura con tecnología.....	38
Figura 2.8	Clasificación de la MA y las familias MA.	45
Figura 2.9	Materiales utilizados en aplicaciones de Manufactura aditiva.	46
Figura 2.10	Principio del proceso FDM.	51
Figura 2.11	Clasificación básica del prototipado rápido.	56
Figura 2.12	Clasificación de los procesos de manufactura sustractiva o de remoción.	59
Figura 2.13	Categorías y subcategorías de los procesos de manufactura sustractiva.	60
Figura 2.14	Torneado CNC.	62
Figura 2.15	Fresadora CNC.....	63
Figura 2.16	Flujo del proceso de impresión 3D integrado con tecnologías CAD/CAM.	77
Figura 3.1	Esquema metodológico de la investigación de intervención.....	80
Figura 4.1	Nivel de uso de diseño CAD en 3D.	100
Figura 4.2	Interés en implementar moldes híbridos (plástico-acero).	101
Figura 4.3	Moldes personalizados en las empresas analizada.....	103
Figura 4.4	Tipos de molde utilizados.	104
Figura 4.5	Duración del molde por meses.....	105
Figura 4.6	Vida útil aproximada del molde.....	106
Figura 4.7	Relación entre el uso de diseño CAD en 3D y el interés en moldes híbridos.	107
Figura 4.8	Diseño CAD del molde híbrido propuesto, compuesto por cuatro insertos poliméricos fabricados mediante manufactura aditiva y una base estructural de acero.	110
Figura 4.9	Vista explosionada del molde híbrido propuesto.	111
Figura 4.10	Prototipos del molde híbrido impresos en 3D (PLA y PETG) para dos configuraciones geométricas.	112
Figura 4.11	Conjunto del molde híbrido durante su operación, integrado por pistón manual y mesa vibradora.	113
Figura 4.12	Configuración dimensional del molde híbrido propuesto, indicando base de acero e inserto polimérico (dimensiones en cm).....	117
Figura 4.13	Esquema conceptual del comportamiento esfuerzo-deformación característica de un polímero termoplástico.	121

Figura 4.14 Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con cavidad circular fabricado en PETG bajo presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation.....	129
Figura 4.15 Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde circular en PETG bajo presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation.....	130
Figura 4.16 Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría circular fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation.	131
Figura 4.17 Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde circular en PLA bajo presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation.....	132
Figura 4.18 Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría cuadrada fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation.	134
Figura 4.19 Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde con geometría cuadrada fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation.	135
Figura 4.20 Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría cuadrada fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation.	136
Figura 4.21 Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde con geometría cuadrada fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation.....	137
Figura 4.22 Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría hexagonal fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation.	139
Figura 4.23 Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde con geometría hexagonal fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation.....	140
Figura 4.24 Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría hexagonal fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation.	141
Figura 4.25 Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde con geometría hexagonal fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation.....	142
Figura 4.26 Esquema del sistema CAX propuesto para el diseño y evaluación conceptual de moldes híbridos para adocretos.....	151

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de adoquines de concreto según la NMX-C-314-ONNCCE-2014.....	16
Tabla 2.2 Tipos de adocretos.	18
Tabla 2.3 Resistencia a compresión según la NMX-C-314-ONNCCE-2014.	19
Tabla 2.4 Comparativo de los principales sistemas de producción.	26
Tabla 2.5 cronología de los principales desarrollos en manufactura aditiva.	41
Tabla 2.6 Propiedades mecánicas comparativas de PLA y PETG.....	53
Tabla 3.1 Operacionalización de las variables.....	91
Tabla 4.1 Nivel de uso de diseño CAD en 3D.	99
Tabla 4.2 Interés en implementar moldes híbridos (plástico-acero).	101
Tabla 4.3 Impacto en moldes personalizados.	102
Tabla 4.4 Tipo de molde actualmente utilizado.....	103
Tabla 4.5 Frecuencia de reemplazo de los moldes (meses).	105
Tabla 4.6 Frecuencia de la vida útil aproximada del molde (años).....	106
Tabla 4.7 Requisitos de resistencia a compresión para adoquines de concreto según la NMX-C-314-ONNCCE-2014.	114
Tabla 4.8 Propiedades mecánicas del acero estructural A36.	119
Tabla 4.9 Propiedades mecánicas comparativas de PLA, PETG.	123
Tabla 4.10 Propiedades mecánicas comparativas de PLA y PETG.	125
Tabla 4.11 Densidad de PLA Y PETG.....	125
Tabla 4.12 Coeficiente de Poisson (ν).....	126
Tabla 4.13 Resumen de propiedades físicas y mecánicas de PLA y PETG.	126
Tabla 4.14 Comparación de resultados estructurales de los moldes poliméricos según geometría y material.	143

Dedicatorias

A mi hijo, Diego Alonso Chávez Tapia, quien con su cariño me demostró que, con una sonrisa y paciencia, podía animar mis días para continuar en esta etapa de mi vida.

A mi esposo, Ulises Chávez Villalobos, mi compañero de vida, por estar conmigo en cada uno de mis desvelos, por acompañarme siempre y porque en cada momento de duda me hizo volver a creer en mí.

A mi mamá, María Candelaria Ignacio, quien me enseñó que la vida da muchas vueltas y que siempre existe una esperanza en este camino.

A mi papá, Roberto Tapia, por ser mi fortaleza y demostrarme que rendirse no está en nuestra sangre.

A mis hermanos, Cecilio Tapia, Mayra Tapia, Roberto Tapia y Jaime Tapia, quienes me han enseñado que una hermandad como la nuestra fortalece cada uno de nuestros caminos. Gracias por su apoyo incondicional, por sus palabras de ánimo en los momentos difíciles y por recordarme siempre que no estoy sola.

A mi cuñada, Yari Hernández, por orientarme en aspectos metodológicos y por facilitarme material académico que contribuyó a una mejor comprensión de mi tema de investigación.

Gracias a todos por su apoyo incondicional.

Agradecimientos

Agradezco de manera especial a mi asesor de tesis, Dr. César Alfonso Arroyo Barranco, por su paciencia, orientación, tiempo y valiosas aportaciones técnicas durante el desarrollo de esta investigación.

También agradezco a los docentes que contribuyeron a mi formación académica durante la maestría, brindándome las herramientas necesarias para la realización de este estudio.

Finalmente, agradezco a las empresas participantes por la información proporcionada, la cual fue fundamental para el diagnóstico y análisis desarrollados en esta investigación.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar y desarrollar un sistema para la fabricación de moldes para adocretos mediante tecnologías CAX (Computer Aided Technologies), integrando herramientas CAD, CAE y CAM junto con procesos de manufactura aditiva y sustractiva. El estudio se desarrolló en una empresa de prefabricados de concreto ubicada en Mineral del Chico, Hidalgo, donde se identificaron limitaciones relacionadas con los tiempos de fabricación de moldes personalizados —que pueden alcanzar hasta tres meses—, así como costos elevados asociados al uso de moldes convencionales de acero.

La investigación se realizó bajo un enfoque de investigación aplicada, con alcance descriptivo–propositivo y metodología mixta. Como parte del proceso metodológico se llevó a cabo un diagnóstico empresarial mediante encuestas, el modelado CAD de un molde híbrido y la validación estructural del diseño mediante simulación numérica basada en el análisis de elementos finitos. Para ello, se analizaron insertos poliméricos fabricados en PLA y PETG, evaluando su comportamiento mecánico bajo condiciones de carga representativas del proceso de compactación del concreto.

Los resultados de las simulaciones permitieron analizar la distribución del esfuerzo equivalente de von Mises y el factor de seguridad, verificando que las configuraciones geométricas evaluadas se mantienen dentro del régimen elástico del material bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, lo que confirma la viabilidad técnica del diseño para etapas de desarrollo conceptual del molde.

La principal aportación del estudio radica en la integración del diagnóstico empresarial, el modelado CAD y la simulación estructural como base metodológica para el diseño y desarrollo conceptual de moldes híbridos personalizados mediante tecnologías CAX. Aunque no se realizó una validación económica directa en planta, los resultados obtenidos establecen fundamentos técnicos para futuras evaluaciones orientadas a la optimización del desarrollo de moldes en empresas del sector de prefabricados de concreto.

Palabras clave: tecnologías CAX, manufactura aditiva, manufactura sustractiva, moldes híbridos, simulación por elementos finitos.

Abstract

This research aimed to design and develop a system for manufacturing molds for concrete pavers using CAX technologies (Computer Aided Technologies), integrating CAD, CAE, and CAM tools together with additive and subtractive manufacturing processes. The study was conducted in a concrete prefabrication company located in Mineral del Chico, Hidalgo, where limitations were identified related to the manufacturing time of customized molds—which can reach up to three months—as well as high costs associated with conventional steel molds.

The research followed an applied research approach, with a descriptive–propositional scope and a mixed methodology. As part of the methodological process, a business diagnosis was conducted through surveys, followed by the CAD modeling of a hybrid mold and the structural validation of the design through numerical simulation using the finite element method. Polymeric inserts manufactured in PLA and PETG were analyzed in order to evaluate their mechanical behavior under loading conditions representative of the concrete compaction process.

The simulation results allowed the analysis of the distribution of von Mises equivalent stress and the safety factor, verifying that the evaluated geometric configurations remain within the elastic regime of the material under a uniform pressure of 0.37 MPa, confirming the technical feasibility of the design for conceptual mold development stages.

The main contribution of this study lies in the integration of business diagnosis, CAD modeling, and structural simulation as a methodological basis for the design and conceptual development of customized hybrid molds using CAX technologies. Although a direct economic validation in the plant was not carried out, the results obtained establish technical foundations for future evaluations aimed at optimizing mold development in companies within the concrete prefabrication sector.

Keywords: CAX technologies, additive manufacturing, subtractive manufacturing, hybrid molds, finite element simulation.

Introducción

La industria de prefabricados de concreto se enfrenta actualmente a un entorno competitivo que exige productos personalizados, reducción en los tiempos de entrega y un mejor control de los costos de producción. En este contexto, los moldes utilizados para la fabricación de adocretos juegan un papel fundamental, ya que definen la geometría, la calidad dimensional y la repetibilidad del producto final, además de representar una inversión importante para las empresas del sector.

De manera tradicional, los moldes para adocretos se fabrican en acero mediante procesos manuales o de manufactura sustractiva, lo que suele implicar tiempos prolongados de obtención, costos elevados y una limitada flexibilidad para realizar modificaciones en el diseño cuando se requieren geometrías personalizadas. Esta situación dificulta la adaptación rápida a las necesidades del mercado y limita la capacidad de innovación, especialmente en pequeñas y medianas empresas de prefabricados de concreto.

Ante estas condiciones, el uso de tecnologías CAX (Computer Aided Technologies), que incluyen herramientas como el Diseño Asistido por Computadora (CAD), la Ingeniería Asistida por Computadora (CAE) y la Manufactura Asistida por Computadora (CAM), junto con la manufactura aditiva, surge como una alternativa para mejorar los procesos de diseño y desarrollo de moldes.

La integración de estas tecnologías permite analizar nuevas formas de diseñar moldes personalizados, reducir de manera teórica los tiempos de obtención y sentar las bases para una posible disminución de costos, particularmente en las etapas de diseño y validación.

En este sentido, la presente investigación se enfoca en proponer un sistema de diseño y desarrollo de moldes para adocretos mediante tecnologías CAX, integrando procesos de manufactura aditiva y sustractiva desde un enfoque conceptual. El estudio se desarrolla en una empresa de prefabricados de concreto ubicada en Mineral del Chico, Hidalgo, a partir de un diagnóstico empresarial que permitió identificar áreas de oportunidad relacionadas con el diseño y la fabricación de moldes.

Como parte del trabajo, se realizó el diseño conceptual de un molde híbrido y la evaluación estructural de insertos poliméricos fabricados en PLA y PETG mediante simulaciones numéricas por el método de elementos finitos, bajo condiciones de carga controladas. Este enfoque permitió analizar el comportamiento mecánico de las geometrías propuestas y verificar su viabilidad técnica sin llevar a cabo pruebas experimentales en planta.

Con ello, se busca aportar un sustento técnico que respalde el uso de tecnologías CAX y manufactura aditiva como una alternativa viable para mejorar la flexibilidad en el diseño de moldes, reducir de manera teórica los tiempos y costos de obtención y fortalecer el potencial competitivo de las empresas del sector de prefabricados de concreto.

CAPÍTULO 1. PROPÓSITO Y ORGANIZACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En el entorno industrial actual, la precisión, la innovación y la adaptabilidad se han convertido en factores determinantes para mantener la competitividad. En este contexto, los avances en diseño y manufactura de moldes para adocretos representan una oportunidad clave para transformar los procesos productivos. La posibilidad de crear moldes personalizados y adaptables mediante tecnologías avanzadas permite a las empresas responder con agilidad a las demandas del mercado, diversificar sus productos y ofrecer soluciones de mayor valor en el sector de los prefabricados de concreto.

La creciente competencia obliga a las organizaciones a acelerar el lanzamiento de productos sin comprometer la calidad. Para ello, resulta esencial modelar con precisión los diseños, evaluar distintas opciones de materiales y optimizar su uso, reduciendo desperdicios y costos de producción. Una manufactura eficiente y bien estructurada impacta directamente en la competitividad: no solo garantiza bienes de alta calidad, sino que optimiza recursos, minimiza tiempos y mejora la rentabilidad. Además, fortalece la satisfacción del cliente y la calidad de sus procesos al cumplir con los estándares de producción en plazos más cortos.

Desde los años ochenta, las empresas manufactureras han incorporado tecnologías asistidas por computadora (CAX) para integrar el diseño digital con la fabricación automatizada, logrando

mayor precisión, rapidez y consistencia en la producción de prototipos y piezas industriales. Vido et al. (2024) señala que “podría conducir a métodos de prototipado más avanzados, sostenibles y orientados al cliente.” (p. 1), subrayando la rápida adopción de estos flujos digitales en la industria. Según Li et al. (2024) la fabricación industrial ya no se restringe a los procesos convencionales, destacando el impacto de estas herramientas en la eficiencia de la industria moderna.

De manera complementaria, Titu y Pop (2024) señalan que los sistemas CAD permiten una visualización más detallada y la iteración continua de los diseños. Su integración con CAE (Ingeniería Asistida por Computadora) y CAM (Manufactura Asistida por Computadora) permite optimizar tiempos y aumentar la productividad, mostrando ventajas claras frente a los métodos tradicionales. Estudios recientes evidencian que, pese a la curva de aprendizaje, los beneficios superan los costos iniciales.

Estas tecnologías han transformado la manera en que se conciben y fabrican los prototipos, facilitando la transformación rápida de ideas en modelos funcionales. No obstante, su eficacia depende de una adecuada integración con los procesos de manufactura, ya sean sustractivos o aditivos, pues una implementación deficiente puede convertirse en un obstáculo más que en una ventaja.

En lo que respecta a la manufactura aditiva, Tran (2025) indica que este proceso facilita la creación de piezas con formas complejas y diseños personalizados, aprovechando los materiales de manera más eficiente mediante la deposición gradual de capas. En contraste, la manufactura sustractiva sigue siendo preferida para piezas que

requieren tolerancias estrictas y acabados de alta calidad, debido a su control preciso sobre la eliminación de material de un bloque para alcanzar la forma deseada (Segovia-Guerrero et al., 2025).

Por su parte, Rabalo et al. (2023) destacan que la integración de CAD/CAM con procesos aditivos y sustractivos genera importantes ventajas al unificar sus funciones bajo un mismo concepto, conocido como manufactura híbrida, lo que permite optimizar el flujo de trabajo, reducir los tiempos de fabricación y minimizar las limitaciones técnicas.

A pesar de estos avances, la aplicación práctica de dichas tecnologías en pequeñas y medianas empresas del sector de prefabricados de concreto continúa siendo limitada. En el caso de una empresa ubicada en Mineral del Chico, Hidalgo, se identificaron dificultades en los procesos de diseño y obtención de moldes personalizados. Los tiempos de entrega pueden alcanzar hasta tres meses cuando la fabricación se realiza de manera externa, lo que impacta la planeación productiva y la capacidad de respuesta ante pedidos específicos.

De acuerdo con la información obtenida mediante encuestas aplicadas a empresas del sector, la solicitud de moldes personalizados se presenta principalmente en proyectos específicos que demandan geometrías diferenciadas, implicando costos elevados asociados a su fabricación o adquisición externa dentro de la estructura operativa de las empresas. Esta situación limita la diversificación del catálogo de productos y puede generar retrasos en la entrega a clientes.

Adicionalmente, la ausencia de herramientas de simulación estructural en las etapas de diseño genera incertidumbre respecto al comportamiento mecánico del molde antes de su fabricación, dificultando la toma de decisiones técnicas fundamentadas.

El prototipado se concibe como una actividad de generación de conocimiento que facilita la comprensión tanto del espacio problema como del espacio solución (Goudswaard et al., 2023). Asimismo, se conceptualiza como un proceso de diseño orientado a metas, sujeto a restricciones y que involucra exploración, toma de decisiones y aprendizaje (Wenngren & Rizk, 2024). Por su parte, Ferraris (2023) señala que los prototipos pueden asumir múltiples definiciones y cumplir diversas funciones dentro de la investigación en diseño. Sin embargo, su aplicación sin herramientas de validación estructural puede incrementar el riesgo de iteraciones costosas.

En este contexto, surge la necesidad de analizar la viabilidad técnica de integrar CAX, la manufactura aditiva y manufactura sustractiva en el diseño de moldes para adocretos, con el propósito de evaluar su potencial para mejorar la flexibilidad del diseño y fortalecer la competitividad de empresas del sector.

A partir de este planteamiento se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿En qué medida la integración de CAX y los procesos de manufactura aditiva y sustractiva puede contribuir a mejorar la flexibilidad en el diseño de moldes y el potencial competitivo de empresas productoras de prefabricados de concreto?

1.2 Propósito de la investigación

La presente investigación tiene como propósito analizar la viabilidad de integrar procesos de manufactura aditiva y manufactura sustractiva mediante el uso de CAX (Computer Aided Technologies) en el diseño conceptual de moldes para productos vibrocomprimidos. El estudio parte del reconocimiento de que cada molde personalizado, elaborado de acuerdo con los requerimientos específicos del cliente, representa una inversión significativa para las empresas del sector de prefabricados de concreto.

La finalidad de esta integración tecnológica es examinar el aporte de las herramientas CAX en el proceso de diseño y desarrollo de moldes, considerando su impacto potencial en la flexibilidad del diseño, la personalización de geometrías y la posible reducción teórica de tiempos y costos asociados al desarrollo de moldes, aspectos que podrían ser evaluados con mayor profundidad en estudios posteriores.

El estudio se contextualiza a partir de información obtenida de empresas del sector de prefabricados de concreto, incluyendo un caso de referencia ubicado en Mineral del Chico, Hidalgo. Asimismo, la investigación busca analizar el potencial de adopción de tecnologías CAX en microempresas del sector, mostrando cómo su aplicación en el diseño y evaluación de moldes puede contribuir al análisis de alternativas para el desarrollo de moldes personalizados, sin contemplar su implementación industrial directa dentro del alcance del presente estudio.

1.3 Justificación

Las empresas de prefabricados de concreto enfrentan actualmente desafíos relacionados con la personalización de productos conforme a los requerimientos específicos de los clientes, así como con la necesidad de mejorar la flexibilidad en los procesos de diseño de moldes. La limitada capacidad para ajustar de manera ágil las geometrías de los moldes puede derivar en mayores tiempos de desarrollo, incremento de costos y restricciones en la adaptación a proyectos con características particulares.

La presente investigación se justifica por su viabilidad técnica y metodológica, ya que se cuenta con los recursos humanos, de información y de software necesarios para su desarrollo. Asimismo, el estudio considera situaciones reales del sector de prefabricados de concreto, en las cuales la manufactura aditiva y sustractiva pueden ser abordadas desde un enfoque conceptual y de diseño, incluyendo la posibilidad de subcontratación de procesos de fabricación, sin que ello implique su ejecución directa dentro del alcance del trabajo.

Desde el punto de vista técnico, la integración de tecnologías CAX con procesos de manufactura aditiva y sustractiva representa una alternativa viable para analizar el potencial de mejora en la flexibilidad del diseño de moldes personalizados, así como evaluar su posible contribución a la optimización de tiempos y costos asociados al desarrollo de moldes, aspecto que podría ser evaluado en investigaciones posteriores. Esta aproximación permite evaluar soluciones innovadoras sin necesidad de una implementación industrial inmediata.

En el ámbito metodológico, el estudio aporta un marco de referencia que combina diagnóstico empresarial, modelado CAD y simulación por el método de elementos finitos, lo cual sienta las bases para futuras investigaciones orientadas a la validación experimental, la fabricación física de moldes o la implementación de tecnologías CAX en empresas del sector de prefabricados de concreto.

Finalmente, desde una perspectiva competitiva, la investigación se justifica al analizar cómo la adopción de tecnologías asistidas por computadora puede fortalecer el potencial competitivo de las empresas, al ampliar las posibilidades de personalización de moldes, fomentar la innovación en el diseño de prototipos y mejorar la capacidad de respuesta ante la demanda de productos con geometrías específicas, contribuyendo así a una mejor posición estratégica sin comprometer la viabilidad operativa de las microempresas.

1.4 Objetivo General

Diseñar y desarrollar un sistema de diseño y manufactura de moldes para adocretos mediante CAX (Computer Aided Technologies), integrando procesos de manufactura aditiva y sustractiva, con el propósito de evaluar su viabilidad técnica y su potencial contribución a la flexibilidad del diseño y al fortalecimiento competitivo de empresas de prefabricados de concreto, tomando como referencia un caso ubicado en Mineral del Chico, Hidalgo.

1.5 Objetivos Específicos

- Diagnosticar el proceso actual de adquisición y uso de moldes en empresas productoras de prefabricados de concreto, identificando las principales limitaciones internas y externas que afectan la eficiencia, precisión y tiempos de entrega.
- Analizar el potencial de CAX y de manufactura aditiva en la optimización del proceso de diseño y desarrollo de moldes para adocretos, considerando su posible contribución a la reducción de tiempos y costos asociados.
- Diseñar un modelo conceptual de molde híbrido que integre CAX y procesos de manufactura aditiva y sustractiva, orientado a la personalización geométrica de moldes y a la ampliación del catálogo de productos.
- Definir criterios de evaluación del desempeño estructural de los moldes propuestos, mediante indicadores obtenidos a partir de simulaciones numéricas, tales como el esfuerzo equivalente de von Mises y el factor de seguridad.
- Evaluar, mediante simulaciones por el método de elementos finitos, el comportamiento mecánico de insertos poliméricos fabricados en PLA y PETG bajo condiciones de carga controladas.
- Analizar, con base en una metodología mixta que incluye encuestas y análisis cualitativo, la percepción y disposición de las empresas del sector de prefabricados de concreto respecto a la adopción de CAX y manufactura aditiva para el diseño de moldes personalizados.

1.6 Alcances y Limitaciones

1.6.1 Alcances

- La presente investigación tiene como alcance el análisis, diseño y evaluación conceptual de un sistema de diseño y desarrollo de moldes para adocretos mediante el uso de CAX (Computer Aided Technologies), integrando procesos de manufactura aditiva y sustractiva, sin contemplar su implementación industrial directa.
- El estudio se apoya en información obtenida de empresas productoras de prefabricados de concreto, incluyendo como caso de referencia una empresa ubicada en Mineral del Chico, Hidalgo, utilizada con fines de diagnóstico y contextualización del problema.
- Se desarrolla el diseño CAD de un molde híbrido y se evalúa el comportamiento mecánico de insertos poliméricos fabricados en PLA y PETG mediante simulaciones por el método de elementos finitos, bajo condiciones de carga controladas.
- Los resultados obtenidos permiten analizar el potencial de personalización de moldes y su posible contribución a la optimización de tiempos y costos asociados al diseño y fabricación de moldes, como parte de una propuesta tecnológica orientada a mejorar la competitividad y flexibilidad productiva.

1.6.2 Limitaciones

- La investigación no contempla la fabricación física ni la validación experimental del molde híbrido propuesto, por lo que los resultados obtenidos se limitan a análisis numéricos mediante simulación y a evaluaciones de carácter conceptual.
- La base estructural de acero del molde híbrido, concebida para ser fabricada mediante manufactura sustractiva, no fue analizada ni simulada estructuralmente, al encontrarse fuera del alcance del presente estudio.
- La evaluación de costos, tiempos de fabricación e impacto productivo se realiza desde un enfoque teórico y comparativo, sin mediciones directas en planta ni implementación real del sistema propuesto.
- La adopción del sistema de diseño y manufactura planteado dependerá de la disponibilidad futura de infraestructura tecnológica, capacitación del personal y adecuación de los procesos productivos existentes, aspectos que deberán abordarse en trabajos posteriores.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Diseño

Para comprender el tema e investigar los beneficios de las tecnologías asistidas por computadora y su estudio con la manufactura de prototipos, es necesario conocer el concepto de diseño industrial con precisión, así como su contexto. La manufactura de prototipos con CAX requiere coordinación entre diseñadores, operadores y técnicos; implica que un equipo integrado tendrá disposición para capacitarse y adoptar nuevas tecnologías asegurando que los prototipos sean funcionales.

En este sentido, una de las áreas principales que se ha estudiado es el campo de la construcción y los diferentes diseños de productos que demanda la población, ello implica la creación de moldes que actúen como plantillas para crear la textura deseada. Según Paolini et al. (2019), en los años recientes, la investigación sobre técnicas de impresión para elementos de construcción ha crecido considerablemente, y se han llevado a cabo los primeros proyectos de edificación utilizando procesos de manufactura aditiva (MA). La tecnología y el tiempo han impulsado su transformación a nuevas ideas, tomando en cuenta que es imposible fabricar un producto sin antes clarificar una idea para después definir su diseño.

El término "diseño" tiene su origen en el italiano disegno y disegnare, que hacen referencia a la acción de representar algo mediante trazos o signos gráficos. Estas palabras, a su vez, derivan del latín signum, que

significa marcar, indicar o designar. Con el tiempo, el concepto evolucionó y dio lugar al verbo "designar" en español, utilizado para nombrar o señalar algo. En italiano, el término adquirió el significado de representar visualmente, mientras que en español se extendió a la representación a través del lenguaje (Moura, 2019).

Los principios de diseño se han aplicado desde la prehistoria con la creación de herramientas y refugios que poseen funcionalidad y estética. A partir del siglo XVIII, la palabra "diseño" comenzó a emplearse en castellano, y su equivalente en inglés, design, se vinculó con el concepto de una idea. En España, su uso experimentó un periodo de desuso, pero en la década de 1950 resurgió con un enfoque renovado y metodológico.

El diseño es una actividad creativa cuyo objetivo es establecer las cualidades multifacéticas de los objetos, procesos, servicios y sus sistemas en ciclos de vida completos. Por lo tanto, el diseño es el factor central de la humanización innovadora de las tecnologías y el factor crucial del intercambio cultural y económico (ICSID, citado en Koskinen et al., 2011, p. 18).

Según Simón (1996), el diseño es el proceso mediante el cual se transforman condiciones existentes en condiciones deseadas (p. 111). Siendo así que desafía las formas de pensar y cuestionar por medio del pensamiento de diseño (*design thinking*).

El término “*design thinking*” fue difundido por Peter Rowe en 1987, en el título de uno de sus libros, pero quien se encargó de popularizarlo fue Tim Brown en uno de sus artículos en 2008. Este autor menciona que *design thinking* es “una disciplina que utiliza la sensibilidad y los métodos del diseñador para hacer coincidir las necesidades de las personas con lo que es tecnológicamente factible y lo que una estrategia de negocios viable puede convertir en valor para el cliente y oportunidad de mercado”(Brown, 2008, p. 2). Dicho termino busca encontrar soluciones eficaces y concretas.

Según Del Giorgio Solfa et al. (2018), el design thinking se presenta como una herramienta que facilita el desarrollo de soluciones y la toma de decisiones, combinando el pensamiento lógico con el intuitivo.

2.1.1 Diseño industrial

Durante la Revolución industrial, el diseño logró un papel esencial en la producción en masa, optimizando procesos y mejorando la eficiencia de los productos.

En este sentido, bajo el camino de la industria, la Organización Mundial del diseño define “el diseño industrial como un proceso estratégico de resolución de problemas que impulsa la innovación, crea éxito empresarial y conduce a una mejor calidad de vida a través de productos, sistemas, servicios y experiencias innovadores”(WOD, 2025). Según la Sociedad de diseñadores industriales de América (2019), define el diseño industrial como “La práctica profesional de diseñar

productos, dispositivos, objetos y servicios utilizados por millones de personas en todo el mundo todos los días”.

El diseño industrial no solo trabaja con la creatividad y funcionalidad de los productos, sino también con los procesos de diseño que implican el paso de un proceso a otro y el uso del diseño del producto con representaciones fluidas de diferentes tipos y tamaños, garantizando que sean viables para su fabricación.

Según Homburg (2015), el diseño de producto se compone de un conjunto de características que los consumidores perciben como una construcción compleja y multidimensional, que integra aspectos estéticos, funcionales y simbólicos.

En el contexto de esta investigación, el proceso de diseño no se orienta al producto final (adocreto), sino al diseño del molde utilizado para su elaboración, el cual constituye un componente dentro del sistema de producción de prefabricados de concreto. A través de un diseño adecuado del molde es posible analizar su desarrollo mediante el uso de CAX, lo que permite evaluar alternativas para optimizar el proceso de elaboración de moldes y contribuir potencialmente a la mejora del sistema productivo en la empresa de prefabricados.

2.2 Adocretos

El término adocreto hace referencia a un tipo de adoquín prefabricado elaborado con concreto, utilizado principalmente en sistemas de pavimentación. La norma mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014 define el término adoquín como "unidad prefabricada de concreto o de otros materiales, con forma prismática, cuyo diseño geométrico del área expuesta permite la colocación autotrabada de piezas en forma continua para formar pavimentos" (ONNCCE, 2014, p. 4).

La palabra adocreto proviene de la combinación de las palabras "adoquín" y "concreto", y es ampliamente empleado en contextos constructivos de México y Centroamérica. En el presente trabajo, se utilizará este término para referirse específicamente a los bloques modulares de concreto diseñados para formar superficies resistentes y funcionales, que pueden ser optimizados mediante el uso de tecnologías CAD/CAM en su proceso de diseño y fabricación.

Precisando, dentro de las vías de comunicación terrestre, los pavimentos de adocretos en las carreteras son esenciales, utilizados comúnmente en sistemas de adoquinado como calles, andadores, banquetas, parques y zonas peatonales. Su diseño modular permite una colocación sencilla y un mantenimiento eficiente, ya que pueden reemplazarse individualmente sin necesidad de levantar grandes superficies.

De acuerdo con la norma mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2014), los adoquines de concreto se clasifican en cuatro tipos, como se muestra en la Tabla 2.1, según el uso previsto.

Tabla 2.1 Clasificación de adoquines de concreto según la NMX-C-314-ONNCCE-2014

Tipo	Espesor mínimo nominal en mm	Uso
A	60	Tránsito peatonal
B	60	Tránsito ligero
C	80	Tránsito medio
D	80	Tránsito pesado

Fuente: ONNCCE (2014), NMX-C-314-ONNCCE-2014

La norma NMX-C-314-ONNCCE-2014 clasifica el tránsito en cuatro categorías según la cantidad acumulada de vehículos con carga equivalente a un eje sencillo de 8.2 toneladas durante la vida útil del pavimento. El tránsito peatonal es exclusivo para personas; el tránsito ligero considera menos de 5×10^5 ejes equivalentes; el tránsito medio se ubica entre 5×10^5 y 5×10^6 ; y el tránsito pesado supera los 5×10^6 ejes equivalentes (ONNCCE, 2014, p. 13).

Según datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del INEGI, al año 2024, en el estado de Hidalgo se identifican 10 empresas correspondientes a la fabricación de productos a base de minerales no metálicos para la construcción,

dentro de las cuales se incluyen aquellas que producen adocretos y otros prefabricados de concreto. Esta información es relevante para dimensionar el contexto industrial donde se desarrolla esta propuesta de diseño y manufactura de moldes para adocretos (INEGI, 2024).

En la región de Hidalgo, los diseños de adocretos más comunes reconocen criterios de funcionalidad, estética y facilidad de fabricación. Entre los modelos más utilizados se encuentran el tipo rectangular, hexagonal, tipo ondulado. Estos diseños son preferidos por su capacidad de entrelazado, resistencia mecánica, adaptabilidad al terreno y eficiencia en el proceso de colocación. La demanda de estos tipos de moldes también está influenciada por su compatibilidad con los procesos de manufactura asistida por computadora (CAM), lo que permite una producción más precisa y repetible en contextos industriales y artesanales.

En la siguiente Tabla 2.2, se enlistan los tipos de adocretos más utilizados en la entidad:

Tabla 2.2 Tipos de adocretos.

NOMBRE	MEDIDAS	DISEÑO
Adocreto Hexagonal Grande	24.00 cm *27.70cm *10.00 cm	
Adocreto Hexagonal Chico	15.02 cm *27.50 cm*8.00 cm	
Adocreto Redondo	r=5.00cm, h= 10.00cm u 8.00cm	
Adocreto Globo	28.14cm*28.14cm*8.00cm	
Adocreto Moño	27.50cm*15.02cm*8.00cm	
Adocreto Dado Cruz	22.00 cmx25.00 cmx5.00 cm	
Adocreto Cuadrado	20.00 cm* 20.00 cm	
Adocreto Rectangular	40.00cm*20.00cm*8.00cm	

Fuente: Elaboración propia con base en imágenes consultadas en sitios de fabricantes de adocretos.

2.2.1 Material para la fabricación de adocretos

Según Sastrawidana et al. (2022), en la actualidad, los adoquines se emplean de forma generalizada en parques y áreas residenciales gracias a su bajo costo, su resistencia a las condiciones climáticas y la facilidad que ofrecen para su instalación.

La norma mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014 establece las especificaciones y métodos de ensayo que deben cumplir los adoquines utilizados en pavimentos para tránsito peatonal y vehicular. Esta normativa clasifica los adoquines según su geometría, material y tipo de tránsito, y especifica requisitos como resistencia a la compresión, absorción de agua y resistencia a la abrasión. Lo que permitirá que el molde propuesto cumpla con los requerimientos del sector de la construcción. La composición de los adoquines básicamente es de arena fina, piedra triturada gruesa, cemento, agua y pigmento químico.

Según la norma ONNCEE (2014), los adoquines deben cumplir con criterios de resistencia a la compresión establecidos en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Resistencia a compresión según la NMX-C-314-ONNCCE-2014.

Tipo	Resistencia media MPa <i>kg/cm²</i>	Resistencia mínima individual MPa <i>kg/cm²</i>
A	29.4 (300)	24.5 (250)
B	39.2 (400)	35.3 (360)
C	44.1 (450)	39.7 (405)
D	55.0 (560)	50.0 (510)

Fuente: ONNCEE (2014), NMX-C-314-ONNCCE-2014

Además de los materiales convencionales utilizados en la fabricación de adocretos, como el cemento, los agregados y los pigmentos, en la actualidad se ha comenzado a incorporar el uso de CAX, las cuales permiten modelar con precisión los moldes requeridos para la producción de adocretos. Estas tecnologías se complementan con simulaciones digitales y procesos de impresión 3D, los cuales facilitan la validación de prototipos antes de su manufactura definitiva.

De acuerdo a Gudeta y Kim (2024) La tecnología apropiada podría definirse como “diseñar tecnología moderna que sea fácilmente comprensible para la sociedad en general y que resuelva los problemas de la comunidad”. Estas tecnologías también facilitan la personalización de los adoquines para adaptarse a diferentes requerimientos de pavimentación, como resistencia a cargas pesadas, estática o durabilidad.

En este estudio, se propone el diseño de moldes específicos para adocretos que emplean CAX, lo que no solo permite analizar la precisión en la manufactura de las piezas, sino que también permite un diseño más eficiente y adaptable a las especificaciones de la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014.

El uso de adocretos presenta beneficios en los sistemas de pavimentación debido a que son una opción atractiva para pavimentar áreas con alto tráfico vehicular o peatonal.

Beneficios de los adocretos

- Presentan una gran durabilidad frente a condiciones ambientales adversas.
- Están elaborados con materiales de alta calidad y procesos modernos.
- Ofrecen una excelente resistencia al desgaste por uso continuo.
- Son adecuados tanto para espacios interiores como exteriores.
- Funcionan eficazmente en zonas con tránsito intenso.
- Conservan su apariencia estética durante largos periodos.
- Se fabrican en una amplia gama de colores.
- Existen múltiples acabados disponibles, desde lisos hasta texturizados.
- Permiten una personalización versátil para distintos estilos arquitectónicos.
- Mejoran la estética y protegen fachadas exteriores.
- También son útiles para decorar y reforzar muros interiores.
- Aportan un valor visual significativo a cualquier entorno.
- Constituyen una opción constructiva confiable y duradera.
- Su instalación es compatible con distintos tipos de estructuras.
- Brindan muchas posibilidades de diseño creativo.

(Adaptado de Dispreh, 2023)

2.3 Sistemas de producción

Es necesario abordar los conceptos de sistema y producción para lograr una mejor comprensión del tema siguiente y su relación con el objeto de estudio.

De acuerdo con Bertalanffy (1976), un sistema es una unidad organizada en la que los elementos se unen para actuar de manera conjunta. Esta definición resalta la coordinación interna de los componentes que integran un sistema. Por otra parte en un sentido similar Adama y Ebert (1991), definen un sistema como “un sistema es un conjunto de objetos unidos por alguna forma de interacción e interdependencia constantes” (p. 11), enfatizando la relación entre cada una de sus partes. Ambas definiciones coinciden en que los sistemas siguen un conjunto de métodos que los une entre sí para cumplir una meta u objetivo planteado.

Partiendo de este entendimiento general del término de sistema, es posible abordar el concepto de producción, el cual representa un elemento clave dentro de una organización. Según Tawfik et al.(1992), la producción se lleva a cabo cuando a un producto o servicio se le agrega valor a través de su transformación física y química.

En términos equivalentes, “La producción se define como la fabricación y ensamble, así como todas las funciones y actividades que contribuyen directamente a la fabricación de bienes” (Segreto & Teti, como se citó en Wagner et al., 2017). Este enfoque considera tanto los procesos principales de una empresa orientados a generar valor, como el hecho de que esta etapa implica una inversión significativa de recursos.

En este contexto, el concepto de sistema de producción surge como la integración de ambos términos, resaltando el conjunto de materiales, herramientas, trabajadores y procesos con la única

finalidad de crear productos o servicios que cumplan con las expectativas de los clientes.

Diversos autores han definido el concepto de sistema de producción desde distintas perspectivas. Carro Paz y González Gómez (2012, p. 2) lo describe como una estructura compuesta por insumos, procesos, productos y flujos de información, que lo conectan con los clientes y el ambiente externo; los insumos incluyen recursos humanos, capital, materias y servicios comprados, tierra y energía.

En la misma línea, López et al. (2020) "un sistema de producción integra recursos, procesos y métodos de trabajo para convertir materias primas en productos terminados de forma eficiente y controlada". Por su parte, Stevenson (2018), destaca que los sistemas de producción constituyen una parte esencial de la estructura organizacional ya que determinan el flujo de materiales, los niveles de calidad, los tiempos de entrega y los costos de producción.

Resulta esencial comprender algunos enfoques que han transformado la eficiencia y gestión en los procesos de producción de prefabricados de concreto, particularmente relevantes para el diseño y desarrollo de moldes para adocretos.

El sistema Toyota de Producción (TPS), fue desarrollado por Toyota Motor Corporation en la década de 1970. Se implemento con el objetivo de eliminar desperdicios, conocido como muda, y promover la mejora continua (kaizen), la cual involucra a todo el capital humano

dentro de la organización. Según Ohno (1988, p. 15) este movimiento requiere un cambio de actitud en las organizaciones, ser conscientes y adoptar una nueva visión empresarial.

Spear y Bowen (1999) señalan que el Sistema de Producción Toyota se basa en cuatro principios fundamentales: la forma en que los operarios realizan sus tareas, cómo interactúan entre sí, cómo se estructuran las líneas de producción y cómo se promueve el aprendizaje organizacional para sostener la mejora continua. Este modelo dio origen al enfoque conocido como Lean Manufacturing.

En este sentido, Dutta (2024, p. 265) describe la manufactura esbelta como una estrategia estructurada que busca reducir al mínimo los desperdicios y aumentar el valor dentro de los procesos productivos. Este enfoque ha cobrado gran relevancia desde su desarrollo en la industria automotriz japonesa a mediados del siglo XX.

Dentro de las herramientas asociadas a la manufactura esbelta se encuentra el principio SMED (Single-Minute Exchange of Die), que significa "intercambio de matriz en un solo minuto". Esta filosofía, desarrollada por Shigeo Shingo, que busca reducir los tiempos de configuración de maquinaria a menos de 10 minutos. La metodología SMED destaca por su capacidad para minimizar los tiempos de ajuste y cambio en maquinaria (Dillon & Shingo, 1985), aspecto crucial cuando se busca una producción ágil y adaptable, como en el caso del diseño de moldes para adocretos.

En este tipo de manufactura, el cambio habitual de moldes para variar diseños, tamaños o texturas representa un reto que puede generar tiempos muertos y pérdidas operativas si no se realiza de manera eficiente.

Aplicar la metodología SMED en este contexto permite convertir tareas internas como el desmontaje, limpieza y montaje de moldes en actividades externas que pueden realizarse con la máquina en operación o en tiempos reducidos. Esto favorece una mayor adaptabilidad del sistema productivo y la reducción potencial de tiempos y costos de cambio, elementos relevantes en la industria de prefabricados de concreto. En el contexto de esta investigación, los principios de manufactura esbelta y la metodología SMED se emplean como referentes conceptuales, sin que su aplicación directa en planta forme parte del alcance del estudio.

Desde una perspectiva sistémica, el análisis de los procesos productivos requiere comprender los elementos que conforman un sistema de producción y la forma en que interactúan entre sí. En este sentido, un sistema de producción puede describirse a partir de sus componentes fundamentales, los cuales permiten analizar su funcionamiento, desempeño y capacidad de mejora.

A continuación, se presentan los elementos fundamentales que conforman un sistema de producción.

- **Entradas:** insumos, unidades, energía, información y recurso del cual parte el sistema.

- **Procesos de transformación:** Conversión de los insumos mediante operaciones físicas, químicas o de información.
- **Salidas:** Producto o servicios final que es entregado al usuario.
- **Retroalimentación:** verifica el desempeño del sistema que para realizar ajustes y mejorar la eficiencia mediante la calidad.

En el contexto de esta investigación, las entradas del sistema están conformadas por los requerimientos de diseño del molde, las propiedades de los materiales y la información técnica del proceso de producción. El proceso de transformación incluye actividades como el modelado CAD, la selección de materiales y la simulación estructural mediante el método de elementos finitos. Como salida, se obtiene el diseño conceptual del molde y la evaluación de su comportamiento estructural como se muestra en la Figura 2.1.

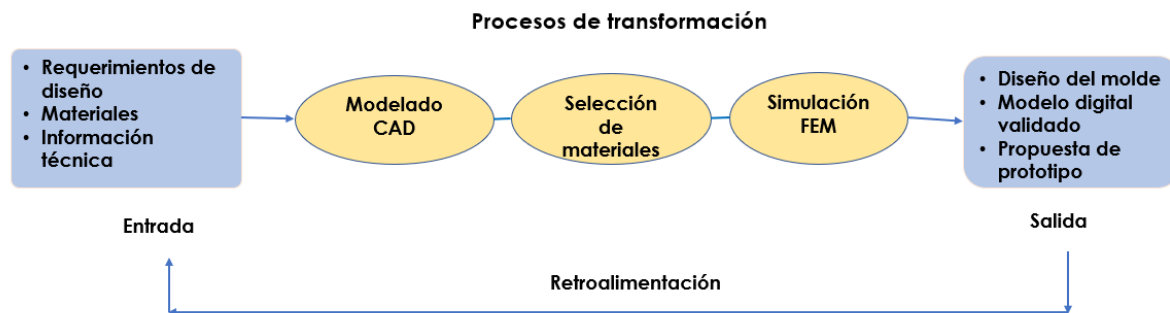


Figura 2.1 Elemento de un sistema aplicado al diseño de moldes. **Fuente:** Elaboración propia.

2.3.1 Clasificación de los sistemas de producción

De acuerdo a Groover (2007), Los sistemas de producción se clasifican de acuerdo con la cantidad de unidades fabricadas por año, como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Comparativo de los principales sistemas de producción.

Categoría	Producción de Bajas Cantidades	Producción de Cantidad Media	Producción Alta
Volumen anual	1 a 100 unidades	100 a 10,000 unidades	10,000 a millones de unidades
Tipo de producto	Especializado, complejo, personalizado	Variedad moderada o limitada de productos	Producto estándar o con pequeñas variaciones
Flexibilidad	Muy alta	Moderada	Muy baja
Tipos de distribución	Posiciones fijas / Por procesos	Por procesos / Celular (tecnología de grupo)	Por procesos / Celular / Por producto (flujo en línea)
Ejemplos típicos	Barcos, aeronaves, maquinaria pesada	Herramientas, maquinaria pequeña, piezas metálicas	Automóviles, electrodomésticos, electrónicos
Método de producción	Taller de trabajo	Producción por lotes / Manufactura celular	Producción por cantidad / Línea de flujo
Tipo de producción	Por proyecto	Por lotes	En masa o continua
Ventajas	Alta personalización, gran adaptabilidad	Permite variedad con mejor eficiencia que taller	Alta eficiencia, bajos costos unitarios
Desventajas	Costos altos, baja eficiencia	Tiempo muerto por cambios de lote	Alta inversión inicial, poca adaptabilidad
Tipo de equipo	Propósito general	Propósito general y especializado	Equipos dedicados y automatizados
Mano de obra	Altamente calificada	Calificada, técnica	Menos calificada, más dependiente de automatización

Fuente: Elaboración propia con base en principios de manufactura (adaptado de Groover, 2007).

2.3.2 Sistemas de producción aplicados a la manufactura de adocretos

La manufactura de adocretos se caracteriza por desarrollarse dentro de un sistema de producción en masa, en el que se producen grandes volúmenes de piezas estandarizadas. No obstante, la necesidad de incorporar variaciones en diseños, dimensiones o texturas mediante el cambio de moldes introduce retos operativos que pueden afectar la flexibilidad del proceso productivo.

Desde un enfoque conceptual, el análisis de metodologías como SMED permite identificar estrategias orientadas a reducir los tiempos de cambio de moldes y a mejorar la adaptabilidad del sistema productivo. En el contexto de esta investigación, dichos principios se consideran como referentes teóricos para analizar la flexibilidad del sistema, sin que su aplicación directa forme parte del alcance del estudio.

La producción de adocretos se enmarca dentro del sistema de producción en masa debido a las siguientes características:

- Estandarización: los adocretos presentan formas y dimensiones uniformes.
- Volumen elevado: se fabrican grandes cantidades para abastecer obras civiles, urbanizaciones y proyectos de infraestructura.

- Procesos repetitivos: se emplean moldes, mezcladoras, sistemas de vibrado y curado sistemático para asegurar la uniformidad del producto.
- Optimización de tiempos: se utilizan sistemas de producción organizados en líneas para maximizar la eficiencia operativa.

Por tanto, el diseño de un sistema de producción adecuado para la manufactura de adocretos debe enfocarse en la selección óptima de tecnologías, la automatización de procesos críticos, el control de calidad riguroso y una gestión eficiente de inventarios, aspectos que pueden ser fortalecidos mediante el uso de herramientas de diseño y manufactura asistidas por computadora.

2.4 Sistemas de manufactura

De acuerdo a Groover (2007, p. 2) etimológicamente, manufactura deriva del latín manus, que significa 'mano', y factus, que significa 'hacer', lo cual originalmente hacía referencia al trabajo manual.

Según el mismo autor, la manufactura como campo de estudio se puede definir de dos maneras una tecnológica y otra económica. La definición tecnológica implica modificar un material inicial, tanto en su forma como en sus propiedades o apariencia, mediante procesos técnicos, con el objetivo de crear productos útiles como se muestra en la Figura 2.2. En términos económicos, la manufactura es la conversión de insumos básicos en bienes de mayor valor comercial, empleando técnicas de manufactura o ensamblaje, Figura 2.3.

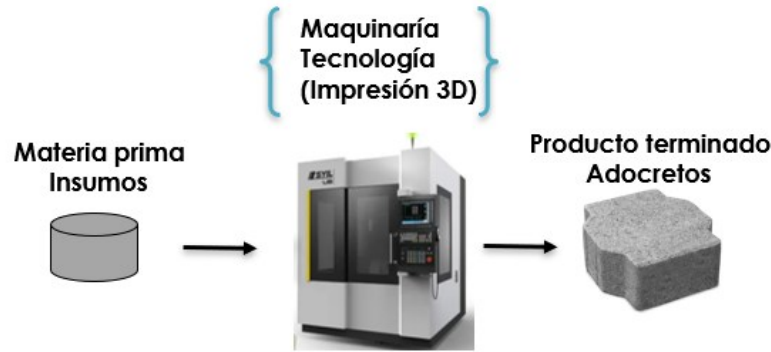


Figura 2.2 Transformación física/química para cambiar forma, propiedades o apariencia. **Fuente:** Adaptado de Groover (2007, p. 4).

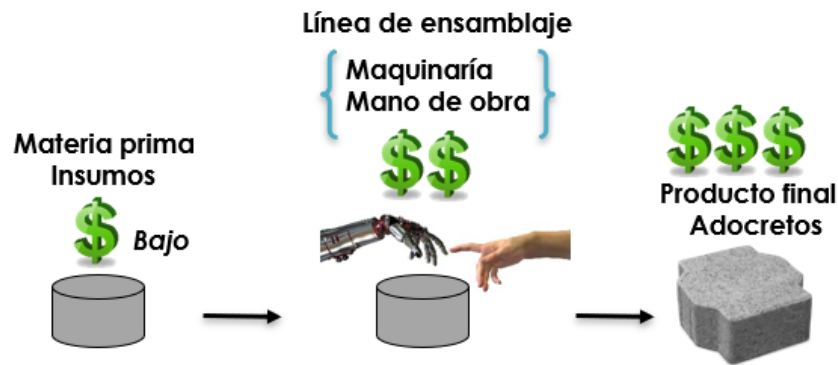
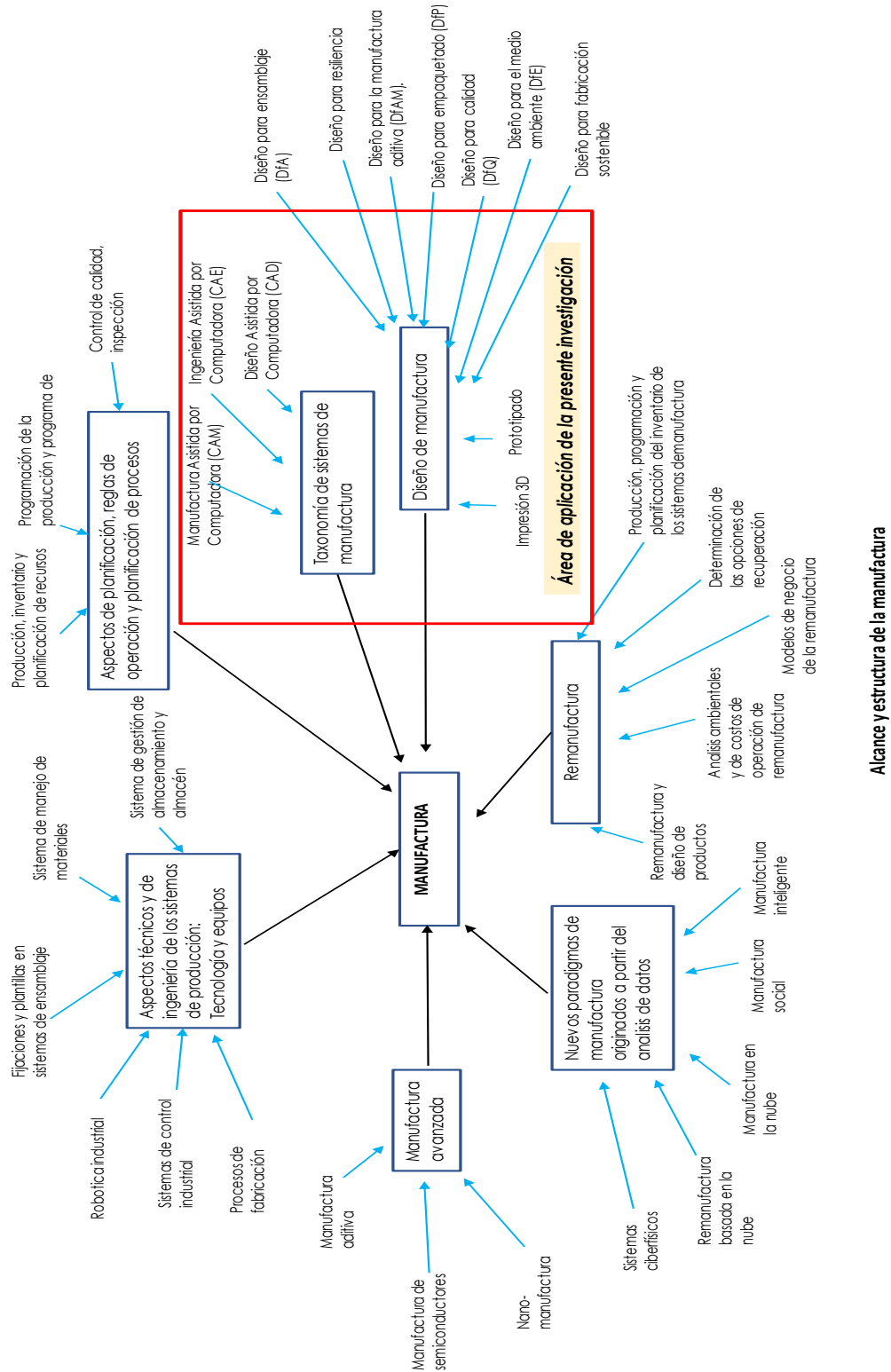


Figura 2.3 Clasificación de los procesos de manufactura con tecnología. **Fuente:** Adaptado de Groover (2007, p. 4).

En relación con los conceptos previamente expuestos, La manufactura se define como el proceso de convertir insumos en productos mediante la combinación de recursos humanos y tecnológicos.

Esta interacción evidencia la complejidad y el alcance del sistema de manufactura. En la Figura 2.4 se presenta su estructura y clasificación, mostrando cómo se organizan según su complejidad, propósito, flexibilidad e integración tecnológica, desde métodos tradicionales hasta soluciones avanzadas como CAD/CAM e Industria 4.0.



Alcance y estructura de la manufactura

Figura 2.4 Alcance y estructura de la manufactura. **Fuente:** Adaptado de Esmaelian et al., (2016) La evolución y el futuro de la manufactura: una revisión, con modificaciones propias.

En el marco de este estudio, el área resaltada indica el ámbito en el que se desarrolla la presente investigación, específicamente en la integración de tecnologías CAX, que incluyen herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), ingeniería asistida por computadora (CAE) y manufactura asistida por computadora (CAM), así como procesos de prototipado e impresión 3D aplicados al diseño y desarrollo de moldes para adocretos.

Hoy en día la manufactura moderna y su relación con la industria 4.0, han desarrollado proyectos de alto impacto, según el autor Joyanes Aguilar (2017) señala que la industria 4.0 describe la automatización y control digital de las operaciones industriales y su conexión con el internet para facilitar la flexibilidad de los procesos de operación. Weter et al., (2015) señalan por otra parte que es la modernización de fábricas mediante la implementación de tecnologías inteligentes, para actuar ante proyectos innovadores que demandan los clientes.

En este sentido, el uso de CAX para el diseño y manufactura de prototipos se alinea con los principios de la Industria 4.0 al promover eficiencia, personalización y automatización del proceso de manufactura.

Anteriormente se mencionó el concepto de diseño, entendido como una idea que toma forma y se materializa en un producto final. En la Figura 2.4 denominada alcances y estructura de la manufactura, se amplía este concepto hacia el diseño de manufactura, integrando las etapas de Diseño para la Manufactura (DFM) y Diseño para el Ensamblaje (DFA).

Boothroyd y Dewhurst conceptualizaron el diseño para el ensamblaje (DFA) como una metodología que permite considerar, desde la etapa de diseño del producto, los métodos de ensamblaje, el tiempo requerido y los costos asociados. Con el tiempo, esta perspectiva evolucionó hacia el diseño para la manufactura (DFM), incorporando también los materiales y los procesos de fabricación en las decisiones de diseño. La integración de ambas metodologías dio origen al enfoque conocido como Diseño para la Manufactura y el Ensamblaje (DFMA), que busca optimizar los productos desde sus primeras fases para reducir el número de componentes, disminuir los costos, mejorar la calidad y aumentar la eficiencia de producción (Boothroyd Dewhurst, Inc., 2025).

Por su parte, Swift y Booker (2013), sugieren que aplicar técnicas de diseño DFA Y DFM en fases iniciales del desarrollo permite reducir costos y mejorar la competitividad, ya que estas herramientas facilitan la evaluación del desempeño del diseño y respaldan técnicamente las decisiones del diseñador. Estas definiciones complementarias evidencian cómo el enfoque DFMA ha evolucionado no solo como una herramienta de análisis, sino como una estrategia integral para mejorar el diseño de productos desde sus primeras etapas. Mientras que Boothroyd y Dewhurst destacan la importancia de integrar el ensamblaje y la manufactura para optimizar el producto final, Swift y Booker (2013) subrayan su valor práctico en términos de reducción de costos y aumento de competitividad.

En conjunto, ambos enfoques refuerzan la necesidad de aplicar estas metodologías desde el inicio del proceso de diseño, especialmente en

entornos industriales donde la eficiencia y la calidad son factores críticos.

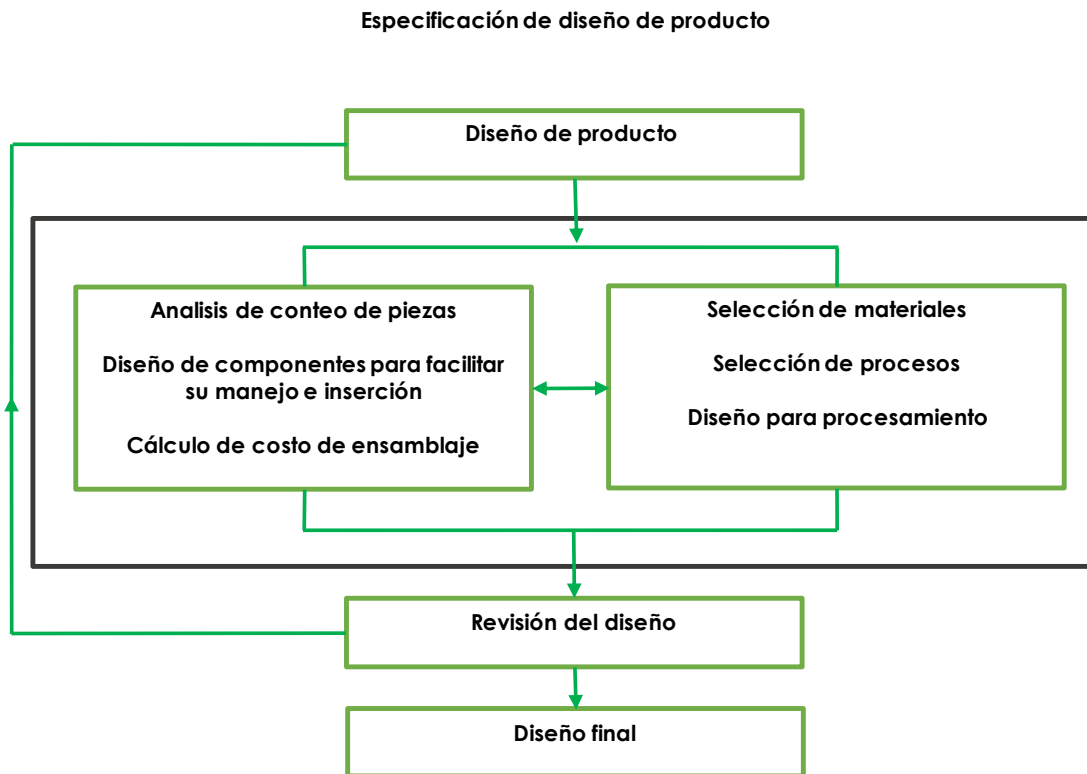


Figura 2.5 Esquema del proceso de diseño para la manufactura y ensamblaje. **Fuente:** Adaptado de Swift y Booker (2013) Manufacturing process selection handbook.

El esquema ilustra las principales etapas del proceso de diseño orientado a la manufactura y el ensamblaje (DFM/DFA), destacando la importancia de considerar desde fases tempranas los requerimientos del proceso productivo y la facilidad de ensamblaje. Esta metodología busca optimizar los recursos, reducir los costos de producción y asegurar una transición más eficiente del diseño al entorno de manufactura real. Su aplicación permite tomar decisiones informadas que impactan positivamente en la funcionalidad, calidad

y competitividad del producto final, especialmente cuando se trata moldes destinados a la fabricación de adocretos.

En el contexto de esta tesis, la aplicación conceptual de las metodologías de Diseño para la Manufactura (DFM) y Diseño para el Ensamblaje (DFA) en el diseño de moldes para adocretos permite analizar su potencial para contribuir a la reducción de costos y a la optimización del tiempo de fabricación. De esta manera, dichas metodologías se consideran un factor relevante para fortalecer el potencial competitivo de las empresas de prefabricados, al favorecer diseños más eficientes, con menor probabilidad de errores y mayor viabilidad productiva.

Asimismo, el enfoque DFM/DFA facilita la selección adecuada de materiales, la simplificación de la geometría del molde y la planificación eficiente de su ensamblaje, aspectos que influyen positivamente en la eficiencia de los procesos de manufactura desde las etapas tempranas de diseño.

Resulta oportuno, por tanto, comprender cómo se llevan a cabo los procesos dentro del sistema de manufactura. Esto conduce al estudio de los procesos de manufactura, los cuales comprenden las técnicas específicas mediante las cuales la materia prima es modificada física o químicamente para convertirse en productos con valor funcional y comercial.

2.5 Procesos de manufactura

Según Black (1996), el proceso de manufactura es aquel en el que “se añade valor a los materiales a medida que pasan por el proceso” (p. 115). Por su parte, Groover (2010) lo define como un proceso diseñado para alterar las propiedades físicas o químicas de un material y así aumentar su valor. En este sentido, puede entenderse como la serie de operaciones que permiten transformar insumos en productos que poseen un mayor valor económico y funcional.

Swift y Booker (2013) clasifican los procesos de manufactura en categóricas como fundición, moldeo, eliminación de material, conformado, enfocándose en las técnicas específicas utilizadas para modificar materiales. Por otro lado Groover (2007), propone una clasificación más funcional, dividiendo los procesos en operaciones de proceso y operaciones de ensamble. Las primeras transforman el material modificando sus propiedades para acercarlo al producto final. Las de ensamble unen varias piezas para formar un nuevo componente, como un ensamble o una soldadura. Ambas perspectivas permiten comprender los procesos de manufactura desde distintos ángulos: una desde el tipo de transformación aplicada a los materiales, y otra desde su función dentro del sistema productivo.

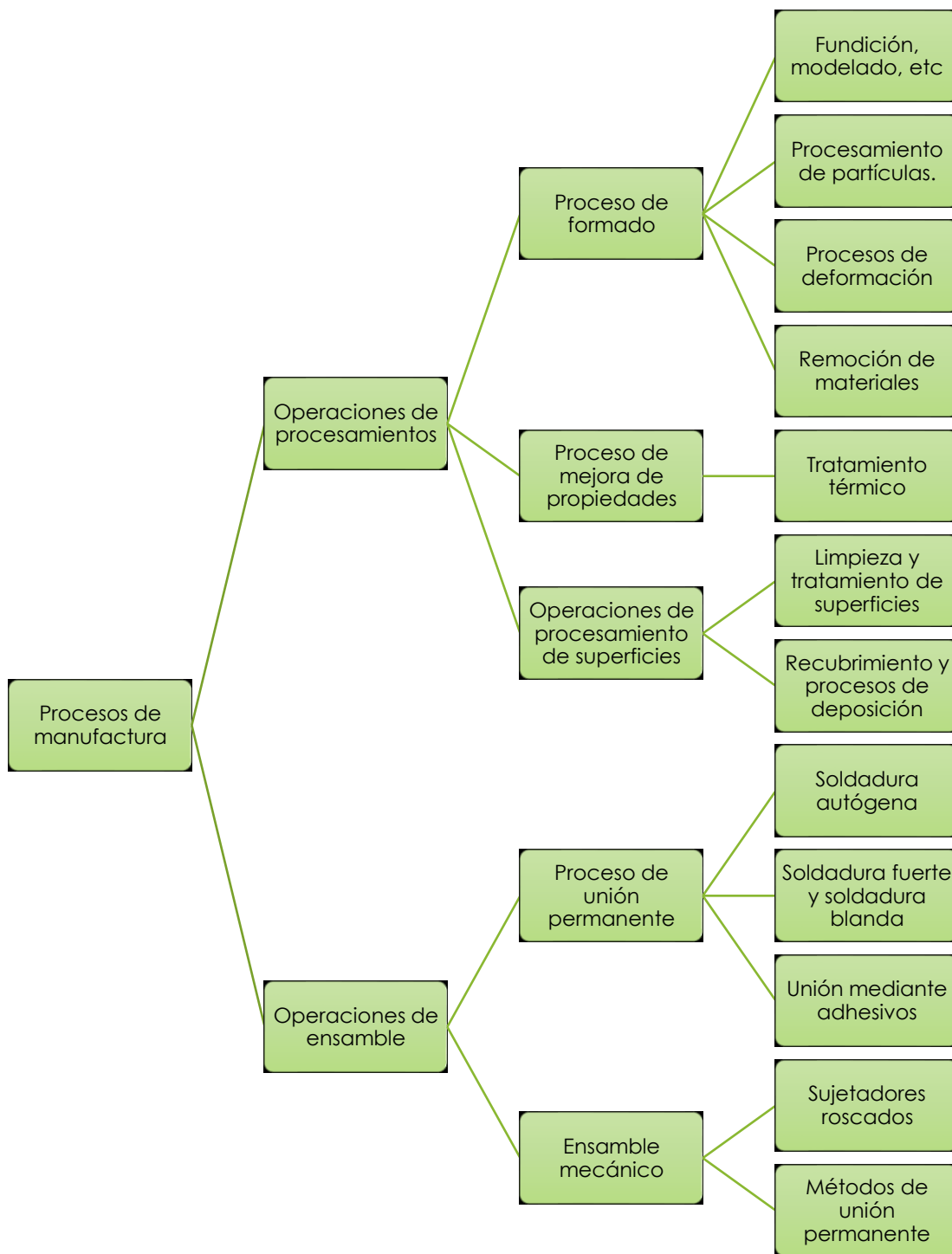


Figura 2.6 Clasificación de los procesos de manufactura. **Fuente:** Adaptado de Groover (2007, p. 11).

No obstante, la clasificación de los procesos tradicionales de manufactura presenta limitaciones al momento de incorporar o reflejar adecuadamente las nuevas tecnologías emergentes en los sistemas productivos, particularmente aquellas asociadas con la digitalización y automatización de los procesos industriales (Nassehi et al., 2012).

Para superar estas restricciones, Nassehi et al. (2012, p. 54) propone una clasificación en cinco grupos de procesos, orientada a facilitar la estructuración y comprensión de la manufactura híbrida, como se muestra en la Figura 2.7.



Figura 2.7 Clasificación de los procesos de manufactura con tecnología.

Fuente: Elaboración propia con base en Nassehi et al. (2012).

En la Figura 2.7 se presenta la clasificación de los procesos de manufactura según la tecnología utilizada. Esta clasificación permite identificar los distintos tipos de operaciones involucradas en la producción, organizándolos de acuerdo con la forma en que intervienen sobre el material, ya sea mediante unión, división, transformación, remoción o adición de material. De esta manera, se facilita la comprensión de los diferentes enfoques tecnológicos utilizados en los sistemas de manufactura.

En el contexto de esta investigación, el área resaltada corresponde a los procesos de manufactura aditiva y sustractiva, los cuales se relacionan directamente con el desarrollo del molde híbrido propuesto. La manufactura aditiva se vincula con la fabricación de insertos mediante impresión 3D, mientras que la manufactura sustractiva se asocia con la posible fabricación de la base estructural del molde mediante procesos de mecanizado.

Comprender esta clasificación resulta fundamental para seleccionar las tecnologías más adecuadas en el diseño y desarrollo de moldes para adocretos. Esta base conceptual permite establecer criterios técnicos que orientan el uso de herramientas CAX, particularmente en el modelado CAD, la simulación estructural y la integración con procesos de manufactura, asegurando que el prototipo propuesto sea compatible con los métodos actuales de producción utilizados en el sector de prefabricados de concreto.

2.5.1 Manufactura aditiva

Según Liu y Wen (2022) La manufactura aditiva (MA), también conocida como impresión 3D, consiste en la fabricación de objetos físicos a partir de modelos digitales tridimensionales, mediante la deposición sucesiva de capas de material. Ma et al. (2018) señalan que, en este contexto, la manufactura aditiva ha sido implementada en múltiples sectores industriales, desempeñando un papel central en la reconfiguración de los sistemas de manufactura convencionales y en el avance hacia la denominada tercera revolución industrial.

Por su parte Kanishka y Acherjee (2023) señalan que este método contrasta con la manufactura sustractiva, la cual parte de un bloque de material que se le retira el exceso hasta obtener la forma final. Este proceso facilita el diseño de piezas con formas detalladas, e incluso la fabricación de componentes híbridos que combinan diferentes métodos de manufactura. Además, permite una producción personalizada y en alto volumen, utilizando menos material para reducir el peso (Schneevogt et al., 2021).

En este contexto, a continuación, se presenta una cronología de los principales progresos en el desarrollo de la manufactura aditiva.

Tabla 2.5 Cronología de los principales desarrollos en manufactura aditiva.

1986	Chuck Hull inventó la SLA, una técnica para crear objetos 3D capa a capa que emplea un láser para solidificar un fotopolímero líquido. Esto sentó las bases para las tecnologías MA posteriores.
1992	Carl Deckard desarrolló SLS, una tecnología que emplea un láser para fusionar material en polvo para producir un objeto 3D. Esto amplió el alcance de MA para abarcar una gama más amplia de materiales, incluidos metales y cerámicas.
1993	Scott Crump inventó FDM, una tecnología para crear objetos 3D mediante la extrusión de una sustancia termoplástica capa por capa. Esto contribuyó a la adopción generalizada de la impresión 3D de escritorio.
1995	La primera impresora 3D para uso comercial, la ZPrinter, fue presentada por Z Corporation. Esto introdujo la impresión 3D en el ámbito empresarial, lo que permitió la creación rápida de prototipos e iteraciones de diseño.
2002	Se introduce la tecnología DMLS, que emplea un láser para fusionar polvo metálico y producir un objeto 3D. Esto permitió la producción de objetos 3D de metal, ampliando las aplicaciones aeroespaciales y de ingeniería.
2005	La primera pierna protésica impresa en 3D fue creada por investigadores del Centro de Prototipado Rápido en Nueva Zelanda. Esto demostró el potencial de la tecnología FA en el sector de salud.

2007	La primera impresora 3D de metal fue comercializada por EOS GmbH. Esto abrió nuevas vías en la fabricación de piezas metálicas complejas.
2008	La primera impresora 3D autorreplicante fue presentada por el Proyecto RepRap. Esto hizo accesible la impresión 3D, fomentando los diseños de código abierto y la cooperación comunitaria.
2011	El primer órgano humano impreso en 3D, una tráquea sintética, se implantó con éxito en un paciente. Esto marcó un gran avance en el campo de la medicina, sentando las bases para el futuro de la impresión de órganos.
2014	El primer automóvil impreso en 3D, el Strati, fue producido por Local Motors. Esto demostró el potencial de la manufactura aditiva para revolucionar la fabricación de automóviles.
2016	Hewlett-Packard (HP) ingresa al sector de la impresión 3D con el lanzamiento de su tecnología de fusión multichorro (MJF). Esto indicó la expansión de la industria de la MA y una mayor competencia dentro del sector.

Fuente: Adaptado de Kanishka y Acherjee (2023).

De acuerdo a He et al. (2023), cada vez más industrias se están destacando por la fabricación aditiva (MA) debido a su flexibilidad en el diseño, su eficiencia en el uso de materiales y capacidad para fabricar a bajo costo en volúmenes reducidos.

En la misma línea, el Informe Wohlers 2023 destaca cómo la manufactura aditiva sigue expandiéndose y consolidándose en diversos sectores. Este crecimiento incluye su uso en aplicaciones de gran altura, como en el sector aeroespacial y la construcción.

También se destaca el desarrollo de nuevas normas y estándares que regulan su aplicación. Además, el informe resalta que la MA ya no se limita al prototipado, sino que está siendo cada vez más utilizada para fabricar piezas finales listas para su uso (Scott, 2023).

En este sentido, Ngo et al. (2018), señala que esta nueva tecnología es “la libertad de diseño, la personalización masiva, la minimización de residuos y la capacidad de fabricar estructuras complejas, así como la creación rápida de prototipos, son los principales beneficios de la manufactura aditiva (MA) o impresión 3D”.

La manufactura aditiva se aplica en sectores como la aeronáutica, la odontología, la medicina y la automoción. En un mercado global competitivo, los ingenieros deben reducir el tiempo mediante procesos ágiles que permitan iteraciones rápidas y producción eficiente (Mohamed et al., 2015).

En el contexto de esta tesis, la manufactura aditiva se explora como una solución viable para el diseño y construcción de prototipos de moldes para adocretos, permitiendo validar conceptos, optimizar geometrías y evaluar su funcionalidad antes de reproducirlos por métodos más robustos como el fresado.

2.5.1.1 Tecnologías específicas

Según la norma ASTM F2792 de Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, las tecnologías de manufactura aditiva (MA) actualmente se clasifican en siete familias (Liu & Wen, 2022). No obstante, se han desarrollado nuevas variantes, como la pulverización en frío y la deposición aditiva por fricción y agitación, que amplían las capacidades del sector al permitir el uso de materiales avanzados y combinaciones de procesos (Kanishka & Acherjee, 2023).

En la Figura 2.8 se muestra la principal clasificación de la manufactura aditiva y sus familias; posteriormente, en la Figura 2.9 se presentan los materiales más utilizados, junto con sus propiedades y aplicaciones, con el fin de comprender su influencia en el desempeño de las piezas manufacturadas.

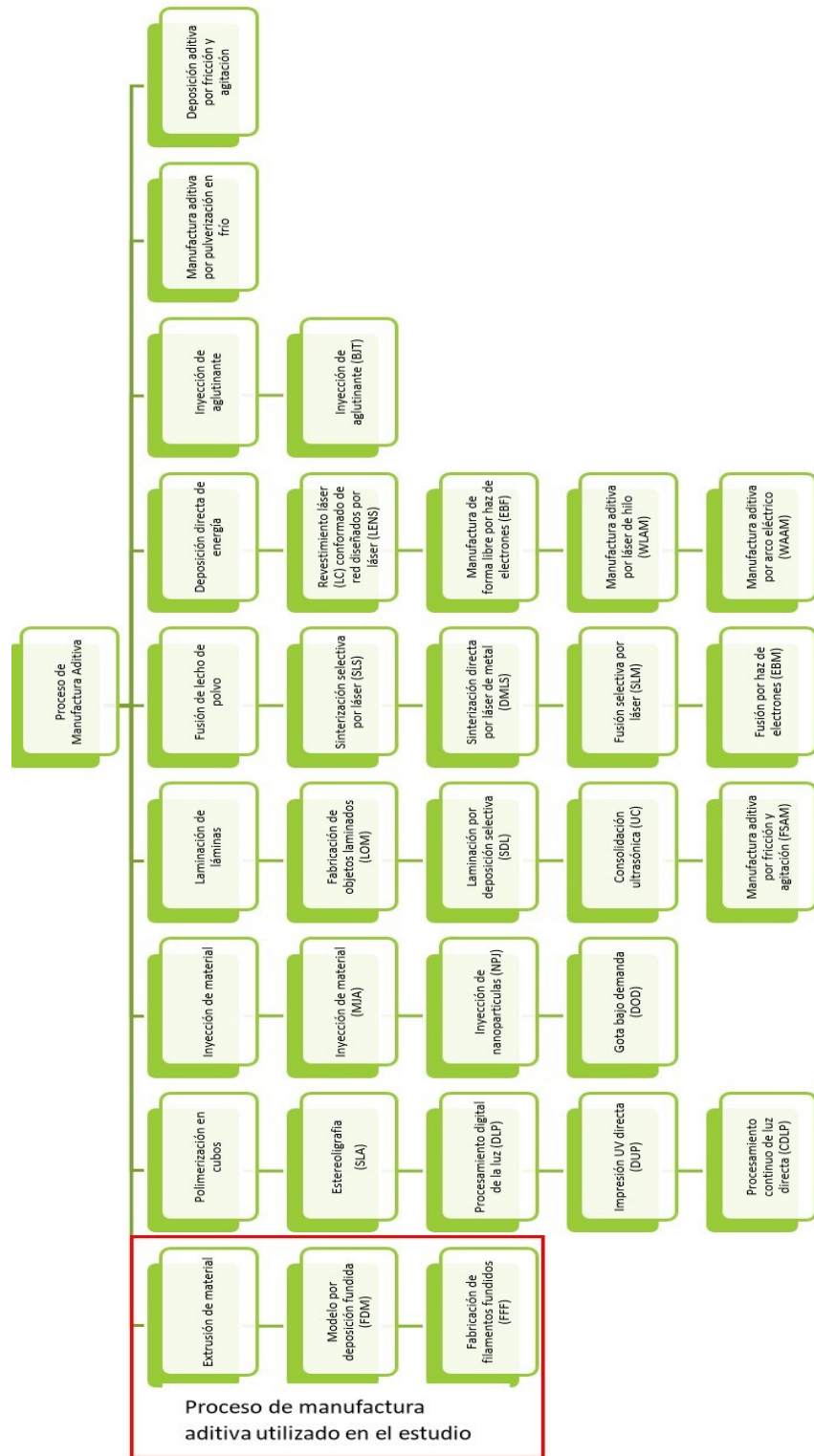


Figura 2.8 Clasificación de la MA y las familias MA. **Fuente:** Adaptado de Kanishka y Acherjee (2023, p. 579).

	Metales	Polímeros	Compuestos	Cerámica	Bioquímicos	Arena
Materiales utilizados en aplicaciones de Manufactura aditiva	<p>Titanio (Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4V ELI, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Ti-5Al-2,5Sn)</p> <p>Acero inoxidable (316L, 17-4 PH, 15-5 PH, 304L, 420)</p> <p>Acero al carbono (1018,1045, 4140,4340)</p> <p>Aluminio (AlSi10Mg, AlSi2, AlSi7Mg, Al6061, A17075)</p> <p>Cobalto-cromo (CoCrMo, CoCrW, CoCrFeNiMn)</p> <p>Aleaciones de Níquel (Inconel, Hastelloy X, Haynes 282, Waspaloy)</p> <p>Cobre (CuNi10FeMn, CuCrZr, CuAl10Ni15Fe4)</p> <p>ORO (AuAg, AuCu)</p> <p>Plata (AgCu, AgPd)</p> <p>Platino (Pt 950, Pt 900, Pt 850)</p> <p>Zinc (ZnAl4)</p> <p>Magnesio (AZ31B, AZ61A, AZ80A)</p> <p>Inconel (Inconel 718, Inconel 625, Inconel 706)</p> <p>Acero para herramientas (H13, D2, A2, S7)</p> <p>Bronce (CuSn6, CuSn8, CuSn10)</p> <p>Latón (CuZn37, CuZn40, CuZn15)</p> <p>Tungsteno</p> <p>Molibdeno</p> <p>Circonio</p>	<p>Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)</p> <p>Ácido poliláctico (PLA)</p> <p>Poliétilen tereftalato glicol (PETG)</p> <p>Poliamida (naílon)</p> <p>Poliéter éter cetona (PEEK)</p> <p>Policarbonato (PC)</p> <p>Poliuretano termoplástico (TPU)</p> <p>Polipropileno (PP)</p> <p>Poliestileno de alta densidad (HDPE)</p> <p>Poliestileno de baja densidad (LDPE)</p> <p>Polifenilsulfona (PPSF)</p> <p>Polieterimida (PEI)</p> <p>Poliéterceton acetona (PEKK)</p> <p>Alcohol polivinílico (PVA)</p> <p>Polivinil butiral (PVB)</p> <p>Poliétilenimina (PEI)</p> <p>Poliacrilamida (PAA)</p> <p>Polimetilmetacrilato (PMMA)</p>	<p>Polímeros reforzados con fibra de carbono (Markforged Onyx, NyloX, CarbonX, etc.)</p> <p>Polímeros reforzados con fibra de vidrio (Ultimaker Tough PLA, Matter Hackers NylonG, etc.)</p> <p>Compuesto de matriz metálica (aluminio reforzado con carburo de silicio, níquel reforzado con óxido de aluminio)</p> <p>Compuesto de matriz cerámica (Carburo de silicio reforzado con fibra de carbono)</p> <p>Compuestos híbridos (Windform XT 2.0, Roboze Carbon PEEK, etc.)</p> <p>Compuestos conductores (ultrafuse 316LX, etc.)</p> <p>Nanocompuestos (grafeno PLA, compuesto de polímero de nanopartículas piezoeléctricas)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Vitrocerámica • Porcelana • Carburo de Silicio • Alúmina • Zirconio • Dióxido de titanio • Vidrio en polvo • Cordierita • Hidroxiapatita • Fosfato tricálcico 	<ul style="list-style-type: none"> • Gelatina/M etacrillato de gelatina • Alginato • Fibrina • Quitosano • Colágeno • Lignina • Ácido hialurónico • Polietilenglicol • Policaprolactona 	<ul style="list-style-type: none"> • Arena de sílice • Arena de circón • Arena de cromita • Arena cerámica • Arena de olivino

Figura 2.9 Materiales utilizados en aplicaciones de Manufactura aditiva. **Fuente:** Adaptado de Kanishka y Acherjee (2023, p. 581).

En el contexto de la manufactura aditiva, existen diversas tecnologías que se diferencian principalmente por la forma en que construyen las capas y el tipo de material utilizado. Estas tecnologías emplean distintos principios físicos —como la fusión térmica, la fotopolimerización o el sinterizado láser— y varían en precisión, costo y velocidad de fabricación (Afridi et al., 2024; Yehia et al., 2024).

Entre las más representativas se encuentran:

Estereolitografía (SLA, Stereolithography):

Es una técnica de manufactura aditiva basada en la fotopolimerización, desarrollada por Charles Hull en 1986. Este método emplea una resina líquida fotosensible que se endurece a partir de una fuente de luz ultravioleta, como un láser o proyector, construyendo la pieza capa por capa. La resina contiene monómeros, foto iniciadores y aditivos que permiten llegar al producto final. Debido a su alta resolución (hasta 10 μm) y acabado superficial, la SLA es ideal para fabricar modelos detallados y componentes complejos. Aunque trabaja con un solo material, su precisión y capacidad de personalización la posicionan como una tecnología clave en sectores como la medicina, aeroespacial y robótica (Afridi et al., 2024).

Sinterizado por láser selectivo (SLS, Selective Laser Sintering):

Es una técnica de manufactura aditiva que emplea un láser de alta potencia, generalmente de dióxido de carbono, para fusionar de manera selectiva capas de material en polvo y formar piezas tridimensionales. Este proceso, guiado por un modelo digital, se repite

capa a capa hasta obtener la pieza completa. La SLS permite fabricar componentes poliméricos o metálicos con alta precisión y sin necesidad de estructuras de soporte, las piezas suelen presentar rugosidad superficial por las propiedades del polvo y los parámetros de fabricación (Yehia et al., 2024).

Modelización por deposición fundida (FDM, Fused Deposition Modeling):

La modelización por deposición fundida (FDM) es un proceso de impresión 3D que utiliza filamentos poliméricos fundidos para crear piezas capa por capa. El material se extruye a través de una boquilla que se mueve en tres ejes, guiada por un modelo digital. Este método permite manufacturar componentes con precisión y distintos materiales según la impresora utilizada. El ácido poliláctico (PLA) es uno de los termoplásticos más comunes en este proceso. Tras la impresión, las piezas pueden lijarse, pintarse o mecanizarse para mejorar su acabado (Mwema & Akinlabi, 2020).

Manufactura por deposición de forma (SDM, Shape Deposition Manufacturing):

Es un proceso híbrido que combina la adición y eliminación de material para crear piezas tridimensionales precisas. Permite manufacturar formas complejas capa por capa e integrar componentes mecánicos o eléctricos durante la construcción. Su ciclo repetitivo de deposición y mecanizado mejora la exactitud del modelo, utilizando materiales de sacrificio o moldes temporales que se retiran o reutilizan al finalizar el proceso (Sheikhi & Kuşhan, 2021).

Estas tecnologías reflejan la evolución de la manufactura aditiva desde procesos claramente aditivos, como la estereolitografía (SLA), hasta enfoques híbridos como el SDM, que integran estrategias aditivas y sustractivas. En esta investigación, la tecnología FDM se utiliza para la fabricación de prototipos de moldes poliméricos, mientras que el SDM se analiza como un referente conceptual que permite comprender los principios de la manufactura híbrida aplicada al diseño de moldes.

2.5.1.2 Impresión 3D

De acuerdo con Ngo et al. (2018), la impresión 3D permite construir geometrías personalizadas y complejas, adaptadas a los requerimientos específicos de cada pieza. En este contexto, la manufactura aditiva ha demostrado un crecimiento sostenido en diversas industrias, consolidándose como una alternativa eficiente para la producción de prototipos y componentes funcionales.

Entre las tecnologías más difundidas se encuentra el modelado por deposición fundida (FDM), también conocido como fabricación por filamento fundido (FFF). Según Syrlybayev et al. (2021), el FDM es actualmente uno de los procesos más utilizados debido a su simplicidad operativa, disponibilidad comercial y bajo costo. Esta tecnología fue desarrollada por la empresa Stratasys Inc., que comercializó su primera impresora en 1990 (Groover, 2007, p. 792).

Durante la manufactura de piezas mediante FDM, la resistencia mecánica y la precisión dimensional son dos parámetros críticos. Esto resulta especialmente relevante en el diseño de moldes para

adocretos, donde se requieren cavidades exactas y superficies que permitan ensamblajes confiables, además de estructuras capaces de soportar cargas durante la validación del diseño.

Según Al Rashid et al. (2020), el proceso FDM consiste en la extrusión de un filamento termoplástico fundido mediante una boquilla calentada, que deposita el material capa por capa de forma controlada sobre una plataforma de impresión, el cabezal de impresión se desplaza controladamente a lo largo de los ejes X, Y y Z, siguiendo las trayectorias generadas a partir del modelo 3D digital. Debido a que el filamento utilizado es un polímero termoplástico, este se funde durante el proceso de impresión y se solidifica al enfriarse a temperatura ambiente, como se muestra en la Figura 2.10.

Sin embargo, se ha identificado que una de las limitaciones del proceso es la debilidad en las propiedades mecánicas del producto final, atribuida principalmente a la deficiente adhesión entre capas. A pesar de ello, la tecnología FDM continúa siendo una alternativa atractiva por su rapidez, facilidad de uso y bajo costo (Kharat et al., 2023).

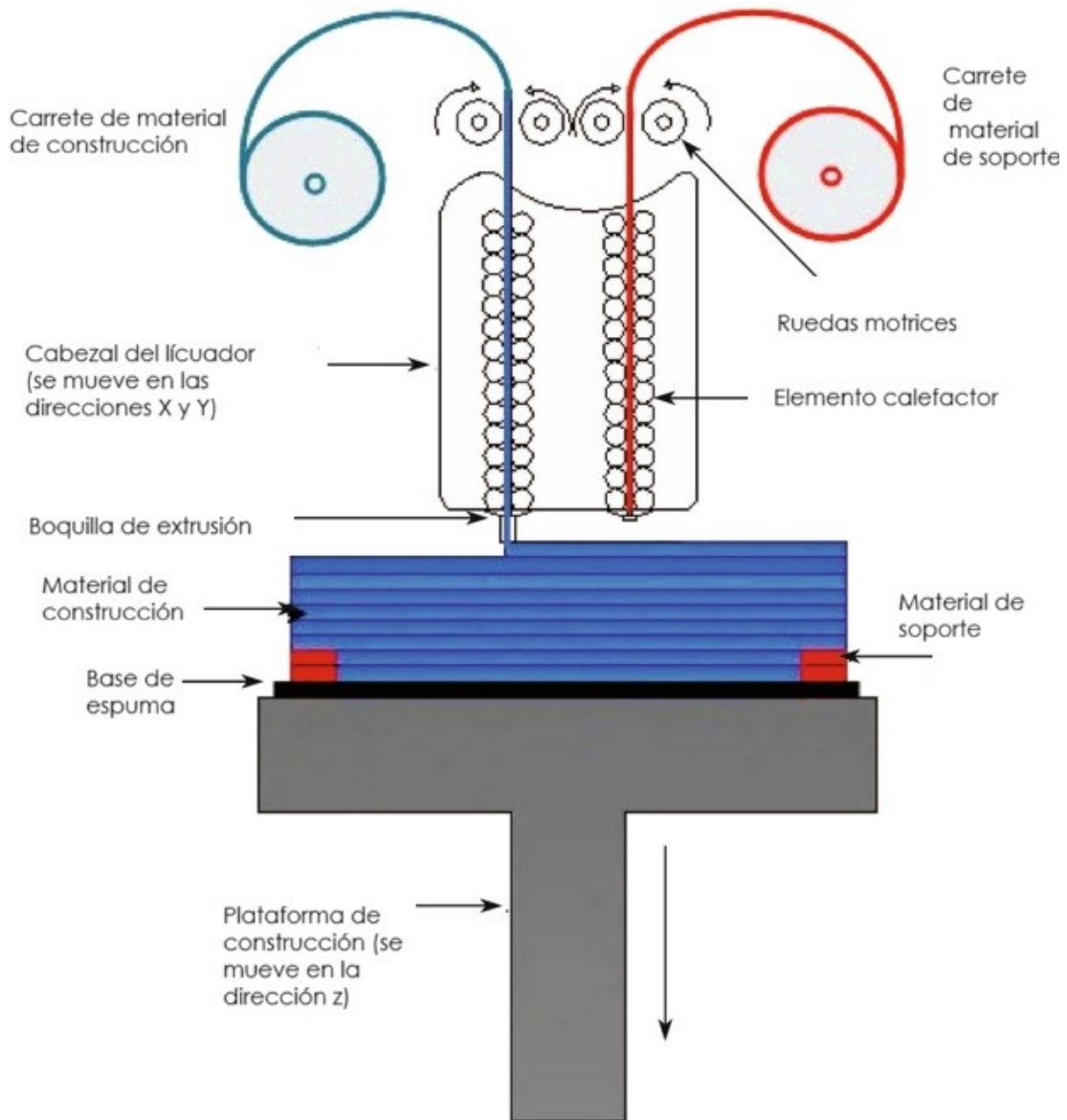


Figura 2.10 Principio del proceso FDM. **Fuente:** Adaptado de Mohamed et al., (2015).

Los materiales comúnmente utilizados en tecnología FDM son polímeros termoplásticos (véase Figura 7).

De acuerdo con Wojtyla et al. (2017) los más empleados incluyen ABS, PLA, nailon, policarbonato, ASA, HIPS, PETG, MABS y TPC. En este trabajo, se eligieron PLA y PETG, descartando ABS, debido a que el enfoque se centra en polímeros biodegradables y de fácil procesamiento para prototipos funcionales:

- El PLA es un polímero biodegradable derivado de fuentes naturales como el maíz. Destaca por su facilidad de impresión, pero su baja resistencia térmica y fragilidad limitan su uso en piezas funcionales (Kristiawan et al., 2021).
- El PETG (polietilenglicol tereftalato) es un tipo de plástico que se usa comúnmente en impresoras 3D. Se obtiene a través de procesos como el moldeo por inyección o la extrusión de láminas. Este material es resistente, casi no se encoge al enfriarse y soporta bien ciertos productos químicos. Es fácil de usar para imprimir en 3D porque se adhiere bien entre capas, es un material que es frecuentemente utilizado debido a la facilidad para reproducir muestras. Es el mismo plástico que se usa para hacer botellas. Cuando está frío es duro y transparente, pero puede cambiar un poco su aspecto si se calienta y se enfría. (Srinivasan et al., 2020).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) señala que durante la impresión 3D, el calentamiento de termoplásticos puede generar emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y partículas ultrafinas, las cuales pueden representar riesgos para la salud si no se controlan adecuadamente (United States Environmental Protection Agency, 2024).

A pesar de estas consideraciones, el método FDM fue elegido en este proyecto por su accesibilidad, bajo costo de operación, facilidad de uso y disponibilidad de materiales adecuados, como PLA o PETG. Esta elección facilita evaluar la geometría y ensamblaje del molde mediante un proceso flexible, rápido y replicable, respaldando las decisiones de Diseño para Manufactura (DFM) y Diseño para Ensamble (DFA).

Además, el FDM permite que el prototipo impreso actúe como etapa previa a la manufactura definitiva mediante fresado CNC. Esta combinación secuencial de tecnologías responde a una lógica de manufactura híbrida, donde la adición y sustracción se integran de forma estratégica, contribuyendo a la construcción final de un componente resistente y funcional.

A continuación, se presentan las propiedades físicas y mecánicas de PLA y PETG utilizadas en este estudio, coherentes con los criterios aplicados en las simulaciones estructurales (sección 4.5):

Tabla 2.6 Propiedades mecánicas comparativas de PLA y PETG.

Material	Densidad (g/cm ³)	E (MPa)	ν	σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	σ_c (MPa)
PLA	1.24	3570	0.35	58.0	38.0	47.5
PETG	1.27	2350	0.38	61.4	40.0	50.0

Pie de tabla: El límite elástico σ_y fue estimado como el 65 % de la resistencia a tracción σ_t . El límite de compresión σ_c fue estimado multiplicando σ_y por 1.25. La densidad fue tomada de Khan et al. (2023) y el coeficiente de Poisson ν Part Manufacturing (2023). **Fuente:** Elaboración propia.

2.5.1.3 Prototipado rápido

El prototipado rápido (PR) es una estrategia dentro del diseño y desarrollo de productos que permite la creación física de modelos tridimensionales en fases tempranas, con el objetivo de validar la forma, funcionalidad y ensamblaje de componentes antes de su fabricación definitiva. Esta técnica se basa, en la mayoría de los casos, en el uso de tecnologías de manufactura aditiva, como la impresión 3D, debido a su capacidad para materializar diseños complejos de manera ágil y económica.

De acuerdo a Wong y Hernández (2012), el prototipado rápido es uno de los primeros procesos que surgieron dentro de la manufactura aditiva (MA). Este método permite manufacturar piezas impresas que no solo son modelos visuales, sino que pueden tener aplicaciones funcionales y como resultado, una mejora en el ciclo completo de desarrollo del producto. Baneshi et al. (2023) reportan el uso exitoso de moldes impresos en 3D para la fabricación precisa y eficiente de bloques de enclavamiento, permitiendo adaptar las geometrías según las cargas y restricciones del diseño estructural.

En la misma línea Zivanovic et al. (2020), señala que el prototipado rápido es una técnica que facilita la producción ágil de modelos físicos, prototipos funcionales y pequeñas series de piezas a partir de diseños creados en CAD. Por su parte, Chua et al. (2020) señalan que el PR abarca un conjunto de tecnologías en constante desarrollo que permiten la fabricación de objetos tridimensionales mediante la adición sucesiva de material, siguiendo un modelo digital previamente definido.

De acuerdo con Groover (2007, p. 794), la creación rápida de prototipos (RP) se aplica principalmente en tres áreas: diseño, análisis y planeación de ingeniería, y manufactura de herramientas y piezas. En el diseño, permite validar modelos físicos rápidamente, facilitar la visualización de geometrías y detectar errores tempranos. La planeación de ingeniería, los prototipos ayudan en pruebas aerodinámicas, análisis estructurales y planeación quirúrgica mediante modelos médicos. En manufactura de herramientas, la RP producir piezas finales en lotes pequeños, formas complejas o productos personalizados que serían irreproducibles con métodos tradicionales.

A continuación, se presentan las clasificaciones del prototipado rápido, considerando el método utilizado para la creación del prototipo, ya sea mediante técnicas de manufactura aditiva o manufactura sustractiva. Esta clasificación se aplicó en el desarrollo de prototipos a escala del molde para adocretos, con el fin de evaluar las tecnologías más adecuadas para su diseño (Figura 2.11).

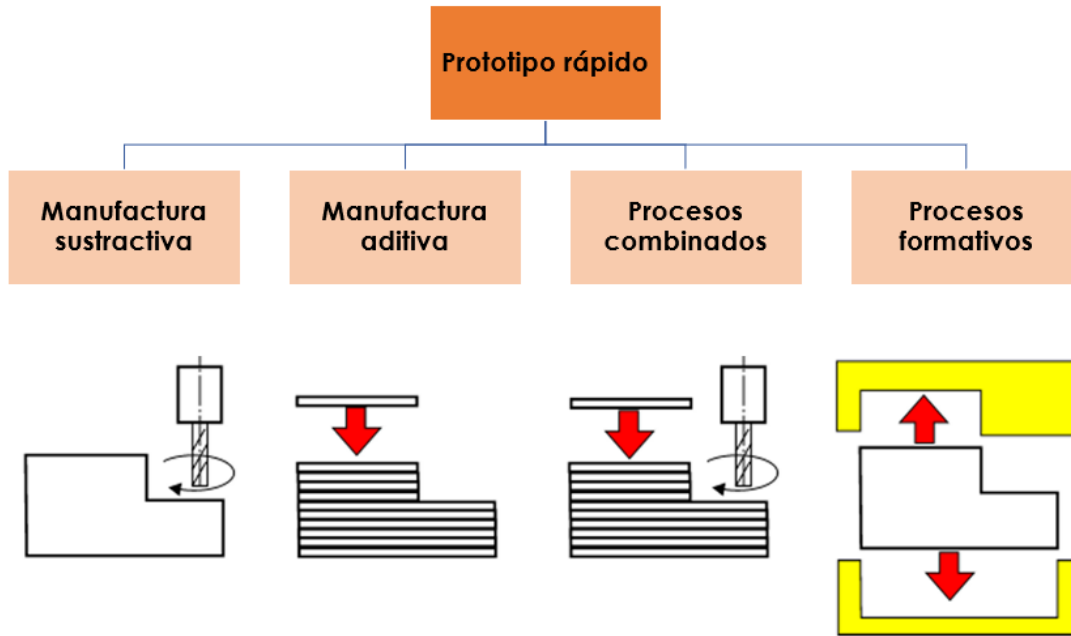


Figura 2.11 Clasificación básica del prototipado rápido. **Fuente:** Adaptado de Zivanovic et al., (2020).

Como es bien sabido a través del prototipado rápido, se pueden detectar errores en fases tempranas del desarrollo, optimizando tiempos y recursos en el proceso de diseño. Según Rasiya et al. (2021), el prototipado rápido se desarrolló con el propósito de apoyar a profesionales de distintas disciplinas en la creación de modelos físicos a pequeña escala para sus proyectos y estudios. En el área médica, representó un avance importante, ya que permitió a los especialistas construir modelos de huesos y órganos dañados para realizar pruebas y observar resultados de manera más precisa. De igual forma, arquitectos y artistas pudieron transformar sus ideas en modelos concretos, los cuales les servían para presentar propuestas a clientes y analizar su viabilidad en el mercado.

Con los avances en los materiales y en las tecnologías de manufactura, el uso del prototipado rápido se ha extendido a muchos otros campos.

En esta investigación, el prototipado rápido con tecnología FDM se utiliza para manufacturar un modelo funcional del molde para adocretos. Esta fase permite comprobar medidas, tolerancias y aspectos estructurales clave, apoyando los principios de Diseño para Manufactura (DFM) y Diseño para Ensamble (DFA).

Además, el prototipo impreso facilita una transición ordenada hacia procesos sustractivos como el fresado CNC, pensado como una etapa futura. Así, se plantea una solución híbrida, técnica y económicamente viable, dentro de un flujo de trabajo digital con herramientas CAD/CAM.

2.5.2 Manufactura sustractiva

La manufactura sustractiva tiene sus raíces en la antigüedad, cuando se empleaban técnicas básicas para moldear materiales con distintos fines. Con el tiempo, este enfoque evolucionó hasta convertirse en un proceso, en el que se retira material de un cuerpo sólido de mayor tamaño para obtener la forma deseada, generando residuos como virutas, partículas o polvo (Bhaskaran et al., 2024).

En este contexto, Le et al. (2024) señalan que la elección del proceso de mecanizado adecuado para un material es fundamental, ya que depende de diversos factores como el tipo de operación a realizar, las dimensiones y geometría de la pieza, la calidad de acabado

requerida, el nivel de precisión, la cantidad y variedad de piezas, el material de las mismas, la disponibilidad de maquinaria y herramientas adecuadas, la tecnología disponible, las prácticas actuales en la empresa, el plan de producción y el presupuesto.

A partir de estos elementos, puede entenderse la manufactura sustractiva como una transformación de materia prima para crear un producto final a través de la remoción de material para obtener el diseño técnico.

De acuerdo a Jayawardane et al. (2023), la tecnología CNC facilita obtener la exactitud dimensional y el acabado superficial necesarios en la fabricación moderna. Según Deboer et al. (2021), la manufactura sustractiva a pesar de sus beneficios, presentan limitaciones con respecto a la geometría de la pieza a manufacturar o a la complejidad de forma del molde requerido.

2.5.2.1 Tecnologías específicas

La remoción de material como técnica de manufactura se originó en la prehistoria, cuando los humanos tallaban madera y piedra para fabricar herramientas. De acuerdo a Yoon et al. (2014) el termino de corte o mecanizado, como un proceso de manufactura sustractiva, tuvo sus orígenes durante la Revolución Industrial, al construir la primera máquina de vapor, James Watt enfrentó dificultades al intentar perforar el cilindro, lo que impulso a John Wilkinson a crear la perforadora (1775). En la misma época el torno de tornillos de Maudsley (1800), a Eli Whitney se le atribuye la invención de la fresadora (1818). Estos avances permitieron manufacturar

componentes con mayor precisión. Aunque sus principios básicos se mantienen, el control numérico introducido en los años 50 dio paso a los modernos centros de maquinado, capaces de realizar múltiples operaciones de corte con alta eficiencia. (Groover, 2007, p. 506).

En la siguiente Figura 2.12, se presenta la clasificación general de los procesos de manufactura sustractiva o de remoción, los cuales se caracterizan por eliminar material de una pieza base para obtener la forma deseada. Esta clasificación permite comprender mejor las distintas tecnologías empleadas en esta categoría de manufactura.



Figura 2.12 Clasificación de los procesos de manufactura sustractiva o de remoción. **Fuente:** Adaptado de Groover (2007, p. 482).

Según Yoon et al. (2014), los procesos de mecanizado o sustractivos pueden clasificarse en diversas categorías y subcategorías, como se muestra a continuación.

CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	PROCESOS
Corte	Formas circulares	Torneado
		Mandrilado
		Taladrado
	Varias formas	Fresado
		Cepillado
		Conformado
		Brochado
		Tallado de engranajes
Abrasión	Abrasivos aglomerados	Rectificado
		Bruñido
		Superacabado
	Abrasivos sueltos	Pulido
		Abrillantado
		Lapeado
		Flujo abrasivo
Erosión (No tradicional)	Procesos de erosión	Mecanizado químico (CHM)
		Mecanizado electroquímico (ECM)
		Mecanizado por descarga eléctrica (EDM)

Figura 2.13 Categorías y subcategorías de los procesos de manufactura sustractiva. **Fuente:** Adaptado de Yoon et al. (2014).

En los procesos de manufactura sustractiva se emplea una amplia variedad de materiales, tales como metales duros y blandos, plásticos termoestables, acrílico, madera, distintos tipos de plásticos, espumas, materiales compuestos, vidrio y piedra (Dassault Systèmes, 2022). Según Powarsteam (2022), estos procesos se realizaban manualmente

mediante técnicas convencionales de fresado y torneado; con el tiempo, se incorporó el uso de máquinas controladas por computadora (CNC). En el contexto de la industria 4.0, las máquinas CNC han cobrado una mayor relevancia en la investigación científica. De acuerdo con Solís-Santamaría et al. (2023), el mecanizado CNC es un conjunto de máquinas herramientas automatizadas como el torno, la fresadora o la rectificadora, que realiza distintas operaciones mediante el control numérico por computadora (CNC). Una máquina herramienta busca reproducir piezas de tamaño específico, forma y detalles superficiales que otros métodos no pueden manufacturar con la precisión necesaria (Thyer, 2014, p. 3).

A continuación, se presentan algunas máquinas de torneado y fresado CNC, acompañadas de una descripción general de cada una. En la manufactura sustractiva se emplea una amplia variedad de máquinas y métodos de remoción de material mediante control numérico por computadora (CNC); sin embargo, para el presente estudio se destacan estos procesos debido a su viabilidad técnica para el diseño de moldes para adocretos.

Torneado CNC:

Según Donley (2024), las máquinas CNC giran la pieza sobre un eje principal mientras las herramientas de corte realizan remoción precisa de material. Los tornos CNC permiten manufacturar geometrías complejas y suelen integrarse con fresadoras. El torneado consiste en desplazar la herramienta contra la pieza rotativa para obtener

dimensiones cilíndricas internas y externas específicas. En general sirve para la elaboración de figuras en forma de ruedas y conos.



Figura 2.14 Torneado CNC. **Fuente:** Tomado de Donley, M (2024), Guía de mecanizado CNC, Setco.

Fresadora CNC:

De acuerdo a Harrisón (2024), las fresadoras CNC emplean una herramienta de corte giratoria montada en un husillo controlado que se desplaza en varios ejes (3, 5 o más) para retirar material. Distinguiendo dos tipos de fresadoras, verticales, donde la herramienta está perpendicular a la pieza, y horizontales, donde la herramienta es paralela. Este proceso resulta especialmente adecuado para la fabricación de la base estructural de acero del molde híbrido, donde se alojan los insertos poliméricos, debido a su capacidad para generar geometrías prismáticas, cavidades precisas y superficies adecuadas para su integración en entornos CAX.



Figura 2.15 Fresadora CNC. **Fuente:** Tomado de Shenzhen Dadesin Prototype Co., Ltd. (2023), Imagen del proceso de mecanizado CNC.

2.5.2.2 Fresado

El proceso de fresado es ampliamente utilizado en la industria y en talleres de manufactura para la obtención de piezas con geometrías y dimensiones precisas. El mecanizado mediante control numérico por computadora (CNC) representa un avance tecnológico significativo, ya que permite mejorar el acabado superficial, reducir el desgaste de herramientas, incrementar la velocidad de operación y realizar la remoción de material de forma eficiente (Meher et al., 2022).

Este proceso se lleva a cabo en centros de mecanizado, los cuales, según Thyer (2014), son máquinas multiejes (X, Y, Z, y en ocasiones A y B) capaces de realizar múltiples operaciones desde diferentes ángulos, lo que las distingue del torneado, limitado a piezas de revolución. De acuerdo con Braian et al. (2018), en una fresadora CNC, el material se elimina de forma controlada a partir de un sólido inicial, generando la geometría deseada conforme al modelo CAD.

Tradicionalmente, los moldes para adocretos han sido fabricados en herrerías mediante procesos manuales de corte y soldadura. No obstante, la incorporación de tecnologías CNC constituye una alternativa más precisa y eficiente. Entre los procesos disponibles, el fresado CNC resulta especialmente adecuado para la manufactura de la base estructural de acero del molde híbrido, en la cual se integran los insertos poliméricos, debido a su capacidad para producir cavidades, superficies de contacto y formas prismáticas con alta precisión dimensional, a diferencia del torneado, que se restringe a geometrías cilíndricas.

Esta versatilidad, particularmente cuando el fresado CNC se integra con CAX, convierte a este proceso en una opción técnicamente viable para el diseño y desarrollo conceptual de moldes para adocretos.

2.5.3 Manufactura híbrida

La manufactura híbrida (HM, por sus siglas en inglés) es una de las tendencias de evolución de las tecnologías de producción. Del cual integra procesos aditivos y sustractivos en la producción de un

componente, con el fin de aprovechar la uniformidad de la geométrica y la reducción de etapas propias de la manufactura aditiva, junto con la precisión dimensional y el acabado superficial de la manufactura sustractiva. Esta combinación genera beneficios técnicos y económicos. Estudios recientes muestran que hay un interés creciente en los sistemas híbridos especialmente en la manufactura de componentes funcionales y en aplicaciones de herramientas y moldes (Tabassum et al., 2024).

Según Nassehi et al. (2012), un proceso se considera híbrido cuando se utilizan múltiples tecnologías a lo largo de la secuencia de operaciones. De acuerdo con Sathish et al. (2022), la manufactura híbrida combina las ventajas de la manufactura sustractiva, que garantiza calidad superficial y precisión dimensional, con las de la manufactura aditiva, que permite la creación de geometrías complejas. Esta tecnología destaca por la restauración y manufactura innovadora, adapta un proceso y otro para facilitar la creación de diseños de alto rendimiento, considerado el primer método en combinar deposición y mecanizado en un mismo flujo automatizado.

A continuación, se describe brevemente este antecedente y su conexión con las prácticas híbridas actuales.

2.5.3.1 Manufactura por deposición de forma (*Shape Deposition Manufacturing, SDM*) como antecedente

El Shape Deposition Manufacturing (SDM) fue propuesto por Merz et al. (1994) en la Universidad Carnegie Mellon como un método pionero que alternaba la deposición de material y la remoción por

mecanizado dentro de un mismo ciclo de manufactura. El proceso refería depositar material (cerámico, metálico o polimérico) capa por capa y mecanizar selectivamente cada capa antes de añadir el siguiente, finalizando con piezas precisas, acabado confiable y con la posibilidad de integrar componentes internos o móviles. Esta metodología, aunque limitada por las capacidades tecnológicas de su época, introdujo el concepto clave de integración de procesos, que décadas después daría origen a los actuales sistemas híbridos aditivo-sustractivos. De acuerdo a Merz (1994), el SDM permitía producir piezas funcionales con cavidades internas y piezas ensambladas entre sí, eliminando el tiempo de elaboración.

Revisiones actuales han corroborado la relevancia de este enfoque. Weflen (2023) señala que el SDM dio inicio a los métodos híbridos al desarrollar la viabilidad de integrar deposición controlada y mecanizada en una misma etapa de elaboración. De manera similar Kincaid et al. (2023) muestran que la metodología SDM continua vigente en procesos donde el material es depositado por fricción para después ser mecanizado, desarrollando productos metálicos con resistencia estructural.

En síntesis, SDM constituye la base conceptual que permite entender el surgimiento de tecnologías híbridas actuales y proporciona el marco histórico para justificar la integración simultánea de impresión 3D y mecanizado en aplicaciones industriales y de prototipado.

2.5.3.2 Aplicación híbrida FDM más acero en moldes para adocretos

La integración de componentes impresos en FDM con elementos metálicos mecanizados se ha explorado en distintos ámbitos de manufactura para combinar geometrías complejas impresas en polímero con zonas estructurales metálicas. Si bien la literatura no reporta aplicaciones específicas orientadas a moldes para adocretos, los principios observados en estas configuraciones híbridas sugieren que la combinación FDM más acero puede resultar viable para reducir costos, optimizar geometrías y mantener la rigidez en zonas sometidas a carga. Este enfoque conceptual coincide con los principios generales de manufactura híbrida descritos por Weflen (2023).

La literatura reciente muestra que los sistemas híbridos material-proceso pueden mejorar significativamente el desempeño mecánico de los componentes. Por ejemplo, Kincaid et al. (2023) presentan un proceso híbrido donde la técnica Additive Friction Stir Deposition (AFSD) permite generar una geometría inicial en aluminio y, posteriormente, el mecanizado CNC define la precisión final del componente. Aunque AFSD no forma parte de la metodología de esta investigación, se incluye como referente conceptual porque demuestra cómo la integración de adición y sustracción puede mejorar la estabilidad dimensional y la eficiencia del proceso.

De manera similar, Carbas, Palmares y da Silva (2020) analizan laminados híbridos tipo Fibre Metal Laminates (FML), conformados por láminas delgadas de aluminio embebidas en compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP). Sus resultados muestran incrementos en la rigidez, la resistencia interlaminar y la reducción de la delaminación.

Aunque estos laminados no serán utilizados en el molde desarrollado en esta investigación, su comportamiento respalda la premisa de que combinar materiales metálicos y poliméricos puede mejorar la resistencia estructural y la durabilidad en condiciones de carga repetitiva.

En el contexto de esta investigación, la propuesta de integrar componentes impresos en FDM junto con elementos de acero busca aplicar estos principios de manufactura híbrida para desarrollar un molde modular, resistente y compatible con procesos de vibrocompresión. Aunque no se han documentado estudios específicos sobre moldes para adocretos manufacturados con FDM, la evidencia en la literatura sobre sistemas híbridos respalda la viabilidad técnica de combinar polímeros impresos y elementos metálicos para mejorar la rigidez, la estabilidad y el desempeño en aplicaciones industriales.

2.6 Moldes para adocretos

Los moldes para adocretos forman uno de los elementos más importantes en la producción de prefabricados de concreto, debido a que determinan la precisión geométrica, la uniformidad dimensional y el acabado superficial del producto final. A diferencia de lo expuesto en el apartado 2.2 —centrado en el adocreto como pieza— este apartado examina exclusivamente el molde como herramienta técnica de diseño y manufactura, así como las tecnologías actualmente empleadas para las tendencias de innovación.

En México, los adocretos poseen un papel fundamental en la industria de la construcción por su resistencia, versatilidad y eficiencia. En este proceso, el molde define la forma final de la pieza y garantiza la repetibilidad del producto. Un buen diseño inicial del molde permite asegurar uniformidad en las dimensiones, resistencia adecuada y calidad superficial.

La industria ha comenzado a incorporar nuevos materiales y tecnologías digitales para la fabricación de moldes, tales como moldes impresos en 3D mediante FDM, moldes poliméricos, moldes de fibra de vidrio, moldes modulares y modelos fabricados con materiales reciclados. Sin embargo, el interés de esta investigación se centra en el molde como objeto técnico fabricado por tecnologías CAX, evaluando su potencial mediante procesos aditivos, sustractivos e híbridos.

2.6.1 Moldes tradicionales para adocretos

Tradicionalmente, los moldes utilizados para la producción de adocretos han sido fabricados principalmente en materiales como acero, así como en otros materiales empleados en la industria de prefabricados, tales como poliestireno, arcilla o concreto, particularmente en la elaboración de elementos como bovedillas o bloques prefabricados. Estos moldes se caracterizan por su alta durabilidad y resistencia durante los procesos de producción.

No obstante, los métodos tradicionales de fabricación presentan diversas limitaciones, entre las que destacan:

- tiempos prolongados en su proceso de manufactura,
- limitada flexibilidad para realizar modificaciones en el diseño,
- costos elevados cuando se requieren moldes con geometrías personalizadas.

Estas restricciones han impulsado el interés por explorar alternativas tecnológicas que permitan desarrollar moldes con mayor rapidez, flexibilidad de diseño y capacidad de adaptación a requerimientos específicos de producción.

2.6.2 Moldes fabricados mediante manufactura aditiva (FDM)

La impresión 3D por modelado por deposición fundida (FDM) ha emergido como una opción eficaz para fabricar moldes de bajo costo, personalizables y con tiempos reducidos de producción. Este proceso permite crear prototipos y moldes a partir de un modelo digital, mediante deposición capa a capa de materiales como PLA, PETG o compuestos plásticos (Montoya & Flórez, 2022; Salazar Henao & Serna Pedreros, 2024).

Otras ventajas destacan:

- mayor velocidad de producción,
- reducción de mano de obra
- mejor control dimensional
- capacidad para fabricar geometrías complejas
- la posibilidad de automatización (Fajardo Roldan, 2022).

Aunque su uso industrial a gran escala para moldes de concreto aún está en desarrollo, su potencial para prototipado y series pequeñas es reconocido.

2.6.3 Tendencias en la manufactura digital de moldes

Con el avance de las tecnologías CAX, se han incorporado conocimientos como:

- simulación geométrica y estructural,
- optimización topológica,
- mecanizado CNC para acabado de precisión
- manufactura híbrida, que combina impresión 3D y fresado.

Estas herramientas permiten diseñar moldes más resistentes, precisos y adaptados a las condiciones reales de vibrado y compactación del concreto.

2.6.4 Estudios relevantes sobre moldes manufacturados mediante manufactura aditiva

Aunque la literatura no reporta aún investigaciones específicas sobre moldes para adocretos manufacturados mediante MA o procesos híbridos, sí existen estudios aplicables a procesos similares en los que se han evaluado moldes y componentes estructurales obtenidos mediante impresión 3D.

Según Baneshi et al. (2023) en un estudio experimental sobre el comportamiento de bloques de mampostería entrelazados, fabricados con moldes impresos en 3D utilizando PLA, un material elegido por su resistencia y facilidad de desmoldeo. Se evaluaron distintos diseños geométricos ensamblados en seco y con adhesivo, los

cuales fueron sometidos a pruebas de compresión, corte y flexión. Los resultados mostraron un desempeño estructural adecuado, dependiendo del tipo de bloque y las condiciones de ensamblaje. De manera complementaria, Buchanan et al. (2017) evaluaron columnas de acero inoxidable fabricadas mediante sinterizado directo de metal por láser (DMLS), concluyendo que su comportamiento mecánico era comparable al de componentes convencionales, excepto en configuraciones con paredes extremadamente delgadas. Ambos trabajos aportan evidencia sobre la viabilidad de las tecnologías aditivas para fabricar componentes funcionales sometidos a cargas mecánicas relevantes.

Por su parte a Altaf et al. (2018) en su trabajo, análisis del rendimiento de moldes de polímeros impresos en 3D mejorados para el proceso de moldeo por inyección de metal, los moldes para moldeo por inyección de metal (MIM). Tradicionalmente estos moldes se manufacturan en aluminio u otros metales mediante mecanizado, lo cual es adecuado para producción masiva, pero resulta costoso y lento cuando se requieren diseños personalizados. Como alternativa, este estudio analizará simulaciones de moldes de polímero impresos en 3D por FDM de material filamento PLA (Ácido Poliláctico) y PETG (Polietileno Tereftalato Glicol-modificado) y con base de acero A36, determinando que los moldes 3D pueden usarse con éxito en un número limitado de ciclos, siendo útiles para prototipos o producciones pequeñas.

En conjunto, estos estudios sugieren que los moldes impresos en 3D pueden constituir una alternativa viable para el desarrollo de moldes

para adocretos en etapas de diseño, validación o producción personalizada, permitiendo optimizar tiempos y costos en comparación con moldes metálicos convencionales. No obstante, para su integración en la industria del concreto, el molde debe cumplir requisitos técnicos como resistencia mecánica, estabilidad dimensional y compatibilidad con los procesos de vaciado, vibrado y fraguado del concreto.

El diseño debe contemplar la geometría interna del adocreto (trapezoidal, regular, tipo U u otras variantes), los ángulos de desmoldeo, los espesores de pared, la facilidad de limpieza y la reutilización (Baneshi et al., 2023). Asimismo, un molde funcional debe integrarse al sistema productivo considerando elementos como la entrada o sistema de alimentación que permita el flujo adecuado de la mezcla, el sistema de vibrado para la compactación del concreto y la banda transportadora utilizada para el manejo de las piezas. Estos criterios constituyen la base técnica para evaluar la pertinencia de emplear manufactura aditiva en el diseño y fabricación de moldes en la industria de prefabricados de concreto.

2.7 Tecnologías CAX

Las tecnologías CAX (Computer Aided Technologies) constituyen un conjunto de herramientas informáticas utilizadas para apoyar las diferentes etapas del desarrollo de productos en entornos industriales. Este término engloba diversas tecnologías asistidas por computadora, entre las que destacan el diseño asistido por computadora (CAD), la ingeniería asistida por computadora (CAE) y la manufactura asistida por computadora (CAM). La integración de estas herramientas

permite vincular el diseño, análisis, simulación y fabricación dentro de un entorno digital, facilitando el desarrollo de productos con mayor precisión, eficiencia y reducción de errores durante el proceso productivo.

Dentro de las tecnologías, la integración CAD/CAM constituye una de las aplicaciones más extendidas en la industria moderna. El CAD (Computer-Aided Design) o Diseño Asistido por Computadora se refiere al uso de software para crear diseños, planos y modelos en 2D o 3D (Martínez González & Gaviño Ortiz, 2024). Estas herramientas permiten la creación y representación de piezas de manera precisa, también ayuda a simular el comportamiento físico de las piezas como resistencia estructural, comportamiento de materiales y tolerancias dimensionales.

El uso de sistemas CAD facilita el desarrollo de modelos digitales que posteriormente pueden ser utilizados en procesos de análisis o fabricación. Entre los programas más utilizados en entornos industriales se encuentran AutoCAD, SolidWorks, CATIA y Fusion 360, los cuales permiten desarrollar modelos tridimensionales detallados y realizar modificaciones de diseño de manera rápida y eficiente.

Por su parte, CAM (Computer-Aided Manufacturing) o Manufactura Asistida por Computadora utiliza los modelos generados en CAD para planificar, gestionar y automatizar procesos de fabricación (Castro Castaneda, 2019; Chaparro Chaparro & Martínez Simbaqueba, 2023). A través de esta tecnología es posible traducir los diseños digitales en instrucciones que pueden ser interpretadas por equipos de

manufactura automatizados, como máquinas de control numérico computarizado (CNC), sistemas de corte láser, procesos de fresado o tecnologías de manufactura aditiva como la impresión 3D.

Entre las principales ventajas de los sistemas CAM se encuentran la optimización del tiempo de producción, el uso más eficiente de los materiales, la posibilidad de simular procesos de mecanizado antes de su ejecución y la reducción de errores humanos durante la fabricación. Algunos ejemplos de software utilizados para estas aplicaciones incluyen Mastercam, PowerMill, EdgeCAM y Fusion 360, este último integrando funciones tanto de CAD como de CAM.

La relación entre CAD y CAM se basa en un flujo digital de información que permite integrar las etapas de diseño y manufactura. De manera general, este proceso puede describirse en cuatro etapas principales:

1. Diseño en CAD: se crea el modelo digital de la pieza o producto.
2. Transferencia al sistema CAM: el modelo CAD se exporta al software de manufactura.
3. Programación del proceso de fabricación: se definen herramientas, trayectorias y estrategias de mecanizado.
4. Producción automatizada: la maquinaria ejecuta el proceso con base en las instrucciones generadas por el sistema CAM.

En este contexto, Titu y Pop (2024) señalan que la industria está incorporando rápidamente los sistemas CAD y CAM, transformando significativamente la forma en que se diseñan y fabrican los productos. Estas tecnologías han contribuido a mejorar la precisión, reducir los tiempos de desarrollo y aumentar la eficiencia de los procesos

productivos en diversos sectores industriales, incluyendo la construcción.

Asimismo, Díaz-Perete et al. (2020) proponen un procedimiento para la caracterización de modelos arquitectónicos en entornos BIM (Building Information Modeling) fabricados mediante tecnologías de impresión 3D por deposición de material fundido (FDM). Este estudio evidencia la relación entre las tecnologías BIM y la manufactura aditiva, permitiendo mejorar la coordinación y control en la producción de componentes constructivos. En este sentido, la aplicación de estas tecnologías puede resultar especialmente útil en el diseño y fabricación de moldes para adocretos, ya que facilita la personalización geométrica, la optimización del diseño y la integración con procesos de manufactura digital.

En el contexto de esta investigación, las tecnologías CAX permiten integrar herramientas de modelado CAD, simulación estructural mediante el método de elementos finitos y procesos de manufactura digital, facilitando el diseño y desarrollo de moldes personalizados para adocretos.

2.8 Transición e integración de CAX hacia el diseño asistido en la manufactura de moldes para adocretos

Según Wong y Hernández (2012), en los procesos de fabricación aditiva, el modelo diseñado en un software CAD se transforma a un archivo estereolitografía (STL), que representa la geometría mediante una malla de triángulos. Este archivo luego se procesa dividiéndolo en

capas, con la información necesaria para que cada una sea impresa de forma secuencial durante la manufactura.

En la Figura 2.16 se presenta el flujo general del proceso de impresión 3D, el cual integra herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) y manufactura asistida por computadora (CAM), aplicado al desarrollo de prototipos como los moldes para adocretos.

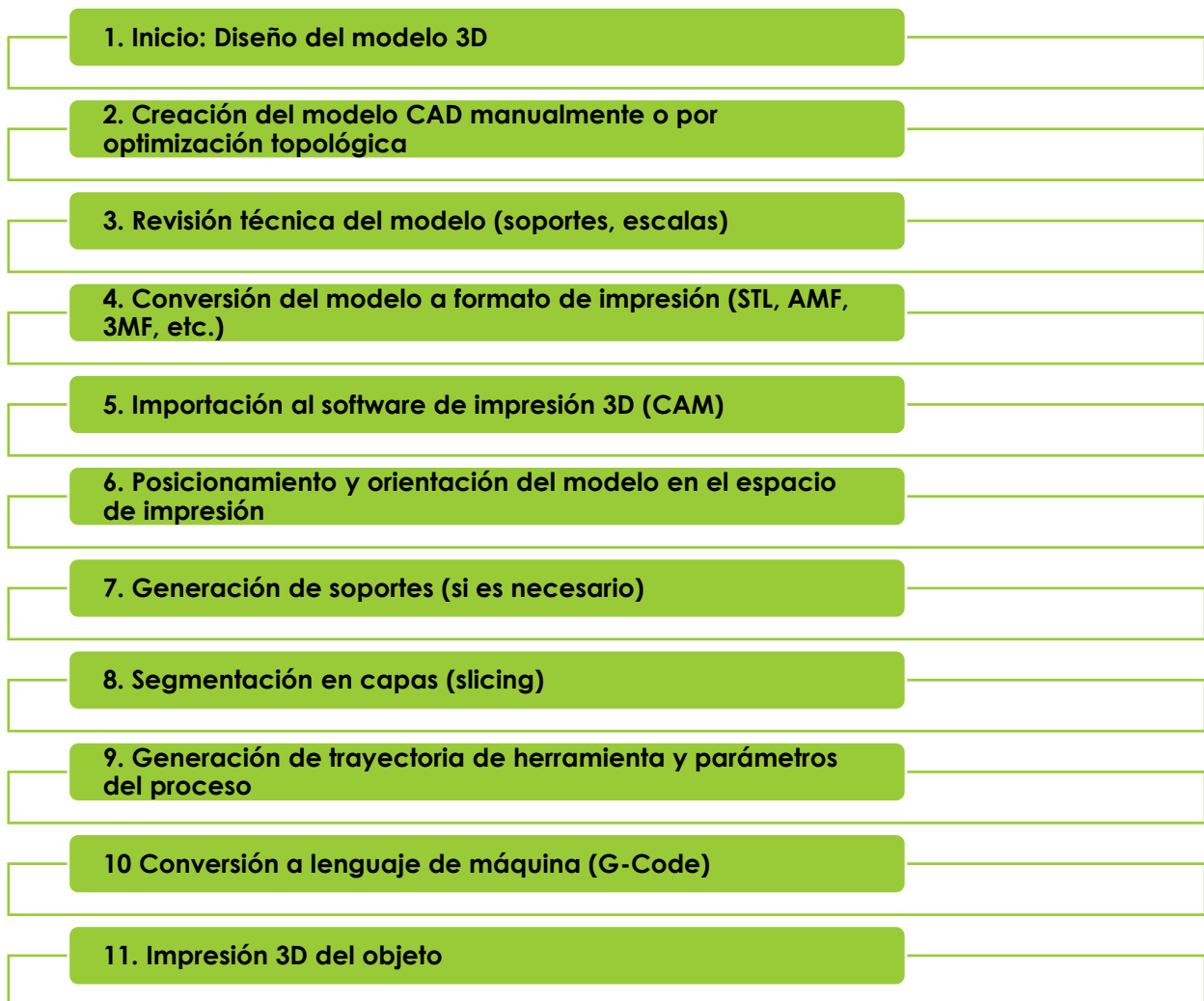


Figura 2.16 Flujo del proceso de impresión 3D integrado con tecnologías CAD/CAM. **Fuente:** Elaboración propia con base en Zivanovic et al. (2020).

Al separar el análisis del molde de la forma y resistencia del adocreto, se privilegia la optimización del diseño del molde en términos de:

- Durabilidad del material.
- Compatibilidad con CAX.
- Viabilidad de manufactura digital (aditiva y sustractiva).
- Precisión geométrica del molde y facilidad de réplica.

El uso de manufactura aditiva (impresión 3D) permite la construcción de moldes con geometrías complejas y detalles finos sin necesidad de herramientas intermedias. Esta tecnología se emplea especialmente en fases de prototipado o para producciones de bajo volumen. En cambio, la manufactura sustractiva (como el mecanizado CNC) es ideal para moldes finales con mayores requerimientos mecánicos y tolerancias más estrictas.

Finalmente, las tecnologías CAX contribuyen a mejorar la precisión y calidad en los procesos de manufactura (Carrasco García, 2006). En este trabajo se plantea un esquema complementario en el que el molde se diseña y valida conceptualmente mediante manufactura aditiva para la verificación geométrica, considerando la manufactura sustractiva como una etapa posterior para asegurar su resistencia y durabilidad.

A partir de este marco teórico, en el siguiente capítulo se presenta la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA (PARÁMETROS)

La metodología constituye el eje central que guía el desarrollo de la presente investigación, ya que permite establecer de manera ordenada y sistemática los pasos necesarios para alcanzar los objetivos planteados. En este capítulo se describe el tipo, nivel y diseño de la investigación, así como la población de estudio, las variables consideradas, los instrumentos de medición, el tamaño de la muestra y los procedimientos empleados para la recolección y experimentación de los datos.

El presente trabajo se enmarca dentro de la metodología de la investigación de intervención, entendida como un proceso estructurado que no solo busca describir y analizar una problemática, sino también proponer e implementar soluciones aplicables en un contexto real (Pacheco Espejel & Cruz Estrada, 2014). Dicha metodología se organiza en cinco fases principales: objetivo, análisis, síntesis, praxis y conclusiones, las cuales permiten avanzar desde el planteamiento del problema hasta la aplicación y validación de la propuesta.

La Figura 3.1 presenta el esquema metodológico que orienta el desarrollo de esta investigación, mostrando la secuencia lógica seguida desde la identificación del problema hasta la aplicación de la propuesta de moldes diseñados mediante CAX.

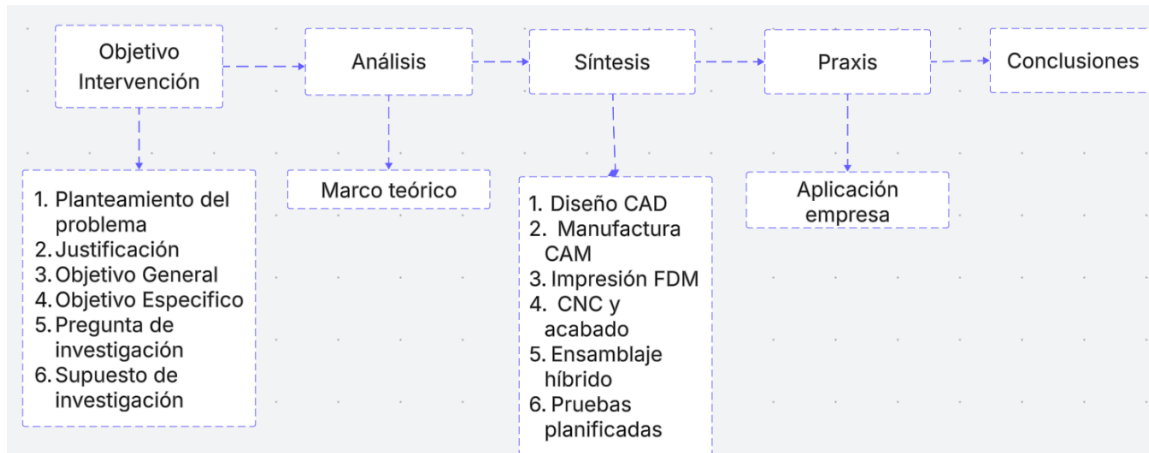


Figura 3.1 Esquema metodológico de la investigación de intervención.
Fuente: elaboración propia con base en (Pacheco Espejel & Cruz Estrada, 2014).

3.1 Tipo de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, al integrar métodos cuantitativos y cualitativos de análisis. El enfoque cuantitativo se emplea para evaluar el desempeño mecánico de los moldes propuestos mediante simulaciones numéricas con el método de elementos finitos (FEA), implementadas en el software SolidWorks Simulation. Por su parte, el enfoque cualitativo se utiliza para analizar los procesos de diseño, la viabilidad tecnológica y la percepción del uso de tecnologías asistidas por computadora en la industria de prefabricados de concreto, a partir de información recabada tanto en la empresa objeto de estudio como en otras empresas del sector que emplean moldes para adocretos.

La investigación es de tipo aplicada, ya que no se limita a la generación de conocimiento teórico, sino que busca proponer y evaluar soluciones prácticas orientadas a mejorar los procesos de diseño y manufactura de moldes en un contexto industrial real.

Asimismo, el estudio se enmarca dentro de la metodología de investigación de intervención, siguiendo las fases de objetivo, análisis, síntesis, praxis y conclusiones, lo que permite diagnosticar la problemática existente, desarrollar una propuesta de diseño mediante tecnologías CAX y validar su viabilidad técnica a través de simulaciones estructurales.

3.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación del presente estudio es exploratorio, descriptivo y experimental:

Exploratorio, debido a que se recopiló información mediante encuestas aplicadas a empresas que fabrican adocretos, con el fin de conocer aspectos como la vida útil, los tiempos de adquisición y las prácticas actuales relacionadas con el uso de moldes, lo cual permitió establecer parámetros comparativos para el desarrollo de la propuesta.

Descriptivo, ya que se caracterizan los elementos y procesos involucrados en el diseño y manufactura de moldes, así como los materiales empleados (PLA y PETG) y las configuraciones geométricas analizadas.

Experimental, dado que se realizaron simulaciones numéricas en SolidWorks mediante el método de elementos finitos, con el propósito de analizar el comportamiento estructural de los insertos fabricados en PLA y PETG bajo condiciones de carga representativas del proceso de compactación, evaluando el esfuerzo equivalente de von Mises y el factor de seguridad.

Este nivel metodológico permitió integrar el análisis teórico con la intervención práctica, asegurando la generación de prototipos funcionales y soluciones técnicamente viables en un contexto industrial real.

3.3 Diseño de la investigación

El diseño es experimental y de desarrollo tecnológico, ya que se centra en la creación, simulación y evaluación de prototipos de moldes mediante el uso de las CAX e impresión 3D.

La experimentación se desarrolla en dos niveles:

1. Prototipos impresos a escala, con el propósito de validar la geometría, los ensamblajes y los ajustes preliminares del diseño del molde.
2. Simulación computacional, mediante simulaciones por elemento finito (MEF) realizadas en el software SolidWorks Simulation (Dassault Systèmes, 2023), para evaluar la resistencia estructural y el desempeño comparativo de los materiales PLA y PETG como insertos poliméricos en los moldes propuestos.

3.4 Población

La población de estudio de la presente investigación está constituida por dos componentes principales:

1. **Los procesos y recursos internos de la empresa ubicada en Mineral del Chico, Hidalgo**, dedicada a la fabricación de prefabricados de concreto, específicamente bovedillas. Aunque actualmente la empresa no cuenta con moldes para adocretos ni con un área formal de diseño y manufactura de moldes, el estudio se fundamenta en el análisis de sus procesos productivos, capacidades técnicas y recursos tecnológicos disponibles. Esta información sirve como base para el diseño y manufactura autónoma de prototipos funcionales de moldes para adocretos propuestos en esta investigación.
2. **Empresas externas dedicadas a la producción de adocretos**, seleccionadas con fines comparativos, de las cuales se recopiló información relacionada con:
 - Vida útil de los moldes empleados,
 - Tiempo requerido para la adquisición de moldes,
 - Costos aproximados de adquisición.

La información obtenida de estas empresas permite contextualizar las prácticas actuales de manufactura de moldes y establecer parámetros de referencia para evaluar la viabilidad técnica de la propuesta basada en manufactura aditiva e híbrida.

3.5 Ubicación del objeto de estudio

El objeto de estudio se localiza en la empresa **Industriales en Bloques de Concreto**, ubicada en Paseo Africano, colonia Benito Juárez, código postal 42127, en Mineral del Chico, Hidalgo.

A partir del análisis de los procesos productivos empleados en la fabricación de bovedillas, se propone el diseño y manufactura de un molde para adocretos, considerando los recursos tecnológicos disponibles en la empresa. Dado que no existe un área específica destinada al diseño y manufactura de moldes para adocretos, el desarrollo del diseño y la fabricación de los prototipos se llevó a cabo como parte integral de esta investigación.

Esta situación permitió la observación directa de los procesos existentes, así como la aplicación práctica de los prototipos diseñados, facilitando la evaluación de la propuesta en un contexto real y alineado con las condiciones operativas de la empresa.

3.6 Variables

Las variables del presente estudio se definieron con el propósito de analizar el comportamiento estructural del prototipo de molde híbrido desarrollado mediante CAX e impresión 3D, así como de evaluar la influencia del material del inserto y de la configuración geométrica del molde bajo condiciones de carga representativas del proceso de compactación del adocreto.

Las variables se clasifican en variables dependientes, variables independientes y variables de control, de acuerdo con su función dentro del análisis experimental y numérico realizado.

3.6.1 Dependientes

Las variables dependientes corresponden a los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas realizadas mediante el método de elementos finitos, y permiten evaluar la respuesta mecánica del molde bajo las condiciones de carga definidas.

Las variables dependientes consideradas en este estudio son:

Variables dependientes:

- Esfuerzo equivalente de von Mises
- Factor de seguridad
- Distribución de esfuerzos y localización de zonas críticas

Los resultados correspondientes al desplazamiento total y a la deformación unitaria se emplearon únicamente como información complementaria y se presentan en los anexos, sin constituir criterios primarios de evaluación estructural.

3.6.2 Variables independientes

Las variables independientes corresponden a los factores que se modifican o comparan durante la investigación con el fin de analizar su influencia sobre el comportamiento estructural del molde.

Variables independientes:

- Material del inserto polimérico
- Configuración geométrica de la cavidad del molde,
- Tecnología de diseño y manufactura

3.6.3 Variables contextuales (de diagnóstico mediante encuestas)

Las variables contextuales se obtuvieron a partir de encuestas aplicadas a empresas dedicadas a la fabricación de prefabricados de concreto, con un enfoque exploratorio y por conveniencia. Su propósito fue identificar tendencias generales relacionadas con el uso de moldes, el nivel de adopción de tecnologías CAD/CAM y las principales limitaciones de los procesos de diseño y manufactura empleados actualmente en el sector.

Variables contextuales analizadas:

- Uso de herramientas de diseño CAD.
- Nivel de integración de tecnologías CAD/CAM.
- Tipo de molde utilizado actualmente.
- Frecuencia de reemplazo y vida útil promedio de los moldes.
- Tiempo promedio de adquisición de moldes.
- Costo aproximado de adquisición del molde.
- Interés en la adopción de moldes híbridos (acero-polímero).
- Nivel de personalización de moldes.
- Impacto percibido del molde en la productividad.
- Principales beneficios percibidos del uso de moldes tecnológicos.
- Principales limitaciones de los moldes convencionales.

Estas variables permitieron contextualizar la problemática abordada en la investigación y respaldar la pertinencia de la propuesta de diseño y manufactura de moldes híbridos mediante tecnologías asistidas por computadora.

3.6.4 Variables de control

Son aquellas condiciones que permanecen constantes durante el desarrollo de las simulaciones numéricas, con el fin de garantizar la validez y comparabilidad de los resultados obtenidos entre los distintos materiales y configuraciones geométricas analizadas.

Las variables de control consideradas en este estudio son:

- Base estructural del molde
- Condiciones de carga,
- Condiciones de frontera y restricciones constantes,
- Parámetros del análisis numérico,

3.7 Descripción de las variables

3.7.1 Conceptual

Variables dependientes:

Esfuerzo equivalente de von Mises, utilizado como criterio principal para evaluar el estado tensional del inserto polimérico y verificar que el material se mantenga dentro del régimen elástico.

Factor de seguridad mínimo, empleado para determinar el margen de seguridad estructural del diseño frente a la carga de compactación aplicada.

Distribución de esfuerzos y localización de zonas críticas, asociadas a la geometría de la cavidad del molde y a las transiciones geométricas del diseño.

Variables independientes:

Material del inserto polimérico, evaluado en dos configuraciones:

- Inserto impreso en PLA (ácido poliláctico).
- Inserto impreso en PETG (polietileno tereftalato glicol).

En ambos casos, los insertos se acoplan a una base estructural de acero, la cual permanece constante en todas las simulaciones.

Configuración geométrica de la cavidad del molde, considerando tres diseños representativos:

- Geometría circular.
- Geometría cuadrada.
- Geometría hexagonal.

Tecnología de diseño y manufactura empleada, basada en el uso de herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), simulación estructural (CAE) y manufactura aditiva mediante impresión 3D por deposición fundida (FDM) para la fabricación de los insertos del molde.

Variables contextuales (de diagnóstico mediante encuestas)

Uso de herramientas de diseño CAD: Nivel de utilización de programas CAD 3D en el diseño de moldes o prefabricados.

Nivel de integración de las CAX en los procesos productivos: Grado en que las empresas aplican procesos automatizados desde el diseño hasta la manufactura.

Tipo de molde utilizado: Clasificación del molde según el material y su proceso de fabricación (acero, plástico, híbrido, etc.).

Frecuencia de reemplazo y vida útil promedio de los moldes: Periodo promedio en meses o años en que se sustituyen los moldes utilizados.

Costo aproximado de adquisición del molde: Inversión económica estimada en la adquisición o fabricación de un molde.

Tiempo promedio de adquisición de moldes: Duración del proceso de obtención o fabricación de un molde (en meses).

Interés en la adopción de moldes híbridos (acero-polímero): Nivel de disposición de las empresas para adoptar moldes combinados de acero y material impreso.

Nivel de personalización de los moldes: Grado de adaptación de los moldes a diseños o necesidades específicas del cliente.

Impacto percibido del molde en la productividad: Percepción sobre cómo los moldes influyen en la eficiencia y rendimiento del proceso productivo.

Principales beneficios percibidos del uso de moldes tecnológicos: Ventaja más destacada que las empresas asocian al uso de moldes tecnológicos (durabilidad, precisión, costo, etc.).

Principales limitaciones percibidas de los moldes convencionales:

Restricción más relevante identificada en el uso de los moldes actuales (costo, tiempo, mantenimiento, etc.).

Variables de control:

Base estructural del molde, modelada en acero, con propiedades mecánicas constantes en todos los modelos.

Condiciones de carga aplicadas, definidas como una presión uniforme de 0.37 MPa sobre la superficie activa de la cavidad.

Condiciones de frontera y restricciones, aplicadas de manera uniforme en todos los casos simulados, representando el apoyo fijo de la base del molde durante el proceso de compactación.

Parámetros del análisis numérico, considerando un estudio estático lineal en el entorno de SolidWorks Simulation.

Propiedades mecánicas del acero, mantenidas constantes para todos los modelos evaluados.

3.7.2 Operacional

La operacionalización de las variables permite establecer la forma en que cada variable es medida, observada o categorizada dentro del desarrollo de la investigación. En la Tabla 3.1 se presentan las variables dependientes, independientes, contextuales y de control, indicando su definición operativa, indicadores y unidades de medida, de acuerdo con el análisis estructural por elementos finitos y el diagnóstico empresarial realizado.

Tabla 3.1 Operacionalización de las variables.

Tipo de variable	Variable	Definición operativa	Indicador	Unidad de medida / Escala
Dependiente	Esfuerzo equivalente de von Mises	Esfuerzo máximo generado en el inserto del molde bajo la presión de compactación simulada.	σ von Mises máximo	MPa
Dependiente	Factor de seguridad	Relación entre el límite de resistencia del material y el esfuerzo aplicado durante la simulación.	FDS mínimo	Adimensional
Dependiente	Distribución de esfuerzos y zonas críticas	Localización de regiones con mayor concentración de esfuerzos dentro del inserto del molde.	Mapa de esfuerzos	Cualitativa (visual)
Independiente	Material del inserto polimérico	Tipo de polímero utilizado para fabricar el inserto intercambiable del molde.	PLA / PETG	Categórica
Independiente	Configuración geométrica de la cavidad del molde	Forma geométrica de la cavidad que define el diseño del adocreto.	Circular, cuadrada, hexagonal	Categórica
Independiente	Tecnología de diseño y manufactura	Herramientas empleadas para el diseño	CAD/CAM y FDM	Categórica

Tipo de variable	Variable	Definición operativa	Indicador	Unidad de medida / Escala
Contextual	Uso de herramientas de diseño CAD	Nivel de utilización de software CAD en las empresas encuestadas.	Escala ordinal	Bajo, medio y Alto
Contextual	Nivel de integración de las CAX	Grado de automatización del proceso desde el diseño hasta la manufactura.	Escala ordinal	Bajo, medio y Alto
Contextual	Tipo de molde utilizado actualmente	Material predominante en los moldes empleados por las empresas.	Acero, plástico e Híbrido	Nominal
Contextual	Frecuencia de reemplazo y vida útil del molde	Periodicidad con la que los moldes son sustituidos por desgaste o falla.	Promedio reportado	Meses / Años
Contextual	Tiempo promedio de adquisición del molde	Tiempo requerido para obtener o fabricar un molde nuevo.	Promedio reportado	Meses
Contextual	Costo aproximado de adquisición del molde	Inversión económica estimada para la adquisición del molde.	Valor aproximado	\$ MXN
Contextual	Interés en la adopción de moldes híbridos	Disposición de las empresas para implementar moldes acero-polímero.	Escala ordinal	Bajo, medio y Alto

Tipo de variable	Variable	Definición operativa	Indicador	Unidad de medida / Escala
Contextual	Nivel de personalización de moldes	Capacidad del molde para adaptarse a diseños específicos del cliente.	Escala ordinal	Bajo, medio y Alto
Contextual	Impacto percibido del molde en la productividad	Influencia del molde en la eficiencia del proceso productivo.	Escala ordinal	Bajo, medio y Alto
Contextual	Beneficios percibidos del uso de moldes tecnológicos	Ventaja principal asociada al uso de tecnologías CAD/CAM e impresión 3D.	Categoría	Cualitativa
Contextual	Limitaciones de los moldes convencionales	Restricciones principales identificadas en los moldes tradicionales.	Categoría	Cualitativa
Control	Base estructural del molde	Elemento de soporte del sistema, modelado en acero A36.	Constante	—
Control	Condiciones de carga	Presión aplicada durante la simulación numérica.	0.37 MPa	MPa
Control	Condiciones de frontera y restricciones	Restricciones de desplazamiento aplicadas al modelo en todas las simulaciones.	Constante	—

Tipo de variable	Variable	Definición operativa	Indicador	Unidad de medida / Escala
Control	Parámetros del análisis numérico	Tipo de estudio y configuración del solver en SolidWorks Simulation.	Estático lineal	—

Fuente: elaboración propia (2025).

3.8 Instrumento de medición

El instrumento principal para la recolección de información externa en esta investigación fue un cuestionario estructurado, aplicado a empresas dedicadas a la fabricación de prefabricados de concreto, específicamente productores de adocretos. El objetivo del instrumento fue recabar información relacionada con el uso actual de moldes, tiempos de adquisición, vida útil, costos aproximados y nivel de adopción de las CAX, así como identificar el interés en la implementación de moldes híbridos y personalizados.

El cuestionario se diseñó con base en los objetivos del estudio y las variables definidas en el apartado metodológico.

Estuvo conformado principalmente por preguntas cerradas de opción múltiple y escala ordinal, complementadas con algunas preguntas abiertas para obtener percepciones generales. Su selección respondió a criterios de conveniencia y pertinencia, considerando el carácter exploratorio del diagnóstico y el tamaño reducido de la muestra.

El instrumento se estructuró en las siguientes secciones:

- **Datos generales de la empresa**, que incluyen información básica como ubicación, tipo de producto prefabricado y tiempo de operación en el sector.
- **Uso de moldes para adocretos**, donde se indaga el tipo de molde utilizado, frecuencia de reemplazo, vida útil promedio y principales problemáticas asociadas a su uso.
- **Tiempo y costo de adquisición**, orientada a estimar de manera aproximada los periodos requeridos para obtener moldes y los rangos de inversión asociados.
- **Adopción tecnológica y personalización**, enfocada en el uso de herramientas CAD, nivel de integración CAX, interés en moldes híbridos (acero-polímero), grado de personalización de los moldes y beneficios o limitaciones percibidas de los moldes convencionales.

El cuestionario aplicado se presenta íntegramente en el **Anexo A** correspondiente, y constituyó el instrumento formal para el diagnóstico del contexto productivo y tecnológico del sector analizado.

Como complemento al diagnóstico, en la fase experimental de la investigación se emplearon herramientas de simulación numérica como instrumento de medición del comportamiento mecánico del prototipo propuesto.

En particular, se utilizó el software SolidWorks Simulation, mediante análisis estático lineal por el método de elementos finitos (MEF), para evaluar el esfuerzo equivalente de von Mises y el factor de seguridad

de los insertos poliméricos (PLA y PETG) integrados a una base estructural de acero.

Adicionalmente, se realizaron impresiones 3D de prototipos a escala, cuya función fue validar la geometría, los ensambles y la compatibilidad dimensional del diseño antes de su evaluación numérica.

Estas impresiones no se emplearon como instrumento de medición mecánica directa, sino como apoyo para la verificación del diseño y la manufactura del prototipo.

3.9 Determinación del tamaño de la muestra

El enfoque aplicado y exploratorio de la presente investigación responde a criterios técnicos, de factibilidad y pertinencia, acordes con los objetivos del estudio.

En la fase experimental, la muestra estuvo constituida por los modelos geométricos de moldes híbridos desarrollados y evaluados mediante simulación numérica. Se consideraron dos configuraciones principales de material para el inserto polimérico:

- Configuración 1: Base estructural de acero con inserto fabricado en PLA.
- Configuración 2: Base estructural de acero con inserto fabricado en PETG.

Para cada configuración de material se analizaron cinco geometrías distintas de cavidad, lo que dio lugar a un total de diez modelos simulados.

Las simulaciones se realizaron bajo condiciones de carga y restricciones constantes, previamente definidas, con el fin de garantizar la comparación de los resultados y evaluar de manera directa la influencia del material del inserto y de la geometría del molde en su comportamiento estructural.

En la fase de diagnóstico empresarial, la muestra estuvo conformada por cinco empresas productoras de adocretos, seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a la disponibilidad de información y al carácter exploratorio del estudio.

Este tamaño de muestra permitió identificar tendencias generales relacionadas con el uso de moldes, tiempos de adquisición, costos aproximados y nivel de adopción de las CAX en el sector de prefabricados de concreto.

El cuestionario aplicado a las empresas productoras de adocretos se presenta en el Anexo A, y constituyó el instrumento de recolección de información externa utilizado para complementar el análisis técnico y contextualizar la propuesta de diseño y manufactura desarrollada en esta investigación.

3.10 Recolección y experimentación de datos

La recolección y experimentación de datos se desarrolló de manera secuencial, integrando una fase de diagnóstico externo y una fase experimental basada en simulación numérica. En la primera fase se aplicó un cuestionario estructurado a empresas productoras de adocretos con el fin de obtener información sobre el uso de moldes, tiempos y costos de adquisición, vida útil, nivel de adopción de tecnologías CAX y grado de personalización de los productos. Los datos fueron organizados y analizados mediante herramientas informáticas para identificar tendencias del sector y establecer criterios de diseño para el prototipo.

Con base en esta información, se desarrollaron los modelos geométricos del molde híbrido mediante diseño asistido por computadora (CAD), los cuales fueron evaluados mediante simulación numérica por el método de elementos finitos (MEF) utilizando SolidWorks Simulation bajo un análisis estático lineal. A cada modelo se le asignaron las propiedades mecánicas de los materiales evaluados y se aplicaron condiciones de carga representativas del proceso de compactación del adocreto.

Las simulaciones permitieron obtener los valores de esfuerzo equivalente de von Mises y factor de seguridad, utilizados para analizar comparativamente el comportamiento estructural de las configuraciones geométricas y materiales. Los resultados se interpretaron y contrastaron con el diagnóstico empresarial, respaldando la propuesta de diseño y manufactura de la investigación.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS, EXPERIMENTACIÓN Y PROPUESTA

4.1 Resultados del diagnóstico empresarial

Para el diagnóstico empresarial de las 5 empresas analizadas se seleccionaron las variables: **uso de las tecnologías CAD con impresión 3D, uso de las CAX, interés en moldes híbridos, moldes personalizados, tipo de molde, frecuencia de reemplazo y vida útil**, por considerarse las más relevantes para los objetivos de la investigación. La selección respondió a criterios de pertinencia y relevancia, dado que el estudio tiene un **enfoque exploratorio y comparativo**, orientado a identificar tendencias generales que sirvan de base para el **diseño del prototipo y las simulaciones posteriores**.

Para el análisis y evaluación de la información se utilizaron los programas informáticos Microsoft Excel y IBM SPSS Statistics, los cuales permitieron organizar, tabular y generar gráficos descriptivos de cada variable (IBM, 2025; Microsoft, 2025).

A continuación, se explica cada una:

Tabla 4.1 Nivel de uso de diseño CAD en 3D.

Nivel de uso de diseño CAD en 3D.

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido	Medio	2	40.0	40.0	40.0
	Alto	3	60.0	60.0	100.0
	Total	5	100.0	100.0	

Fuente: elaboración propia, 2025.

Los resultados muestran que el 60% de las empresas utiliza un nivel alto de diseño CAD en 3D, mientras que el 40% restante presenta un nivel medio.

Esto muestra un grado significativo de adopción de herramientas digitales en el diseño de moldes, lo que contribuye a una mayor precisión en los procesos y a una reducción de errores en la fase de diseño.

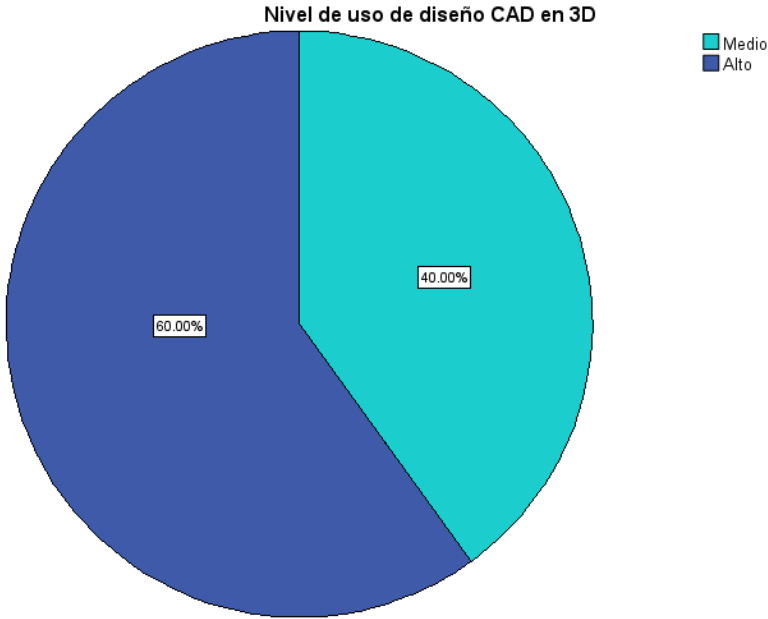


Figura 4.1 Nivel de uso de diseño CAD en 3D. **Fuente:** elaboración propia con base en datos obtenidos del estudio (2025).

La tendencia observada confirma que las empresas de prefabricados analizadas han integrado de manera importante el modelado 3D en sus procesos productivos, lo cual señala una base sólida para la adopción de tecnologías CAD/CAM en el desarrollo de moldes innovadores.

Tabla 4.2 Interés en implementar moldes híbridos (plástico-acero).

Interés en implementar moldes híbridos (plástico-acero).

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido	Sí	4	80.0	80.0	80.0
	No	1	20.0	20.0	100.0
	Total	5	100.0	100.0	

Fuente: elaboración propia, (2025).

El 80% de las empresas manifestó interés en incorporar moldes híbridos (plástico-acero) en sus procesos productivos, mientras que un 20% no considera actualmente su implementación.

Este resultado refleja una **disposición favorable hacia la innovación tecnológica** y una búsqueda activa de soluciones que optimicen la fabricación y el mantenimiento de moldes.

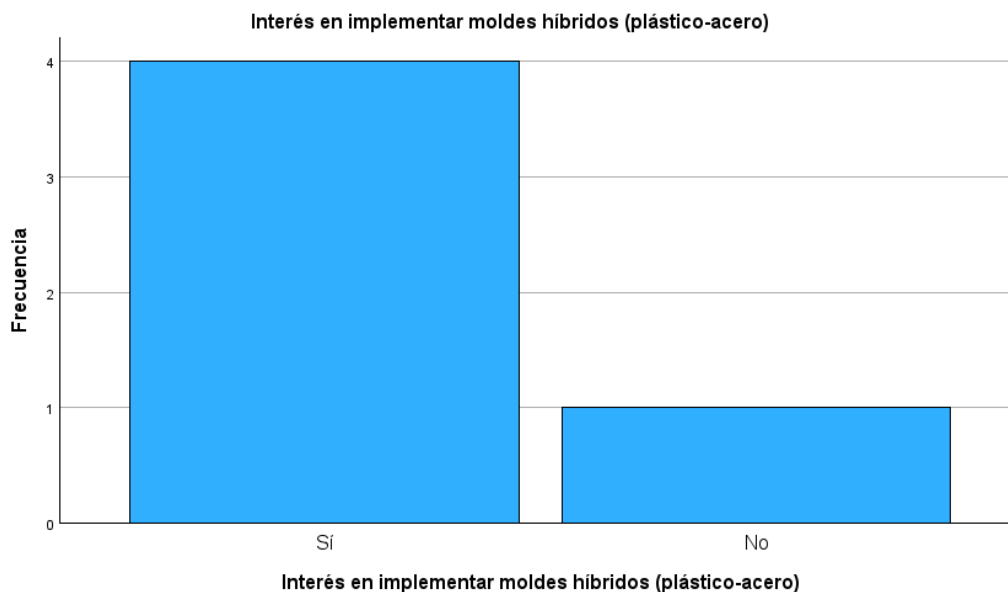


Figura 4.2 Interés en implementar moldes híbridos (plástico-acero). **Fuente:** elaboración propia, 2025.

Desde el punto de vista técnico, la preferencia por moldes híbridos se asocia con beneficios como **menor peso, reducción de costos, facilidad de mantenimiento y mayor personalización.**

Estos hallazgos **respaldan la pertinencia del desarrollo de un molde híbrido mediante tecnologías CAD/CAM,** alineado con los objetivos de este proyecto, que busca **incrementar la productividad y reducir los tiempos y costos de fabricación.**

Tabla 4.3 Impacto en moldes personalizados.

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
		a	e	válido	acumulado
Válido	Sí	5	100.0	100.0	100.0

Fuente: elaboración propia 2025.

Se observa una tendencia predominante hacia el 100% de las empresas realiza algún tipo de personalización en sus moldes, ajustándolos a las necesidades de sus productos o diseños arquitectónicos específicos.

Este comportamiento refleja una **alta flexibilidad en la producción** y una clara **orientación hacia la adaptación del producto al mercado.**

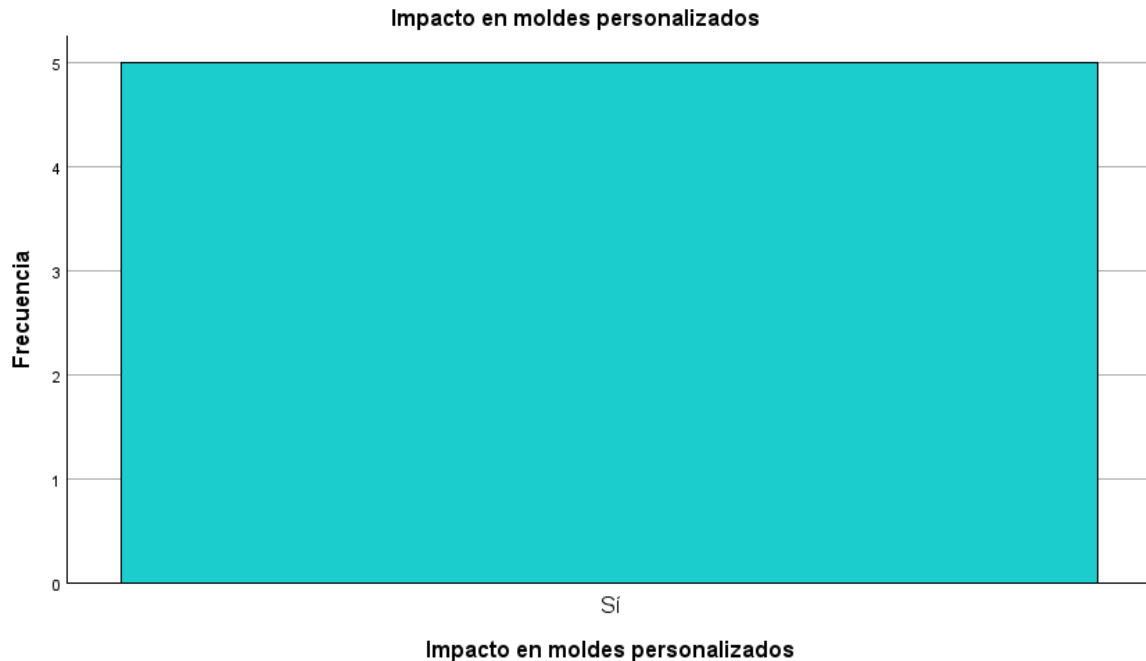


Figura 4.3 Moldes personalizados en las empresas analizada. **Fuente:** elaboración propia (2025).

La personalización de moldes justifica el uso de tecnologías CAD/CAM y manufactura aditiva, al facilitar el rediseño y reducir tiempos, errores y costos de fabricación.

Tabla 4.4 Tipo de molde actualmente utilizado.

Tipo de molde actualmente utilizado.

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido	Acero	1	20.0	20.0	20.0
	Acero estándar	1	20.0	20.0	40.0
	Acero reforzado y poliuretano	1	20.0	20.0	60.0
	Acero soldado	2	40.0	40.0	100.0
	Total	5	100.0	100.0	

Fuente: elaboración propia 2025.

El análisis muestra que la mayoría de las empresas utiliza moldes de acero soldados (40%), seguidos por moldes de acero reforzado con poliuretano (20%) y moldes de acero estándar (20%). Solo una empresa emplea moldes de acero sólido tradicional (20%).

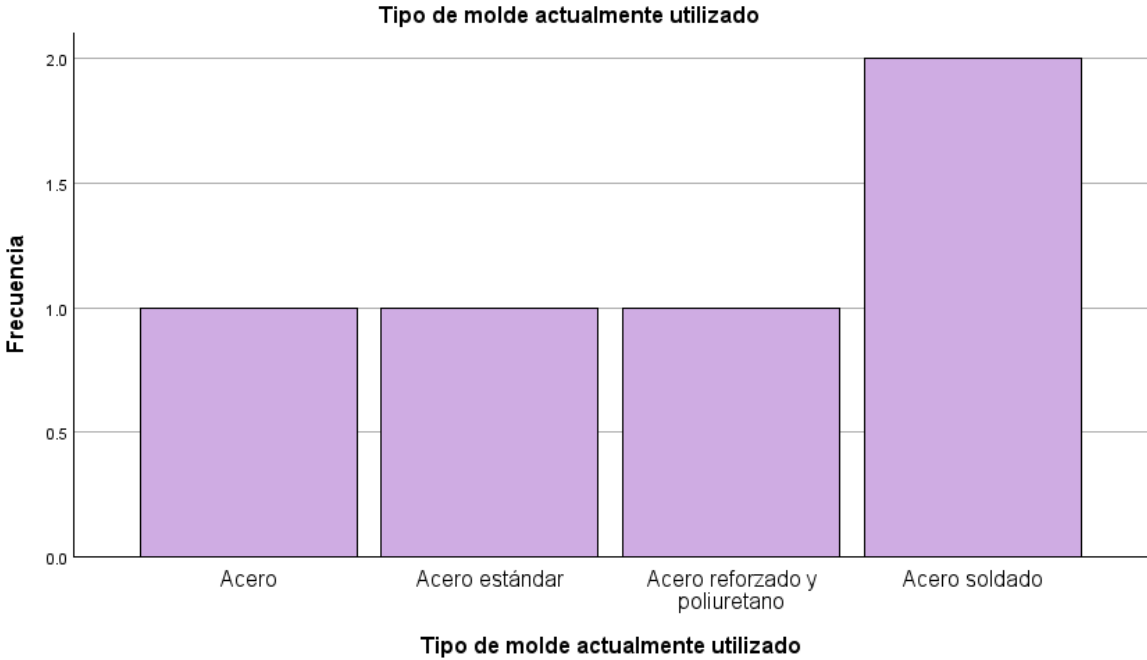


Figura 4.4 Tipos de molde utilizados. **Fuente:** elaboración propia, 2025.

El predominio del acero se explica por su resistencia mecánica y durabilidad, aunque también implica mayores costos de fabricación y mantenimiento.

Estos resultados refuerzan la necesidad de explorar alternativas híbridas que mantengan la resistencia del acero, pero integren materiales poliméricos o componentes impresos en 3D para reducir el peso y facilitar la manipulación, mejorando así la eficiencia productiva.

Tabla 4.5 Frecuencia de reemplazo de los moldes (meses).

Frecuencia de reemplazo de los moldes (meses)

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido	18	2	40.0	40.0	40.0
	24	2	40.0	40.0	80.0
	36	1	20.0	20.0	100.0
	Total	5	100.0	100.0	

Fuente: elaboración propia, 2025.

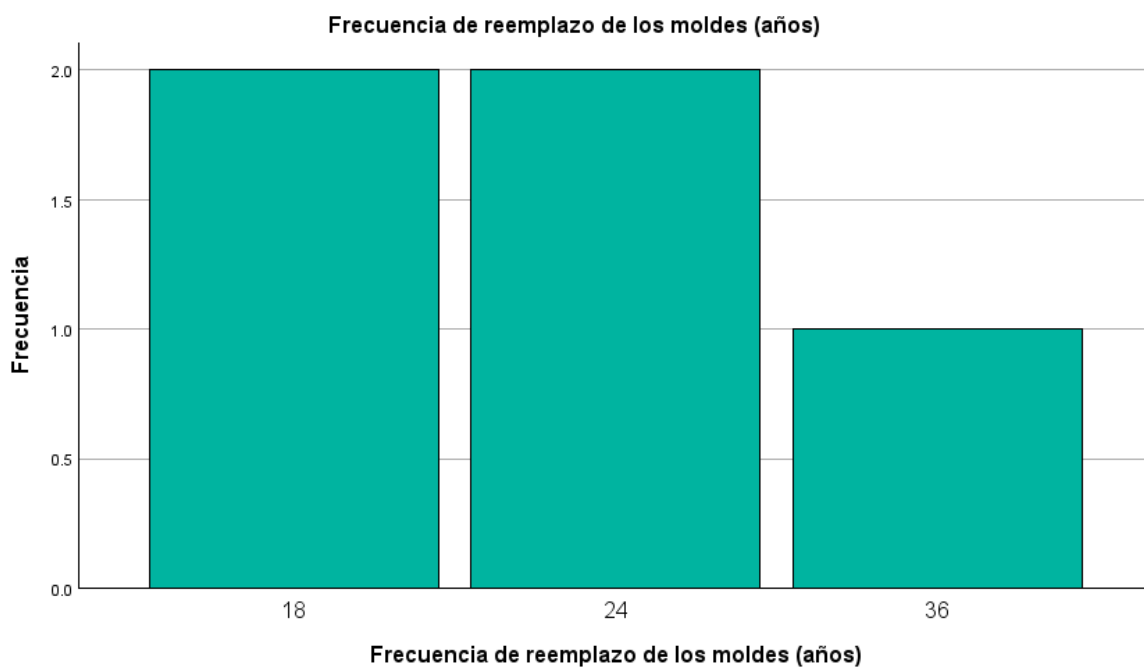


Figura 4.5 Duración del molde por meses. **Fuente:** elaboración propia con base en datos obtenidos del estudio (2025).

Los resultados indican que los moldes son reemplazados con una frecuencia promedio de 18 a 36 meses, dependiendo del material y la intensidad de uso. Este intervalo refleja que los moldes de acero presentan una vida útil prolongada, aunque su mantenimiento y sustitución implican procesos complejos y costosos.

Esta situación refuerza la necesidad de desarrollar moldes híbridos con componentes reemplazables o manufacturados mediante impresión 3D, que permitan mayor eficiencia en el mantenimiento y una reducción significativa en los tiempos de reposición de moldes desgastados.

Tabla 4.6 Frecuencia de la vida útil aproximada del molde (años).

Frecuencia de la vida útil aproximada del molde (años)

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido	2	2	40.0	40.0	40.0
	3	2	40.0	40.0	80.0
	4	1	20.0	20.0	100.0
	Total	5	100.0	100.0	

Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos del estudio (2025).

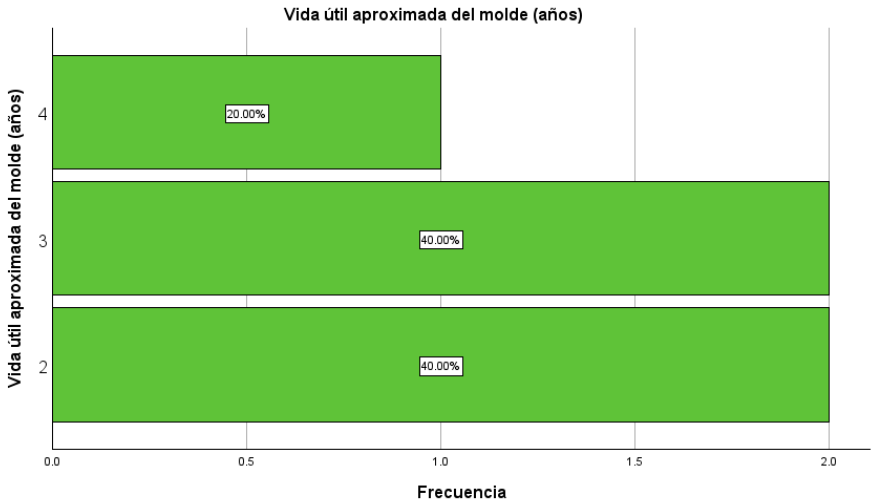


Figura 4.6 Vida útil aproximada del molde. **Fuente:** elaboración propia con base en datos obtenidos del estudio (2025).

La vida útil reportada por las empresas oscila **entre 2 y 4 años**, lo cual coincide con los ciclos típicos de desgaste de los moldes metálicos.

Sin embargo, factores como la humedad, el uso intensivo o la falta de mantenimiento preventivo pueden reducir considerablemente su duración.

Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de optimizar los materiales y procesos de manufactura, integrando tecnologías CAX y la manufactura aditiva para diseñar moldes más resistentes, modulares y con piezas fácilmente reemplazables, prolongando así su vida útil.

Aunque ambos indicadores se relacionan, la frecuencia de reemplazo depende de condiciones operativas, mientras que la vida útil estimada considera un escenario de uso promedio.

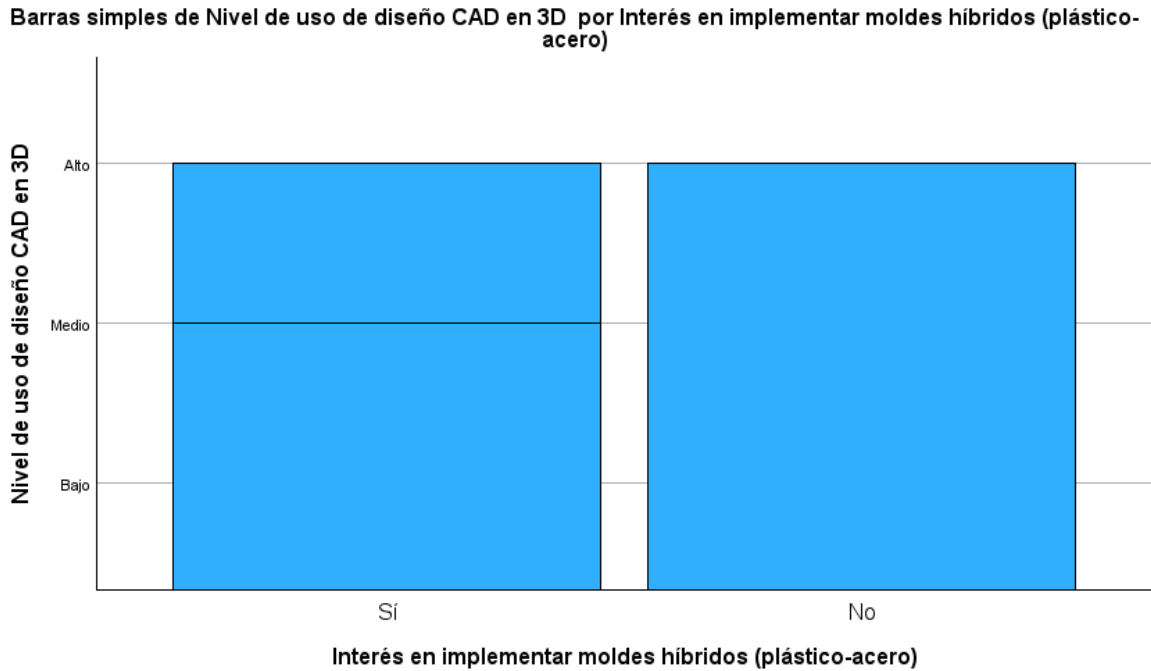


Figura 4.7 Relación entre el uso de diseño CAD en 3D y el interés en moldes híbridos. **Fuente:** elaboración propia con datos de la encuesta (2025).

El gráfico muestra la relación entre el nivel de uso de diseño CAD en 3D y el interés en implementar moldes híbridos. Con base a los

resultados obtenidos se indica que todas las empresas, tanto las interesadas como las no interesadas, presentan niveles medios o altos de uso de CAD 3D, sin registrarse niveles bajos.

Esto evidencia una tendencia general hacia la adopción de herramientas de modelado tridimensional en el sector de prefabricados.

Entre las empresas con interés en moldes híbridos, predomina el uso alto de diseño CAD 3D, mientras que las que no manifiestan interés mantienen un nivel medio. Lo anterior demuestra que las empresas con mayor integración tecnológica son también las más propensas a innovar, lo cual confirma la relevancia de fortalecer la aplicación de las CAX en el diseño y manufactura de moldes. Dicha integración permitirá impulsar la creación de prototipos personalizados, reducir tiempos de producción y optimizar los costos asociados al desarrollo de moldes para adocretos.

El diagnóstico empresarial permitió identificar áreas de oportunidad en los procesos productivos, especialmente en la fabricación de moldes para adocretos, donde se detectaron tiempos prolongados de entrega, altos costos y limitada capacidad de personalización.

Estos resultados justifican el desarrollo de una propuesta basada en tecnologías CAD/CAM y manufactura aditiva para diseñar un molde híbrido que mejore la eficiencia y aumente la flexibilidad en el diseño de adocretos, dejando como trabajo futuro la evaluación de su impacto en la reducción de costos.

4.2 Diseño del prototipo en CAD

El diseño del prototipo de molde se desarrolló mediante herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), considerando criterios funcionales, normativos y de manufactura. El objetivo principal fue proponer un molde híbrido, conformado por cuatro insertos poliméricos fabricados mediante impresión 3D y una base estructural de acero, que permita reducir costos y tiempos de fabricación respecto a moldes convencionales completamente de acero.

El inserto polimérico tiene como función definir la geometría del adocreto, permitiendo la personalización rápida del molde cuando el cliente solicita diseños específicos. Esta estrategia resulta especialmente relevante en la industria de prefabricados, donde la variabilidad geométrica suele implicar elevados costos cuando se utilizan moldes de acero maquinados.

Por su parte, la base de acero actúa como elemento estructural de soporte, garantizando estabilidad y evitando desplazamientos o deformaciones del inserto polimérico durante la aplicación de carga.

Asimismo, el uso de tecnologías CAD permitió la modelación precisa de cada componente del molde, facilitando la visualización del ensamble completo y la detección de posibles interferencias antes de su fabricación. Esto contribuye a mejorar la calidad del diseño y a reducir la necesidad de ajustes en etapas posteriores.

Finalmente, el enfoque híbrido propuesto integra las ventajas de la manufactura aditiva y los procesos tradicionales, ofreciendo una alternativa que combina flexibilidad en el diseño con resistencia estructural, dejando como trabajo futuro la evaluación de su impacto en la reducción de costos y desempeño operativo.

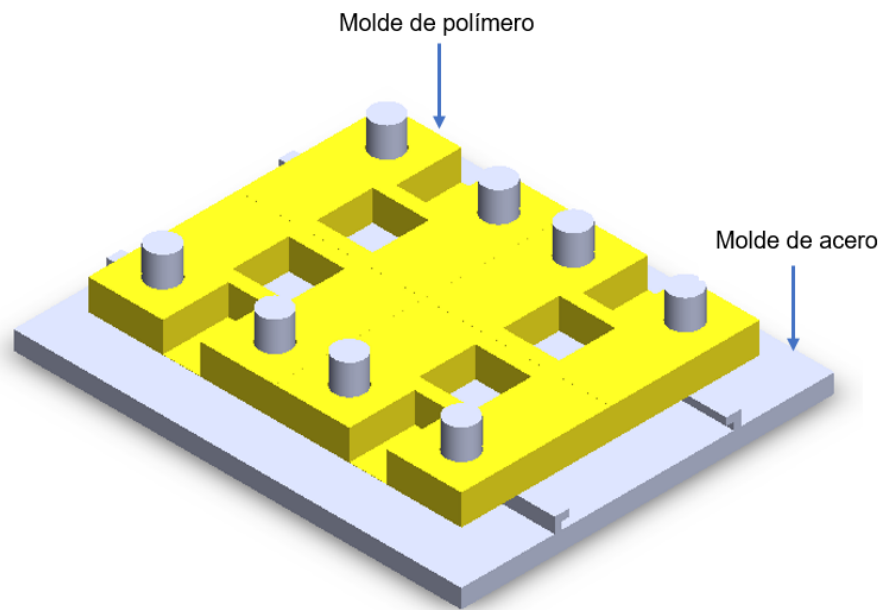


Figura 4.8 Diseño CAD del molde híbrido propuesto, compuesto por cuatro insertos poliméricos fabricados mediante manufactura aditiva y una base estructural de acero. **Fuente:** Elaboración propia.

Con el propósito de mostrar de manera más clara la configuración del sistema, en la **Figura 4.9** se presenta una vista explosionada del molde híbrido propuesto. En esta representación se observa la disposición de los insertos poliméricos fabricados mediante manufactura aditiva y su integración con la base estructural de acero, lo que permite visualizar de forma detallada el ensamblaje de los componentes.

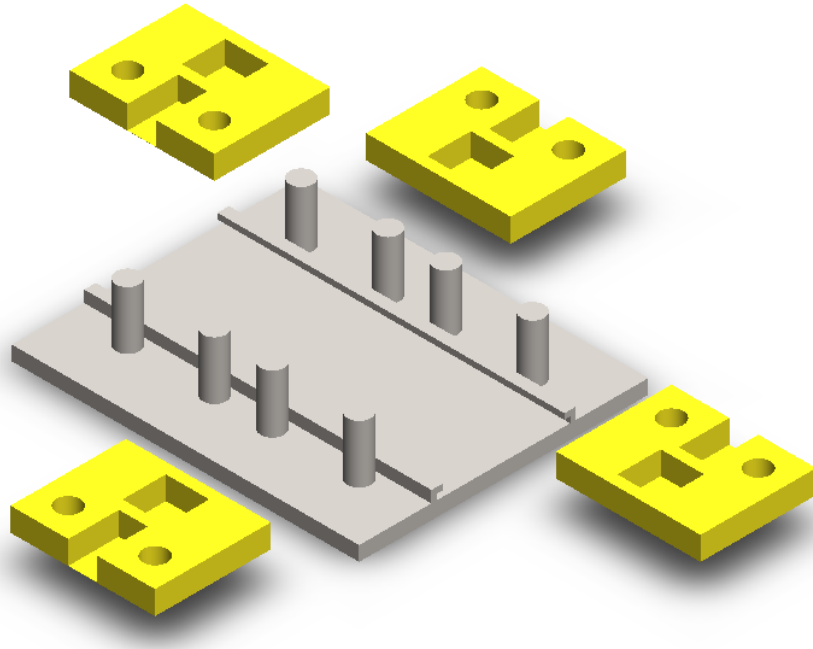


Figura 4.9 Vista explosionada del molde híbrido propuesto. **Fuente:** Elaboración propia.

El diseño se desarrolló considerando las dimensiones y tolerancias establecidas en la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014, la cual regula las características geométricas y dimensionales de elementos prefabricados utilizados en pavimentos.

4.3 Prototipo fabricado mediante impresión 3D

Una vez definido el diseño del molde híbrido para la fabricación de adocretos, se contó con prototipos físicos fabricados mediante tecnologías de manufactura aditiva, empleando los materiales PLA y PETG. Estos materiales fueron seleccionados debido a su disponibilidad comercial, facilidad de impresión y propiedades mecánicas reportadas en fichas técnicas y literatura especializada.

El inserto polimérico del molde fue desarrollado mediante un modelo CAD paramétrico, el cual permitió la definición de las geometrías internas requeridas para la conformación del adocreto. Dicho modelo fue proporcionado por el asesor del presente trabajo, quien realizó el proceso de modelado y fabricación mediante impresión 3D. Posteriormente, los prototipos impresos fueron entregados al autor para su integración en el sistema de moldeo y para la realización de las pruebas y simulaciones numéricas correspondientes.

La fabricación de los prototipos permitió verificar de manera preliminar aspectos fundamentales como:

- El ajuste dimensional del inserto polimérico.
- El ensamble adecuado con la base estructural de acero.
- La viabilidad geométrica del diseño para su aplicación en procesos reales de compactación.

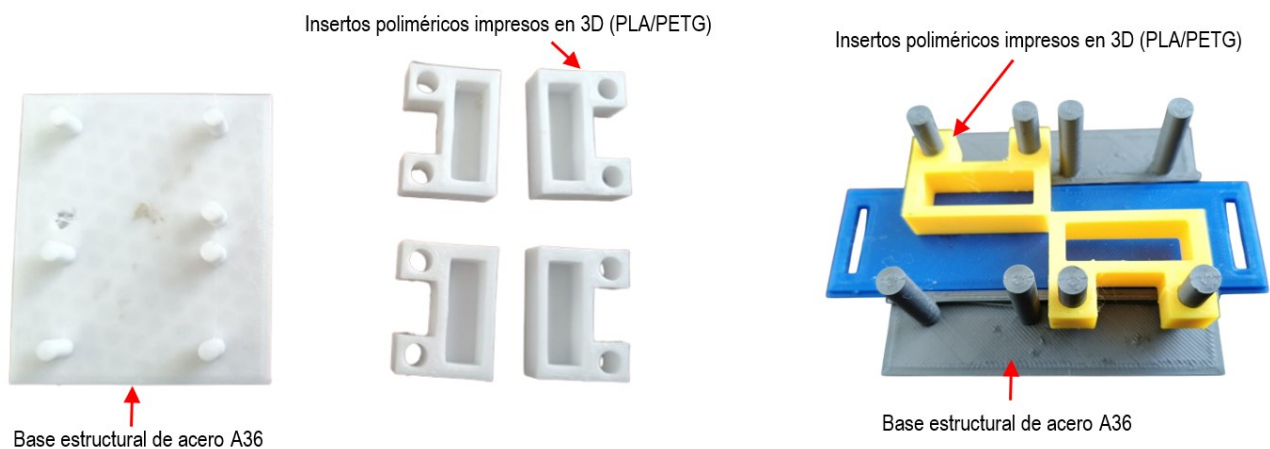


Figura 4.10 Prototipos del molde híbrido impresos en 3D (PLA y PETG) para dos configuraciones geométricas. **Fuente:** elaboración del asesor del proyecto (2025).

4.4 Condiciones de operación del molde propuesto

El funcionamiento del molde híbrido contempla la aplicación de carga mediante un pistón manual, así como el uso de una mesa vibradora para favorecer la compactación homogénea del material arcilloso dentro del molde. Se establecieron condiciones de operación representativas de un proceso real de compactación de mezclas cementicias y arcillosas utilizadas en la fabricación de adocretos.

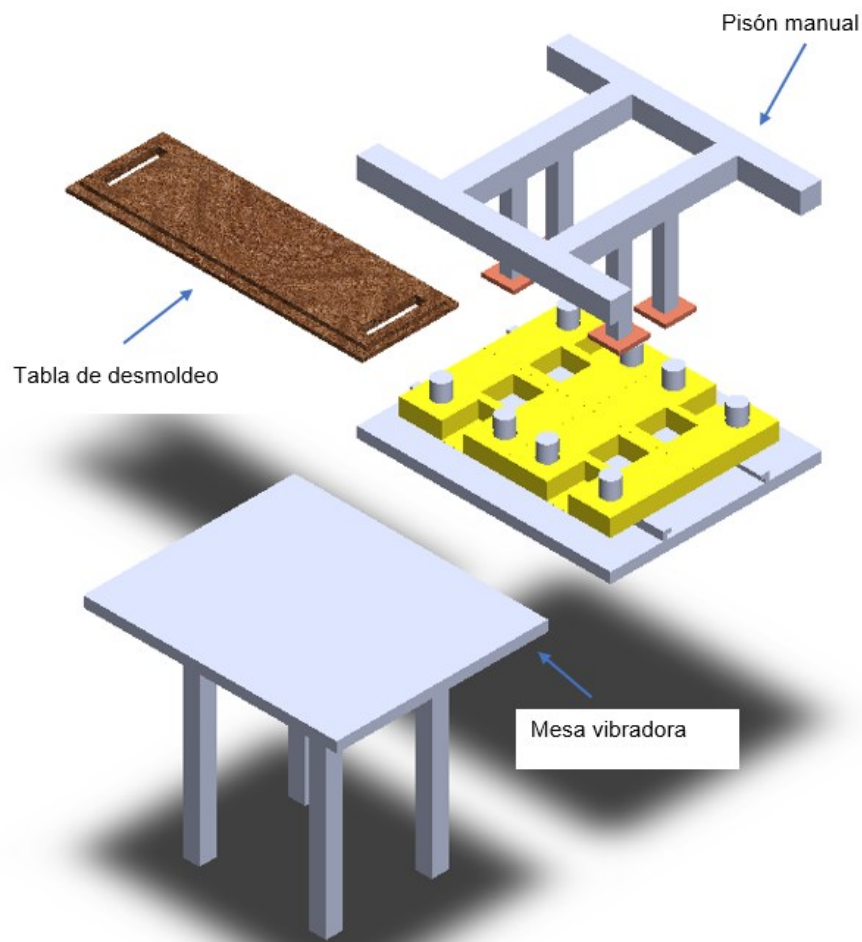


Figura 4.11 Conjunto del molde híbrido durante su operación, integrado por pistón manual y mesa vibradora. **Fuente:** Elaboración propia.

4.4.1 Presión aplicada durante la compactación

La presión aplicada durante la compactación del material dentro del molde se estableció en 0.37 MPa (370,000 N/m²). Este valor se seleccionó con base en rangos reportados en la literatura técnica para procesos de compactación manual de bloques de tierra comprimida (Compressed Earth Blocks, CEB), los cuales se sitúan típicamente entre 0.3 y 0.8 MPa, representando una condición de carga intermedia y conservadora, adecuada para evaluar el desempeño estructural del molde bajo condiciones cercanas a la operación real (Cabrera et al., 2024).

De manera complementaria, la NMX-C-314-ONNCCE-2014 establece los requisitos de resistencia a compresión que deben cumplir los adoquines de concreto una vez fabricados. Para los adoquines Tipo A, destinados a tránsito peatonal, la norma establece una resistencia mínima individual de 24.5 MPa y una resistencia media de 29.4 MPa, valores que se presentan en la Tabla 4.7 y que se consideran como referencia normativa para contextualizar las condiciones de operación del molde durante el proceso de conformado (ONNCCE, 2014).

Tabla 4.7 Requisitos de resistencia a compresión para adoquines de concreto según la NMX-C-314-ONNCCE-2014.

Tipo	Resistencia media Mpa (Kg/cm²)	Resistencia mínima individual Mpa (Kg/cm²)
A	29.4 (300)	24.5 (250)
B	39.2 (400)	35.3 (360)

Tipo	Resistencia media Mpa (Kg/cm²)	Resistencia mínima individual Mpa (Kg/cm²)
C	44.1 (450)	39.7 (405)
D	55.0 (560)	50.0 (510)

Fuente: ONNCCE (2014), NMX-C-314-ONNCCE-2014.

Es importante mencionar que los valores normativos corresponden al comportamiento mecánico del producto final y no a la presión de compactación aplicada durante el proceso de moldeo. Estos criterios permiten contextualizar el nivel estructural que debe soportar el molde durante la formación del adoquín. En este sentido, la presión de 0.37 MPa seleccionada para las simulaciones resulta factible con el tipo de producto de acuerdo a la norma y adecuada para evaluar el comportamiento estructural del molde polimérico bajo condiciones representativas de operación.

4.4.2 Configuración del molde híbrido

El molde propuesto presenta una configuración híbrida compuesta por una base de acero A36 y un inserto polimérico intercambiable, diseñado para la fabricación de adocretos mediante procesos de compactación mecánica. Esta configuración permite combinar la rigidez y estabilidad del acero con la versatilidad geométrica que ofrecen los materiales poliméricos manufacturados mediante tecnologías CAD/CAM e impresión 3D.

La base de acero A36 tiene como función principal soportar las cargas aplicadas durante el proceso de compactación, garantizando la

estabilidad dimensional del conjunto y evitando desplazamientos o deformaciones globales del molde. Sobre esta base se monta el inserto polimérico, el cual define la geometría final del adocreto y puede ser sustituido sin modificar la estructura principal del sistema.

El inserto polimérico fue diseñado para ser manufacturado mediante impresión 3D, empleando materiales termoplásticos como PLA y PETG, seleccionados por su disponibilidad, facilidad de manufactura y comportamiento mecánico adecuado para procesos de prototipado funcional. Esta característica permite evaluar diferentes geometrías de adocretos utilizando una misma base estructural, reduciendo tiempos y costos de fabricación.

En cuanto a sus dimensiones generales, el conjunto del molde presenta una base de 120 cm por 100 cm, mientras que los insertos poliméricos cuentan con una profundidad de cavidad aproximada de 8.10 cm, considerada suficiente para el acomodo del material previo al proceso de compactación. Las dimensiones específicas de cada componente se indican de manera gráfica en la Figura 4.12, donde se muestran tanto la base metálica como el inserto de polímero ensamblado.

Esta configuración modular facilita el intercambio de insertos, permitiendo la evaluación de distintas geometrías de adocretos sin alterar las condiciones estructurales del molde, lo cual resulta fundamental para el análisis comparativo desarrollado en los apartados posteriores.

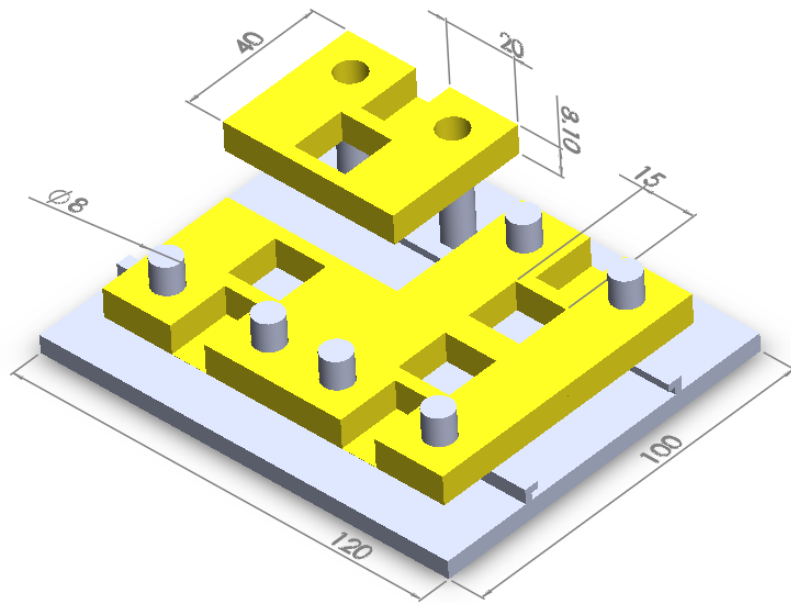


Figura 4.12 Configuración dimensional del molde híbrido propuesto, indicando base de acero e inserto polimérico (dimensiones en cm).
Fuente: Elaboración propia.

4.5 Obtención de las propiedades mecánicas de los materiales

El análisis numérico del molde híbrido propuesto requiere la definición adecuada de las propiedades mecánicas de todos los materiales empleados en su fabricación, tanto en los insertos poliméricos como en la base de acero. En este estudio se consideraron dos materiales poliméricos, ácido poliláctico (PLA) y tereftalato de polietileno modificado con glicol (PETG), así como acero estructural A36 para la estructura portante del molde.

Para los insertos poliméricos, se seleccionaron filamentos comerciales de PLA y PETG de la marca SUNLU, ampliamente utilizados en procesos de manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM), debido a su disponibilidad comercial, estabilidad dimensional y desempeño mecánico reportado en la literatura. Las propiedades

mecánicas básicas, como el módulo de elasticidad y la resistencia última a la tracción, se obtuvieron a partir de las fichas técnicas proporcionadas por el fabricante, las cuales fueron empleadas como referencia inicial y posteriormente complementadas y validadas mediante rangos y criterios reportados en literatura científica especializada en polímeros impresos en 3D.

No obstante, parámetros como la densidad, el coeficiente de Poisson, el límite elástico y la resistencia a la compresión no se reportan de manera explícita en dichas fichas técnicas, por lo que fue necesario estimarlos mediante criterios ampliamente aceptados en la literatura de ciencia de materiales y comportamiento mecánico de polímeros termoplásticos, con el fin de contar con un conjunto completo de propiedades para su uso en el análisis por elemento finito.

En el caso de la base estructural del molde híbrido, se considera el uso de acero estructural A36 como material de referencia para su fabricación mediante manufactura sustractiva. Las propiedades mecánicas de este acero, tomadas de la biblioteca de materiales del software SolidWorks Simulation, corresponden a valores típicos reportados en normas y literatura técnica, por lo que se consideran representativas desde el punto de vista conceptual del diseño del molde híbrido.

En el presente estudio, el acero estructural A36 no fue incluido como cuerpo deformable en el análisis por elemento finito, ya que la simulación se centró exclusivamente en el comportamiento mecánico de los insertos poliméricos del molde. No obstante, con el fin de

documentar el modelo propuesto y garantizar la reproducibilidad del diseño, los valores de las propiedades mecánicas del acero A36 se presentan en la Tabla 4.8, sin que ello implique su evaluación estructural dentro de este trabajo.

Tabla 4.8 Propiedades mecánicas del acero estructural A36.

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad	E	200 000	MPa
Coefficiente de Poisson	ν	0.26	–
Módulo cortante	G	79 300	MPa
Densidad	ρ	7850	kg/m^3
Límite elástico	σ_y	250	MPa
Resistencia última a la tracción	σ_u	400	MPa

Fuente: Biblioteca de materiales de SolidWorks Simulation (A36).

Las propiedades mecánicas del acero estructural A36 presentadas en la Tabla 4.X corresponden a los valores disponibles en la biblioteca de materiales del software SolidWorks Simulation, expresados en unidades MPa para mantener consistencia con los materiales poliméricos analizados en este estudio. Dichos valores se encuentran dentro de los rangos reportados en normas y literatura técnica para este acero, por lo que se consideran representativos para el análisis estructural del molde híbrido.

En el presente estudio, el análisis por elemento finito se centró exclusivamente en el comportamiento mecánico de los insertos poliméricos del molde, sobre los cuales se aplicaron las condiciones de carga definidas. La base estructural de acero A36 se concibe como un componente fabricado mediante manufactura sustractiva, cuya evaluación estructural y proceso de fabricación no forman parte

del alcance de este trabajo. En consecuencia, el acero A36 no fue incluido como cuerpo deformable en la simulación, sino considerado únicamente como elemento conceptual de soporte dentro del diseño del molde híbrido.

Las propiedades mecánicas determinadas en este apartado permitieron establecer criterios de diseño coherentes y condiciones de frontera adecuadas para la evaluación comparativa del desempeño estructural de los insertos poliméricos bajo condiciones de carga controladas.

4.5.1 Obtención del límite elástico para PLA y PETG

En el presente trabajo, la estimación del límite elástico de los materiales PLA y PETG se realizó a partir del análisis conceptual del comportamiento esfuerzo-deformación característico de los polímeros termoplásticos. Dicho parámetro no se obtuvo de las fichas técnicas del fabricante, debido a que estas fuentes comerciales reportan principalmente la resistencia última a la tracción (σ_t) y el módulo de elasticidad sin especificar el punto de cedencia. Por ello, fue necesario estimar el límite elástico a partir de criterios respaldados por la literatura especializada.

El comportamiento esfuerzo-deformación de los polímeros termoplásticos puede clasificarse en distintos tipos, entre los que se encuentra el comportamiento plástico, caracterizado por una región elástica inicial seguida de un proceso de cedencia y deformación plástica. De acuerdo con Callister y Rethwisch (2018, p. 513), en este tipo de materiales el límite elástico no siempre se presenta como un

punto claramente definido, sino que suele identificarse cerca del final de la región elástica lineal de la curva esfuerzo–deformación. Debido a esta transición gradual, el límite elástico en polímeros se interpreta comúnmente como una región y no como un valor puntual, como se ilustra de manera esquemática en la Figura 4.13.

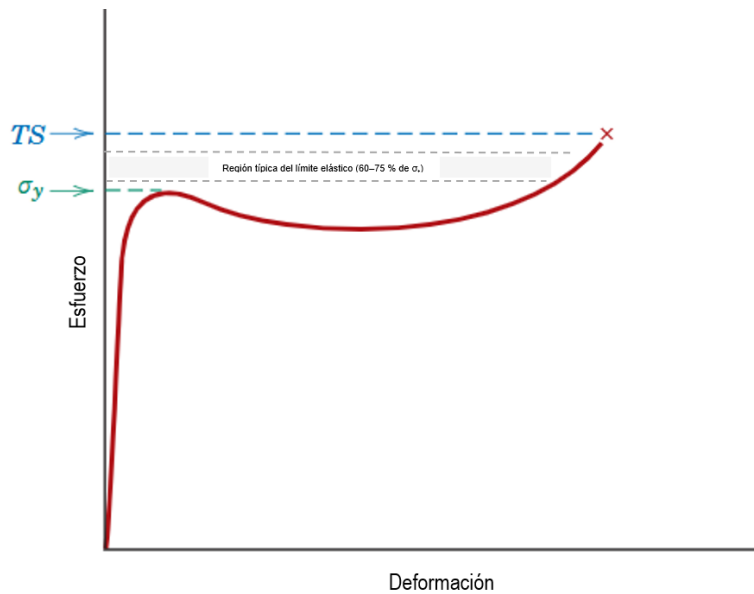


Figura 4.13 Esquema conceptual del comportamiento esfuerzo–deformación característica de un polímero termoplástico. **Fuente:** Adaptado de Callister y Rethwisch (2018).

Dado que el límite elástico en polímeros termoplásticos no se presenta como un valor puntual claramente definido, en el presente trabajo se adoptó un criterio basado en la literatura para su estimación. Con base en un intervalo típicamente reportado entre 60–75 % de la resistencia última a la tracción, se seleccionó un valor representativo del 65 % de σ_t .

Este valor se utilizó como criterio conservador para garantizar que las condiciones de carga aplicadas en las simulaciones numéricas se mantuvieran dentro del régimen elástico del material, evitando deformaciones plásticas permanentes durante el análisis.

El límite elástico de los materiales PLA y PETG fue estimado mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_y = 0.65\sigma_t$$

donde:

σ_y = *límite elástico estimado (MPa)*

σ_t = *resistencia última a la atracción (MPa)*

Para PLA, considerando una resistencia última a la tracción de 58 MPa:

$$\sigma_y(PLA) = 0.65 \times 58 = 37.7 \text{ MPa} \approx 38 \text{ MPa}$$

Para el PETG, considerando una resistencia última a la tracción de 61.4 MPa:

$$\sigma_y(PETG) = 0.65 \times 61.4 = 39.91 \text{ MPa} \approx 40 \text{ MPa}$$

A continuación, se presenta un resumen de los valores obtenidos.

Tabla 4.9 Propiedades mecánicas comparativas de PLA, PETG.

Material	σ_t (MPa)	σ_y estimado (MPa)	Criterio
PLA	58.0	38.0	$0.65 \cdot \sigma_t$
PETG	61.4	40.0	$0.65 \cdot \sigma_t$

Fuente: Elaboración propia.

Aunque el valor de resistencia última del PETG es ligeramente mayor que el del PLA, su comportamiento mecánico presenta mayor ductilidad, lo que justifica el uso del mismo criterio conservador para ambos materiales en el contexto de simulación estructural.

4.5.2 Obtención del límite de compresión para PLA y PETG

Según Callister y Rethwisch (2018), en los polímeros las propiedades mecánicas bajo compresión no se reportan como un valor fundamental independiente, debido a que estos materiales deforman progresivamente sin presentar un punto de falla claramente definido. Estudios experimentales recientes han demostrado que, en materiales termoplásticos impresos mediante manufactura aditiva, como PLA y PETG, la resistencia bajo compresión puede ser igual o incluso mayor que la resistencia a tracción, lo que respalda el uso de estimaciones del límite de compresión basadas en múltiplos del límite elástico en tracción en análisis numéricos y de diseño (Hsueh et al., 2021).

Para fines de análisis estructural, el límite de compresión (σ_c) se estimó a partir del límite elástico en tracción (σ_y), adoptando un valor empírico de $\alpha = 1.25$, el cual se encuentra dentro del intervalo $1.2 \leq$

$\alpha \leq 1.5$, el cual permite obtener resultados aceptables físicamente en simulaciones por elementos finitos.

La expresión utilizada fue:

$$\sigma_c = 1.25 \sigma_y$$

donde:

$\sigma_c = \text{límite elástico de compresión (MPa)}$

$\sigma_y = \text{resistencia elástico en tracción (MPa)}$

Cálculo para PLA

A partir del límite elástico en tracción previamente estimado:

$$\sigma_y(PLA) = 38 \text{ MPa}$$

se obtiene:

$$\sigma_c(PLA) = 1.25 \times 38 = 47.5 \text{ MPa}$$

Cálculo para PETG:

A partir del límite elástico en tracción previamente estimado:

$$\sigma_y(PETG) = 40 \text{ MPa}$$

se obtiene:

$$\sigma_c(PETG) = 1.25 \times 40 \text{ MPa} = 50.0 \text{ MPa}$$

Resumen de propiedades mecánicas estimadas:

Tabla 4.10 Propiedades mecánicas comparativas de PLA y PETG.

Material	σ_t (MPa)	σ_y estimado (MPa)	σ_c estimado (MPa)	Criterio
PLA	58.0	38.0	47.5	$1.25 \cdot \sigma_y$
PETG	61.4	40.0	50.0	$1.25 \cdot \sigma_y$

Fuente: Elaboración propia

4.5.3 Obtención de la densidad y coeficiente de Poisson para PLA y PETG

Además de sus propiedades mecánicas, los polímeros PLA y PETG presentan características físicas relevantes, como la densidad, que influye directamente en el peso de las piezas y en el comportamiento en simulaciones estructurales. Según estudios recientes (Khan et al., 2023), los valores de densidad se muestran en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Densidad de PLA Y PETG.

Material	Densidad (g/cm ³)	Fuente
PLA	1.24	Khan et al., 2023
PETG	1.27	Khan et al., 2023

Fuente: Elaboración propia a partir de Khan et al., 2023

Otra propiedad física relevante es el coeficiente de Poisson (ν), que representa la deformación lateral relativa a la deformación axial bajo carga uniaxial. Los valores típicos para piezas impresas en 3D mediante FDM se presentan en la Tabla 4.12 (Part Manufacturing, 2023):

Tabla 4.12 Coeficiente de Poisson (ν).

Material	Coeficiente de Poisson (ν)
PLA	0.35
PETG	0.38

Fuente: Elaboración propia a partir de (Part Manufacturing, 2023).

A continuación, en la Tabla 4.13 se muestra el resumen de propiedades utilizadas en Solidworks.

Tabla 4.13 Resumen de propiedades físicas y mecánicas de PLA y PETG.

Material	Densidad (g/cm ³)	E (MPa)	ν	σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	σ_c (MPa)	Criterio
PLA	1.24	3570	0.35	58.0	38.0	47.5	$\sigma_y = 0.65 \cdot \sigma_t; \sigma_c = 1.25 \cdot \sigma_y$
PETG	1.27	2350	0.38	61.4	40.0	50.0	$\sigma_y = 0.65 \cdot \sigma_t; \sigma_c = 1.25 \cdot \sigma_y$

Nota: Valores tomados de la Sección 4.5. El acero estructural A36 no se incluye en esta tabla debido a que no fue considerado como cuerpo deformable en el análisis por elementos finitos, al encontrarse fuera del alcance del presente estudio.

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Pruebas y simulaciones numéricas en SolidWorks

Con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico de los diseños propuestos de moldes para adocretos, se desarrollaron pruebas y simulaciones numéricas mediante el método de elementos finitos (MEF), empleando el software SolidWorks Simulation 2023, bajo un enfoque de análisis estático lineal. Las simulaciones permitieron analizar la distribución de esfuerzos y factores de seguridad en cinco configuraciones geométricas distintas, modeladas virtualmente en PLA y PETG, considerando un sistema híbrido compuesto por una base de acero y un cuerpo principal polimérico.

Las simulaciones se realizaron considerando una presión uniforme de 0.37 MPa (370,000 N/m²) aplicada sobre la superficie activa del molde, correspondiente a la carga de compactación definida previamente en el apartado 4.4.1 *Presión aplicada durante la compactación*. Esta condición de carga permitió evaluar el desempeño estructural de los moldes bajo un escenario representativo de operación.

El procedimiento general incluyó la definición del modelo geométrico, la asignación de las propiedades mecánicas de los materiales, la aplicación de las condiciones de frontera, la definición de las cargas externas y la generación de la malla para el análisis numérico. Las propiedades mecánicas de los materiales PLA, PETG y acero A36 empleadas en las simulaciones corresponden a los valores previamente descritos y justificados en los capítulos anteriores, e incluyen el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y los límites de esfuerzo considerados para cada material. La metodología adoptada se encuentra alineada con procedimientos documentados en la literatura especializada para simulaciones estructurales mediante SolidWorks Simulation (Vera Lázaro, 2014).

Para cada configuración geométrica se evaluaron el esfuerzo equivalente de von Mises y el factor de seguridad, con el fin de identificar las regiones críticas y comparar el desempeño estructural entre los materiales analizados. El factor de seguridad se define como la relación entre la resistencia del material y el esfuerzo aplicado, representando un indicador del margen existente frente a la condición límite del material. Un valor unitario del factor de seguridad corresponde al inicio de la condición de falla, mientras que valores

mayores indican un comportamiento estructural seguro. De acuerdo con Budynas y Nisbett (2012), el valor numérico del factor de seguridad no es único ni normativo, sino que depende del criterio de diseño, del tipo de aplicación y del nivel de incertidumbre asociado al análisis. En el caso de prototipos y validaciones estructurales mediante simulación numérica, factores de seguridad elevados reflejan diseños conservadores con amplios márgenes frente a la carga aplicada.

Los valores máximos del esfuerzo equivalente de von Mises se compararon con el límite de compresión estimado (σ_c) de cada material, con el fin de verificar que el comportamiento del molde se mantuviera dentro del régimen elástico bajo las cargas de compactación consideradas.

Con el propósito de facilitar la interpretación de los resultados y analizar la influencia de la geometría del molde en su comportamiento estructural, en este apartado se presentan tres configuraciones geométricas representativas: una geometría favorable con distribución uniforme de esfuerzos, una geometría intermedia y una geometría crítica caracterizada por la presencia de aristas internas. Estas configuraciones permiten analizar escenarios estructurales contrastantes bajo las mismas condiciones de carga y materiales.

Los resultados completos de las simulaciones de geometrías adicionales, así como los mapas de desplazamiento y deformación de todas las configuraciones, se presentan en los **Anexos B, C y D** como respaldo del análisis estructural.

4.6.1 Primera configuración geométrica: molde circular

La primera configuración geométrica analizada corresponde al molde con cavidad circular, el cual representa el nivel más bajo de complejidad geométrica entre los diseños evaluados. Para esta configuración se analizó el comportamiento mecánico de insertos poliméricos fabricados en PLA y PETG, mediante simulaciones por el método de elementos finitos, bajo las condiciones de carga definidas obteniendo el esfuerzo de von Mises y su factor de seguridad. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para ambos materiales.

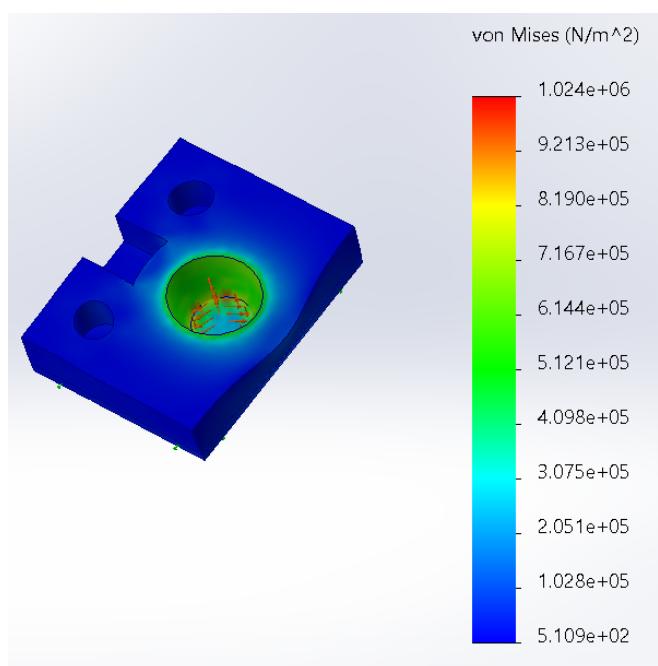


Figura 4.14 Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con cavidad circular fabricado en PETG bajo presión uniforme de 0.37 MPa, mediante análisis por elemento finito en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

En la Figura 4.14 se observa que los mayores esfuerzos se concentran en la pared interna de la cavidad y en las zonas de transición

geométrica, lo cual es consistente con la aplicación de la carga de compactación y con la presencia de cambios de sección.

Del análisis de resultados se obtiene que el valor máximo del esfuerzo equivalente es del orden de 1.0 MPa, el cual resulta significativamente menor que el límite de compresión estimado para el material analizado. Esta relación confirma que el molde se mantiene completamente dentro del régimen elástico, sin presentar riesgo de falla estructural bajo las condiciones de carga consideradas.

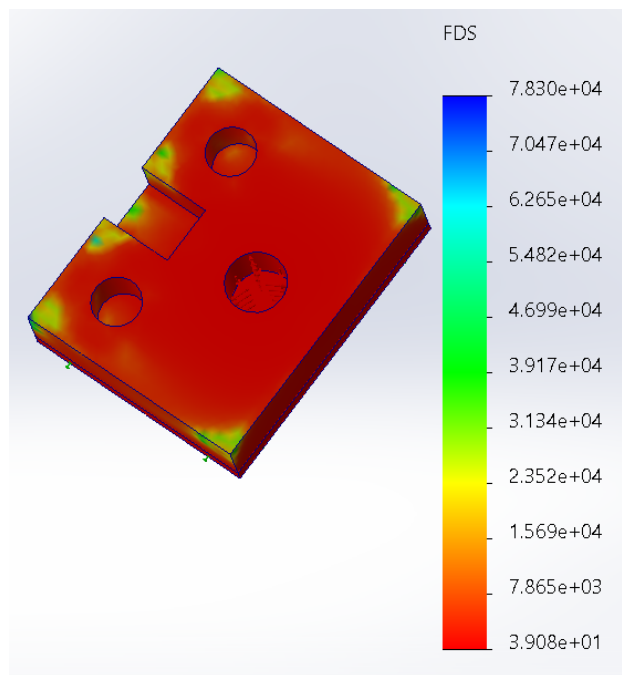


Figura 4.15 Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde circular en PETG bajo presión uniforme de 0.37 MPa, mediante análisis por elemento finito en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

En la figura 4.15 se observa la distribución del factor de seguridad correspondiente al molde con cavidad circular de material PETG, bajo una presión uniforme de 0.37 MPa. Se observa que el factor de

seguridad se mantiene ampliamente por encima de la unidad en la totalidad del modelo, incluso en las zonas de mayor sollicitación mecánica.

El valor mínimo del factor de seguridad es del orden de 40, lo que indica un amplio margen frente a la carga de compactación considerada. Estos resultados confirman que el diseño del molde presenta un comportamiento estructural seguro y altamente conservador bajo las condiciones de operación analizadas.

De manera continua, se presentan los resultados obtenidos con PLA para el molde circular.

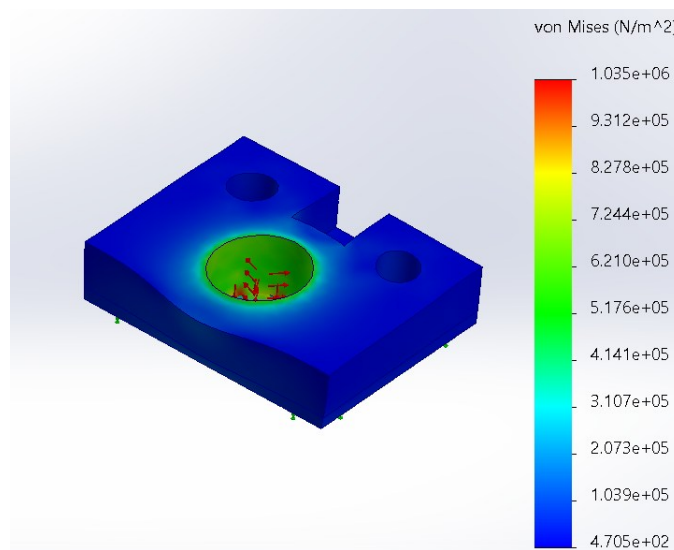


Figura 4.16 Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría circular fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, mediante análisis por elemento finito en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

Para la Figura 4.16 se observa que los mayores esfuerzos se concentran de manera uniforme alrededor del contorno circular de la cavidad, sin

la presencia de concentraciones localizadas asociadas a aristas internas.

Los resultados indican que el valor máximo del esfuerzo equivalente es del orden de 1.0 MPa, el cual resulta significativamente menor que el límite de compresión estimado para el PLA ($\sigma_c = 47.5 \text{ MPa}$). Esta relación indica que el material se mantiene ampliamente dentro del régimen elástico bajo las condiciones de carga analizadas, sin riesgo de falla estructural.

El comportamiento observado de la geometría circular favorece una distribución más homogénea de los esfuerzos, reduciendo las concentraciones mecánicas.

Se observa también su factor de seguridad:

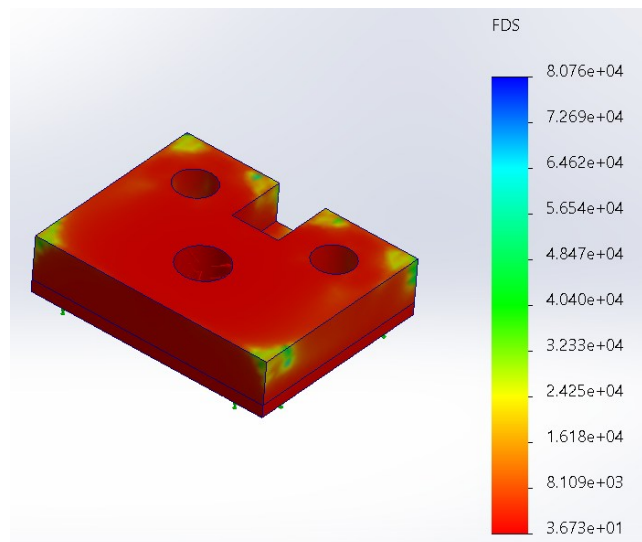


Figura 4.17 Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde circular en PLA bajo presión uniforme de 0.37 MPa, mediante análisis por elemento finito en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

La Figura 4.17 muestra la distribución del factor de seguridad (FDS) correspondiente al molde con geometría circular, considerada como la configuración menos crítica, fabricado en PLA, bajo una presión uniforme de 0.37 MPa. Se observa que el factor de seguridad se mantiene ampliamente por encima de la unidad en la totalidad del modelo, sin zonas localizadas de bajo margen de seguridad.

El valor mínimo del factor de seguridad es del orden de 37, lo que indica un margen de seguridad muy elevado frente a la carga de compactación considerada. Este comportamiento confirma que, para geometrías suaves como la cavidad circular, el material PLA presenta un desempeño estructural altamente conservador, manteniéndose completamente dentro del régimen elástico bajo las condiciones de operación analizadas.

Los resultados evidencian que la ausencia de aristas internas favorece una distribución homogénea de los esfuerzos y contribuye a incrementar significativamente el factor de seguridad.

4.6.2 Segunda configuración geométrica: molde cuadrangular

La segunda configuración geométrica analizada corresponde al molde con cavidad cuadrada, el cual se considera de nivel intermedio de complejidad geométrica entre los diseños evaluados. Para esta configuración se analizó el comportamiento mecánico de insertos poliméricos fabricados en PLA y PETG, mediante simulaciones por el método de elementos finitos, bajo las condiciones de carga definidas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para ambos materiales.

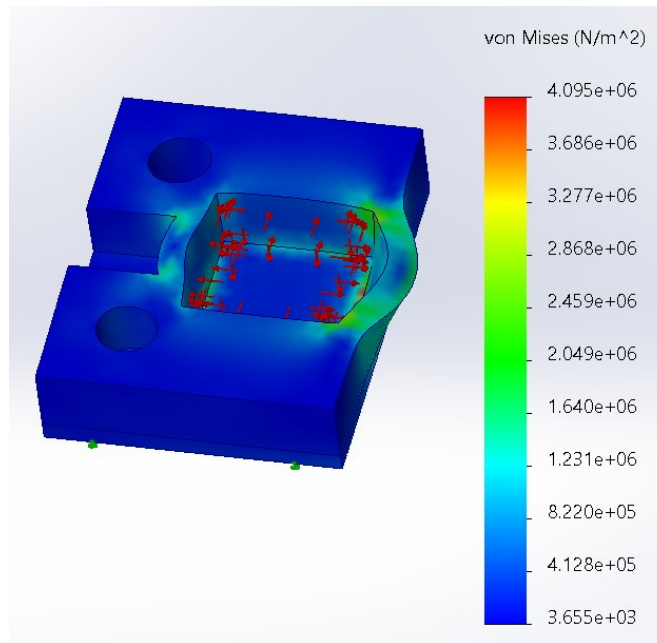


Figura 4.18 Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría cuadrada fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, mediante análisis por elemento finito en SolidWorks Simulation.

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación numérica.

En la Figura 4.18 se observa la distribución del esfuerzo equivalente de von Mises correspondiente al molde con geometría cuadrada, considerada como una configuración intermedia, fabricado en PETG, bajo una presión uniforme de 0.37 MPa aplicada sobre la superficie activa de la cavidad.

Los mayores esfuerzos se concentran en las paredes internas de la cavidad y en las zonas de transición geométrica entre la cavidad y el cuerpo del molde, particularmente en los cambios de sección.

De acuerdo con los resultados obtenidos el valor máximo del esfuerzo equivalente es del orden de 4.1 MPa, el cual resulta significativamente menor que el límite de compresión estimado para el PETG ($\sigma_c = 50$ MPa). Esta relación indica que el material se mantiene

completamente dentro del régimen elástico bajo las condiciones de carga analizadas, sin riesgo de falla estructural.

En cuanto al factor de seguridad se observó la siguiente:

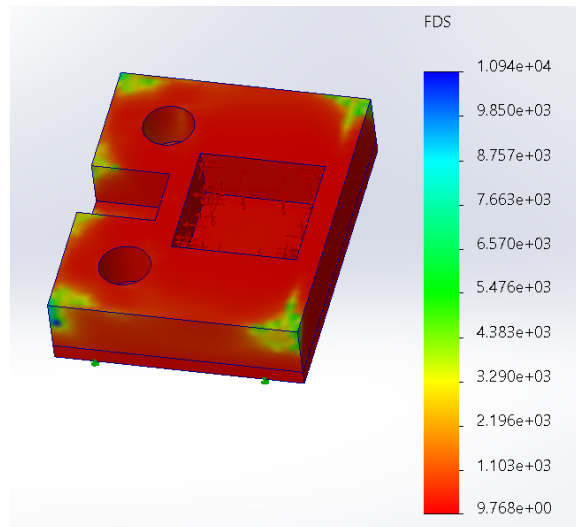


Figura 4.19 Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde con geometría cuadrada fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, mediante análisis por elemento finito en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

En la Figura 4.19 se determina la distribución del factor de seguridad (FDS) correspondiente al molde con geometría cuadrada, considerada como una configuración intermedia, fabricado en PETG, bajo una presión uniforme de 0.37 MPa. Se observa que el factor de seguridad se mantiene ampliamente por encima de la unidad en la totalidad del modelo, incluso en las zonas de mayor sollicitación mecánica localizadas en las paredes internas de la cavidad y en las transiciones geométricas.

El valor mínimo del factor de seguridad es del orden de 9.8, lo que indica un amplio margen de seguridad frente a la carga de

compactación considerada. Estos resultados confirman que el diseño del molde con geometría cuadrada presenta un comportamiento estructural seguro bajo las condiciones de operación analizadas, manteniéndose completamente dentro del régimen elástico del material.

Los resultados obtenidos con el material PLA se muestran a continuación:

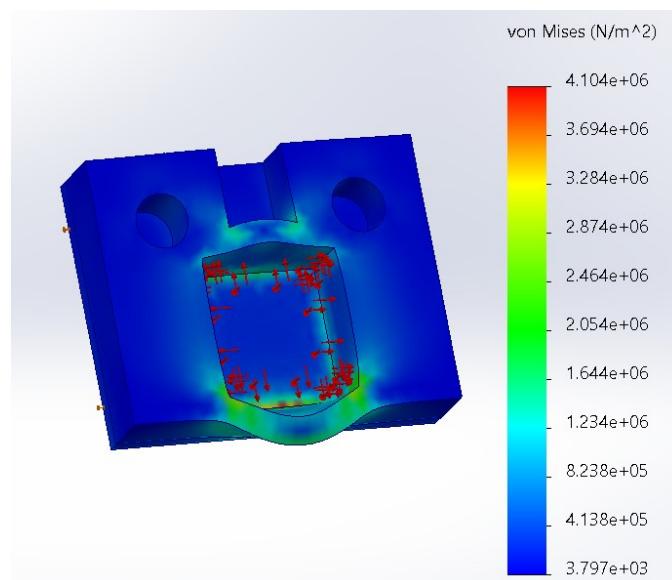


Figura 4.20 Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría cuadrada fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, mediante análisis por elemento finito en SolidWorks Simulation.

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación numérica.

En la Figura 4.20 se observa la distribución del esfuerzo equivalente de von Mises correspondiente al molde con geometría cuadrada de material PLA, bajo una presión uniforme de 0.37 MPa.

Se observa que los mayores esfuerzos se concentran en las paredes internas de la cavidad y en las zonas de transición geométrica,

asociadas a los cambios de sección. El valor máximo del esfuerzo equivalente es del orden de 4.1 MPa, significativamente menor que el límite de compresión del material, lo que confirma un comportamiento estructural seguro bajo las condiciones de carga analizadas.

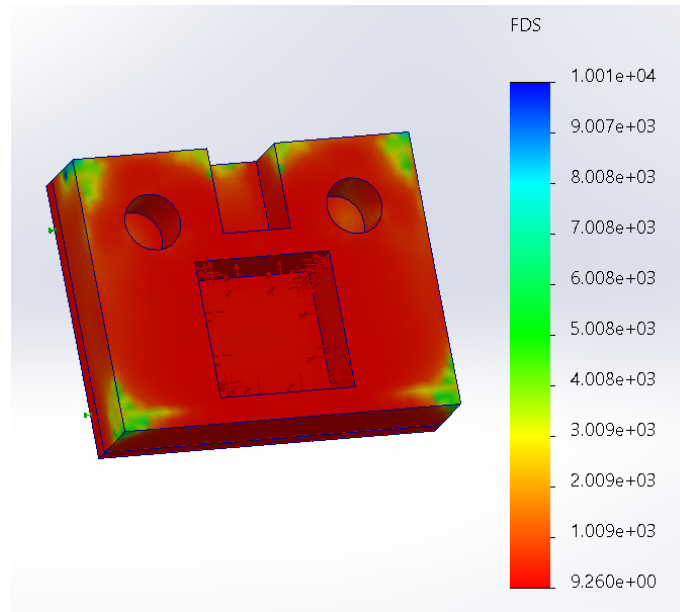


Figura 4.21 Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde con geometría cuadrada fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, mediante análisis por elemento finito en SolidWorks Simulation. **Fuente:** elaboración propia a partir de simulación numérica.

La Figura 4.21 muestra la distribución del factor de seguridad (FDS) correspondiente al molde con geometría cuadrada fabricado en PLA, bajo una presión uniforme de 0.37 MPa.

Se observa que el factor de seguridad se mantiene ampliamente por encima de la unidad en la totalidad del modelo, incluso en las zonas de mayor sollicitación mecánica localizadas en las paredes internas de la cavidad y en las regiones de transición geométrica.

El valor mínimo del factor de seguridad es del orden de 9, lo que indica un amplio margen frente a la carga de compactación considerada. Estos resultados confirman que el diseño del molde en PLA presenta un comportamiento estructural seguro y se mantiene dentro del régimen elástico bajo las condiciones de carga analizadas

4.6.3 Tercera configuración geométrica: molde hexagonal

La tercera configuración geométrica analizada corresponde al molde con cavidad hexagonal, el cual se considera el nivel más alto de complejidad geométrica entre los diseños evaluados y, por tanto, la configuración más crítica desde el punto de vista estructural. Para esta geometría se analizó el comportamiento mecánico de insertos poliméricos fabricados en PLA y PETG, mediante simulaciones por el método de elementos finitos, bajo las condiciones de carga previamente definidas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para ambos materiales.

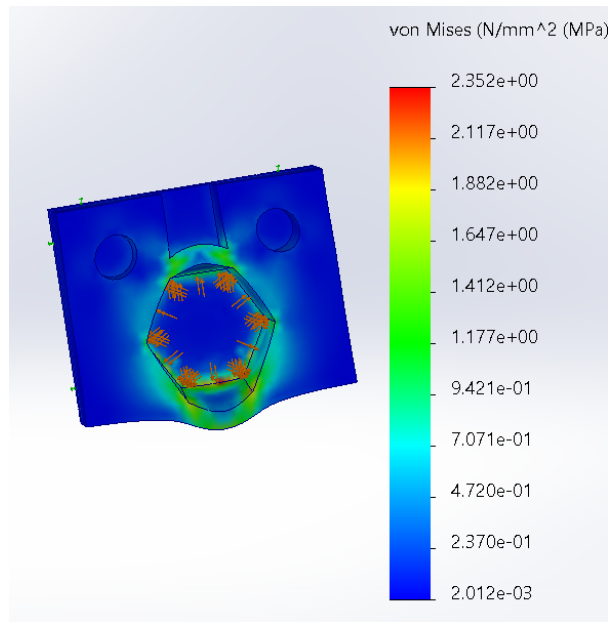


Figura 4.22 Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría hexagonal fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, mediante análisis por elemento finito en SolidWorks Simulation.

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación numérica.

Se muestra la distribución del esfuerzo equivalente de von Mises en la Figura 4.22, correspondiente al molde con geometría hexagonal, considerada como la configuración más crítica, fabricado en PETG, bajo una presión uniforme de 0.37 MPa aplicada sobre la superficie activa de la cavidad.

Los mayores esfuerzos se concentran en las paredes internas de la cavidad y en las zonas de transición geométrica asociadas a las aristas internas del hexágono, las cuales generan concentraciones de esfuerzo más elevadas en comparación con geometrías más suaves.

Del análisis numérico se observa que el valor máximo del esfuerzo equivalente es del orden de 2.35 MPa, el cual resulta significativamente menor que el límite de compresión estimado para

el PETG ($\sigma_c = 50$ MPa). Esta relación confirma que, aun en la geometría más desfavorable analizada, el material se mantiene completamente dentro del régimen elástico y no presenta riesgo de falla estructural bajo las condiciones de carga consideradas.

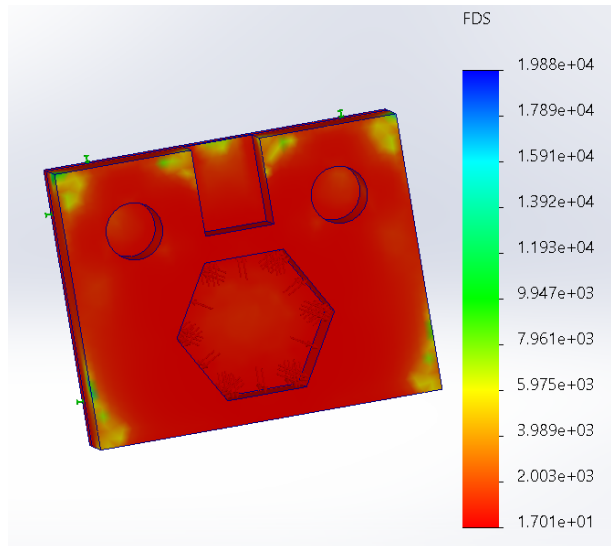


Figura 4.23 Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde con geometría hexagonal fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, mediante análisis por elemento finito en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

A partir de la Figura 4.23, se observa que el factor de seguridad se mantiene ampliamente por encima de la unidad en la totalidad del modelo, incluso en las zonas de mayor concentración de esfuerzos asociadas a las aristas internas de la cavidad.

El valor mínimo del factor de seguridad es del orden de 17, lo que indica un amplio margen de seguridad frente a la carga de compactación considerada. Estos resultados confirman que, aun bajo la geometría más desfavorable analizada, el molde fabricado en PETG presenta un comportamiento estructural seguro y se mantiene dentro del régimen elástico bajo las condiciones de operación evaluadas.

Para el molde de material PLA se analizó lo siguiente:

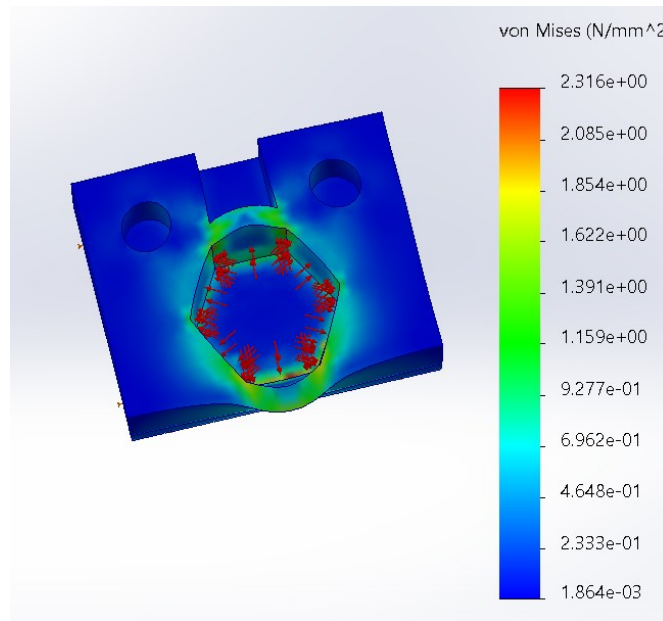


Figura 4.24 Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría hexagonal fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, mediante análisis por elemento finito en SolidWorks Simulation.

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación numérica.

A partir de la Figura 4.24, se observa que los mayores esfuerzos equivalentes se concentran en las aristas internas de la cavidad hexagonal y en las zonas de transición geométrica entre la cavidad y el cuerpo del molde. Este patrón de distribución es consistente con la presencia de múltiples aristas pronunciadas, las cuales generan concentraciones de esfuerzo superiores a las observadas en geometrías más simples, como las cavidades circular y cuadrada.

De acuerdo con la escala de resultados obtenida en la simulación, el valor máximo del esfuerzo equivalente de von Mises es del orden de 2.3 MPa, el cual resulta significativamente menor que el límite de compresión estimado para el PLA (47.5 MPa). Esta relación confirma que, aun en la geometría considerada como la más crítica entre los

diseños evaluados, el material se mantiene completamente dentro del régimen elástico, sin presentar riesgo de falla estructural bajo las condiciones de carga analizadas.

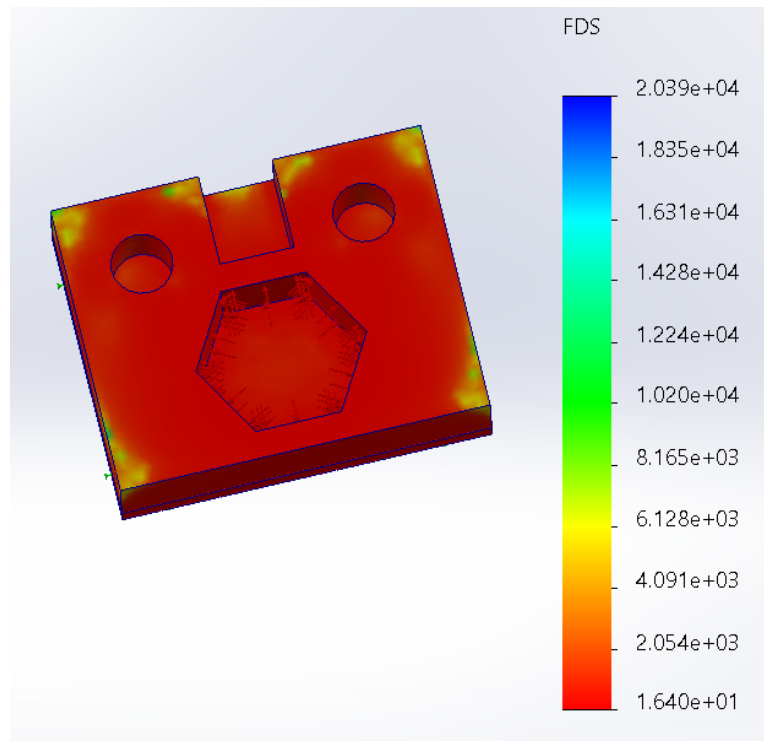


Figura 4.25 Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde con geometría hexagonal fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, mediante análisis por elemento finito en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

De la Figura 4.25 se observa que el factor de seguridad se mantiene ampliamente por encima de la unidad en la totalidad del modelo, incluso en las zonas de mayor concentración de esfuerzos localizadas en las aristas internas de la cavidad hexagonal. Este comportamiento confirma que, a pesar de tratarse de la configuración geométrica más crítica evaluada, el molde fabricado en PLA presenta un margen de seguridad elevado frente a la carga de compactación aplicada.

El valor mínimo del factor de seguridad se mantiene considerablemente por encima del umbral de falla dando como resultado 16, lo que indica que el diseño conserva un comportamiento estructural seguro y estable, sin riesgo de deformación permanente ni falla bajo las condiciones de operación consideradas.

A continuación, se muestran los resultados en la Tabla 4.14 donde se confirma que, aun en la geometría más desfavorable analizada, el diseño del molde presenta un comportamiento estructural seguro y se mantiene dentro del régimen elástico bajo las condiciones de operación evaluadas.

Tabla 4.14 Comparación de resultados estructurales de los moldes poliméricos según geometría y material.

Geometría	Material	σ von Mises máx (Mpa)	Límite de compresión σ_c (Mpa)	FDS mín	Evaluación estructural
Circular	PLA	≈ 1.0	47.5	≈ 37	Comportamiento estructural seguro; geometría favorable
Circular	PETG	≈ 1.0	50.0	≈ 40	Comportamiento estructural seguro; mayor margen de seguridad
Cuadrada	PLA	≈ 4.1	47.5	≈ 9.0	Comportamiento estructural seguro; geometría intermedia
Cuadrada	PETG	≈ 4.1	50.0	≈ 9.8	Comportamiento estructural seguro; desempeño comparable

Geometría	Material	σ von Mises máx (Mpa)	Límite de compresión σ_c (Mpa)	FDS mín	Evaluación estructural
Hexagonal	PLA	≈ 2.3	47.5	≈ 16	Comportamiento estructural seguro; geometría más exigente
Hexagonal	PETG	≈ 2.3	50.0	≈ 17	Comportamiento estructural seguro; diseño conservador

Fuente: Elaboración propia con base en simulaciones numéricas realizadas en SolidWorks Simulation.

Con base en los resultados obtenidos mediante simulación numérica, tanto el PLA como el PETG mostraron un comportamiento estructural seguro bajo la presión de compactación considerada, manteniéndose en todos los casos dentro del régimen elástico y con factores de seguridad ampliamente superiores a la unidad. Para todas las configuraciones geométricas analizadas, los valores máximos del esfuerzo equivalente de von Mises se mantuvieron significativamente por debajo de los límites de compresión estimados, lo que evidencia un desempeño mecánico adecuado de los moldes bajo las condiciones de carga evaluadas.

El análisis comparativo entre materiales permitió identificar que el PETG presenta de manera consistente valores ligeramente superiores del factor de seguridad en comparación con el PLA, lo que indica un mayor margen frente a la carga aplicada. No obstante, el PLA mostró niveles de esfuerzo reducidos, confirmando un comportamiento estructural adecuado para la aplicación analizada. En este sentido, el

PETG puede considerarse el material más conservador desde el punto de vista estructural, mientras que el PLA representa una alternativa viable cuando se priorizan criterios como rigidez, facilidad de impresión y estabilidad dimensional. La elección final del material depende, por tanto, del enfoque del diseño y de las condiciones específicas de operación del molde.

Por otra parte, la comparación entre geometrías permitió identificar que la cavidad circular presenta el desempeño estructural más favorable, caracterizado por una distribución más homogénea de esfuerzos y los mayores factores de seguridad, debido a la ausencia de aristas internas. La geometría cuadrada mostró un comportamiento intermedio, mientras que la geometría hexagonal fue identificada como la configuración más exigente desde el punto de vista geométrico debido a la presencia de aristas internas; sin embargo, aun en este caso, los valores de esfuerzo y factor de seguridad indican que el comportamiento estructural permanece dentro de rangos seguros, sin riesgo de falla bajo las condiciones de carga evaluadas.

En conjunto, los resultados del análisis estructural validan la viabilidad de los diseños propuestos de moldes para adocretos fabricados en PLA y PETG bajo las condiciones de carga analizadas, y proporcionan una base técnica sólida para la selección de materiales y geometrías en la etapa de diseño y manufactura de prototipos, así como para la discusión general de resultados presentada en el apartado siguiente.

4.7 Implicaciones del análisis estructural y de manufactura en el diseño del molde

Los resultados obtenidos mediante el análisis estructural por el método de elementos finitos permiten discutir de manera integral la viabilidad técnica de los diseños propuestos de moldes para adocretos, así como su relación directa con el proceso de diseño y manufactura. Las simulaciones numéricas, realizadas bajo condiciones de carga representativas del proceso real de compactación manual, mostraron que todas las configuraciones geométricas y materiales evaluados presentan un comportamiento estructural seguro, manteniéndose dentro del régimen elástico y sin riesgo de falla.

Las condiciones de operación consideradas en el análisis reproducen de manera simplificada el funcionamiento real del sistema de moldeo, el cual incluye la aplicación de carga mediante un pisón manual, el apoyo del molde sobre una mesa vibradora y las etapas posteriores de desmoldeo. Bajo este contexto operativo, los esfuerzos inducidos se concentran principalmente en las paredes internas de la cavidad y en las zonas internas geométricas, particularmente en aquellas configuraciones que presentan cambios de sección y aristas internas, tal como se observó en los mapas de esfuerzo equivalente de von Mises.

Desde el punto de vista del diseño del molde, los resultados confirman que es técnicamente viable emplear materiales poliméricos fabricados mediante manufactura aditiva, como PLA y PETG, en combinación con una base de acero, sin comprometer la integridad estructural del conjunto. Este enfoque de manufactura híbrida permite

asignar el acero a los elementos que soportan las solicitaciones globales del sistema, mientras que las cavidades responsables de la conformación del adocreto pueden fabricarse mediante impresión 3D, aprovechando la flexibilidad geométrica y la rapidez del proceso.

El análisis comparativo entre geometrías evidenció que la forma de la cavidad influye de manera significativa en la distribución de esfuerzos. La geometría circular mostró una distribución más homogénea y los menores niveles de esfuerzo, mientras que la geometría cuadrada presentó un comportamiento intermedio. Por su parte, la geometría hexagonal fue identificada como la más exigente debido a la presencia de aristas internas; sin embargo, aun en este caso, los valores máximos de esfuerzo se mantuvieron considerablemente por debajo de los límites de compresión estimados para los materiales analizados, y los factores de seguridad obtenidos fueron ampliamente superiores a la unidad.

En conjunto, estos resultados respaldan la factibilidad de sustituir parcialmente la manufactura convencional de moldes completamente metálicos por un esquema de manufactura híbrida que integra manufactura aditiva y procesos sustractivos. El análisis estructural no solo valida la resistencia mecánica de los moldes propuestos bajo condiciones reales de operación, sino que también proporciona criterios técnicos para el diseño geométrico, permitiendo equilibrar seguridad estructural, funcionalidad y libertad de diseño, aspectos fundamentales para el desarrollo de moldes adaptables y eficientes.

4.8 Impacto en tiempos, costos y personalización del proceso productivo

Los resultados obtenidos en el análisis estructural y en el diagnóstico empresarial permiten discutir el impacto potencial de la propuesta de manufactura híbrida en términos de tiempos de fabricación, costos y posibilidades de personalización del producto. Este análisis se apoya en la información recabada mediante encuestas aplicadas a cinco empresas del sector de prefabricados, seleccionadas por conveniencia, con un enfoque exploratorio orientado a identificar tendencias generales relevantes para los objetivos de la investigación.

En relación con los tiempos de fabricación, las empresas consultadas señalaron que la manufactura convencional de moldes metálicos implica periodos prolongados de diseño, mecanizado y ajustes, que pueden extenderse a varios meses antes de contar con un molde funcional. En contraste, la propuesta basada en manufactura aditiva para la fabricación de las cavidades del molde, en combinación con una base metálica fabricada mediante procesos sustractivos, permite reducir significativamente los tiempos asociados a la etapa de fabricación del molde. La impresión 3D de componentes poliméricos posibilita la obtención de geometrías funcionales en escalas de horas o días, lo que representa una ventaja sustancial en términos de rapidez de respuesta frente a modificaciones de diseño o requerimientos específicos del cliente.

Respecto a los costos de manufactura, el presente trabajo no realizó una cuantificación económica detallada del proceso completo de manufactura del molde. No obstante, a partir de la información

proporcionada por las empresas encuestadas y de los costos aproximados de los insumos utilizados en manufactura aditiva, como filamentos de PLA y PETG, es posible establecer una comparación cualitativa. Las empresas señalaron que los moldes metálicos representan una inversión elevada, particularmente cuando se requieren cambios de diseño o reposiciones frecuentes. En este contexto, el uso de manufactura aditiva para las partes intercambiables del molde se perfila como una alternativa con potencial de reducción de costos, al disminuir el consumo de material metálico, los tiempos de mecanizado y la necesidad de rehacer moldes completos ante modificaciones geométricas. Esta apreciación se presenta como una tendencia identificada en el diagnóstico, más que como un resultado cuantitativo, y abre la posibilidad para futuros estudios de evaluación económica detallada.

Un aspecto especialmente relevante identificado tanto en el diagnóstico empresarial como en el desarrollo del prototipo es la personalización de los adocretos. Las empresas manifestaron interés en contar con moldes que permitan variar geometrías, dimensiones o patrones superficiales sin incurrir en los altos costos y tiempos asociados a la manufactura de nuevos moldes metálicos. En este sentido, la manufactura aditiva ofrece una ventaja significativa, al permitir la modificación rápida de las cavidades del molde mediante ajustes en el modelo CAD, facilitando la producción de adocretos personalizados o series cortas adaptadas a requerimientos específicos del mercado. La posibilidad de intercambiar cavidades impresas sobre una misma base metálica refuerza esta flexibilidad, alineándose

directamente con uno de los objetivos centrales de la presente investigación.

En conjunto, el análisis realizado sugiere que la integración de manufactura aditiva y manufactura sustractiva en el diseño de moldes para adocretos tiene un impacto positivo en la reducción de tiempos de fabricación, presenta un potencial de disminución de costos desde un enfoque cualitativo y amplía de manera significativa las posibilidades de personalización del producto final. Estos aspectos posicionan a la manufactura híbrida como una alternativa viable y atractiva frente a los procesos convencionales, particularmente en contextos donde la flexibilidad, la rapidez de respuesta y la adaptación al mercado constituyen factores clave del proceso productivo

4.9 Propuesta de diseño y desarrollo de moldes para adocretos mediante CAX

La presente investigación propone un esquema de diseño y desarrollo de moldes para adocretos basado en la integración de CAX (Computer Aided Technologies), que incluyen herramientas CAD, CAE y CAM, junto con procesos de manufactura aditiva y sustractiva. La propuesta se fundamenta en el desarrollo de un molde híbrido conformado por insertos poliméricos fabricados mediante impresión 3D y una base estructural de acero, con el fin de ofrecer una alternativa técnica viable frente a la manufactura convencional de moldes completamente metálicos.

Con el propósito de representar de manera estructurada las etapas que conforman la propuesta tecnológica, en la Figura 4.26 se presenta el esquema del sistema CAX propuesto para el diseño y evaluación conceptual de moldes híbridos para adocretos. Este esquema resume el flujo de actividades que inicia con el diagnóstico del sector de prefabricados y culmina con la evaluación conceptual del sistema propuesto, integrando herramientas de diseño digital, selección de materiales, simulación estructural mediante el método de elementos finitos y procesos de manufactura aditiva y sustractiva.

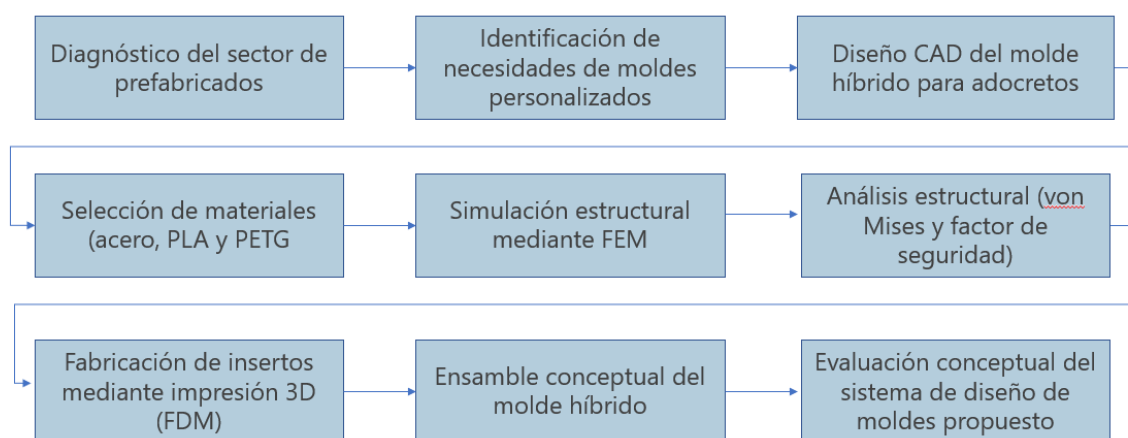


Figura 4.26 Esquema del sistema CAX propuesto para el diseño y evaluación conceptual de moldes híbridos para adocretos. **Fuente:** Elaboración propia.

A partir de este esquema, el proceso inicia con el diagnóstico del sector de prefabricados de concreto, mediante el cual se identifican las necesidades relacionadas con la personalización de moldes y las limitaciones presentes en los procesos tradicionales de fabricación.

Con base en esta información, se procede a la identificación de requerimientos de diseño para moldes personalizados, lo que permite

definir las características geométricas y funcionales del molde propuesto.

Posteriormente, se desarrolla el diseño CAD del molde híbrido para adocretos, el cual integra una base metálica y componentes intercambiables fabricados mediante manufactura aditiva. En esta etapa se definen las dimensiones, las geometrías y las configuraciones necesarias para garantizar la funcionalidad del molde y su adaptabilidad a diferentes diseños de adocretos.

Una vez definido el diseño, se realiza la selección de materiales considerando las propiedades mecánicas y las condiciones de operación del molde. En este caso, se contemplan materiales como acero para la base estructural y polímeros como PLA y PETG para los insertos fabricados mediante impresión 3D.

Posteriormente, el modelo es sometido a un proceso de simulación estructural mediante el método de elementos finitos (FEM), con el objetivo de analizar el comportamiento mecánico de los insertos poliméricos bajo condiciones de carga controladas. A partir de estas simulaciones se obtienen indicadores de desempeño estructural, tales como el esfuerzo equivalente de von Mises y el factor de seguridad, los cuales permiten evaluar la viabilidad técnica del diseño propuesto.

Con base en los resultados de la simulación, se plantea la posibilidad de fabricar los insertos mediante impresión 3D utilizando tecnología FDM, lo que permitiría aprovechar la flexibilidad geométrica de la manufactura aditiva para generar componentes personalizados de manera rápida y con un uso eficiente de material. Este planteamiento

se considera como una alternativa tecnológica para el desarrollo futuro de moldes híbridos en el sector de prefabricados de concreto.

Posteriormente, se propone el ensamble conceptual del molde híbrido, integrando insertos poliméricos con una base metálica del molde. Esta configuración permitiría combinar las ventajas de la manufactura aditiva, en términos de flexibilidad y personalización, con la rigidez estructural proporcionada por la base metálica.

Finalmente, se plantea una evaluación conceptual del sistema CAX propuesto, considerando su potencial para mejorar la flexibilidad en el diseño de moldes personalizados y su posible contribución a la optimización de los procesos de desarrollo de moldes en empresas de prefabricados de concreto. De esta manera, se analizan alternativas tecnológicas orientadas a la innovación en el diseño de moldes, sin contemplar su implementación industrial directa dentro del alcance del presente estudio.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones generales

El presente trabajo permitió analizar y evaluar una propuesta de diseño y desarrollo de moldes para adocretos mediante el uso de CAX (Computer Aided Technologies), integrando manufactura aditiva y procesos sustractivos dentro de un enfoque de manufactura híbrida. A partir del análisis estructural realizado mediante simulación numérica por el método de elementos finitos, se evaluó el comportamiento mecánico de los diseños propuestos bajo las condiciones de carga asociadas al proceso de compactación manual.

Los resultados obtenidos mostraron que, para todas las configuraciones geométricas evaluadas y para los materiales poliméricos analizados (PLA y PETG), los valores máximos del esfuerzo equivalente de von Mises se mantuvieron significativamente por debajo de los límites de compresión estimados, y los factores de seguridad fueron ampliamente superiores a la unidad. Estos resultados indican que los moldes propuestos operan dentro del régimen elástico y no presentan riesgo de falla estructural bajo las condiciones de operación consideradas.

Asimismo, el análisis comparativo entre geometrías permitió identificar que la cavidad circular presenta el desempeño estructural más favorable, seguida de la geometría cuadrada, mientras que la geometría hexagonal fue identificada como la más exigente desde el punto de vista geométrico debido a la presencia de aristas internas. No obstante, incluso en esta última configuración, los resultados

indican un comportamiento estructural seguro, lo que respalda la factibilidad de emplear geometrías personalizadas sin comprometer la integridad estructural del molde.

Desde el punto de vista del material, se concluye que tanto el PLA como el PETG son viables para la fabricación de insertos poliméricos mediante impresión 3D. El PETG presentó de manera consistente factores de seguridad ligeramente superiores, lo que lo posiciona como una opción más conservadora desde el punto de vista estructural, mientras que el PLA demostró un desempeño adecuado cuando se priorizan criterios como rigidez, facilidad de impresión y estabilidad dimensional.

En relación con la base estructural del molde, esta fue modelada como un componente de acero con función de soporte y restricción, empleando como referencia un acero estructural tipo A36, comúnmente utilizado en aplicaciones industriales y de moldes. Si bien la base de acero no fue objeto de un análisis estructural detallado dentro del presente estudio, su inclusión en el modelo permitió representar de manera adecuada las condiciones de apoyo y funcionamiento del sistema híbrido, garantizando la coherencia del análisis estructural del conjunto.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten concluir que la propuesta desarrollada constituye una alternativa técnicamente viable para el diseño conceptual de moldes híbridos para adocretos mediante CAX frente a la manufactura convencional de moldes completamente metálicos. En el contexto de la empresa de

prefabricados de concreto ubicada en Mineral del Chico, Hidalgo, esta propuesta responde directamente a la problemática identificada en el planteamiento del problema, al plantear una alternativa tecnológica orientada a mejorar la flexibilidad en el diseño de moldes personalizados y a reducir la incertidumbre asociada al comportamiento estructural del molde antes de su posible fabricación.

5.2 Aportaciones del estudio

Entre las principales aportaciones del presente trabajo se destacan las siguientes:

- Se estableció un marco metodológico basado en CAX (Computer Aided Technologies) que integra diagnóstico empresarial, modelado CAD, simulación estructural mediante el método de elementos finitos y análisis comparativo de materiales. Este enfoque metodológico puede ser replicado en otras empresas del sector de prefabricados de concreto para el análisis y desarrollo de moldes personalizados.
- Se desarrolló una propuesta conceptual de molde híbrido para la fabricación de adocretos, que integra insertos poliméricos fabricados mediante impresión 3D y una base estructural de acero, planteando una alternativa tecnológica frente a la manufactura convencional de moldes completamente metálicos.
- Se evaluó el comportamiento estructural de diferentes configuraciones geométricas de cavidades (circular, cuadrada y hexagonal) mediante simulación numérica, lo que permitió establecer

criterios técnicos para la selección de geometrías en función de su desempeño mecánico.

- Se analizó la viabilidad del uso de materiales poliméricos impresos mediante manufactura aditiva, específicamente PLA y PETG, como alternativa para la fabricación de insertos utilizados en moldes de prototipado.
- Se aportó evidencia técnica sobre el potencial de CAX y la manufactura aditiva y sustractiva como elementos que pueden contribuir al desarrollo de soluciones de diseño más flexibles y al fortalecimiento tecnológico de empresas del sector de prefabricados de concreto.

5.3 Recomendaciones para trabajos futuros

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio, se proponen las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones:

- **Fabricar físicamente el prototipo del molde híbrido y realizar pruebas experimentales de compactación**, con el propósito de validar los resultados obtenidos mediante simulación numérica y comparar el comportamiento real del sistema con los resultados teóricos.
- **Analizar estructuralmente la base metálica del molde**, considerando distintos tipos de acero utilizados en moldes industriales, con el fin de evaluar su influencia en el desempeño global del sistema híbrido.

- **Desarrollar un análisis económico comparativo**, que permita estimar los costos de fabricación del molde híbrido en comparación con moldes convencionales de acero, considerando variables como materiales, tiempos de fabricación y mano de obra.
- **Evaluar el comportamiento del molde bajo cargas cíclicas y condiciones de desgaste**, con el objetivo de estimar su vida útil, su desempeño a largo plazo y la frecuencia de reemplazo de los insertos poliméricos.
- **Explorar la aplicación del modelo de diseño basado en CAX** propuesto en otros productos prefabricados de concreto, ampliando el alcance de la investigación hacia diferentes tipos de piezas y posibles aplicaciones dentro del sector de prefabricados.

BIBLIOGRAFÍA

- Adam, E. E., & Ebert, R. J. (1991). *Administración de la producción y las operaciones: Conceptos, modelos y funcionamiento*. Pearson Educación.
- Afridi, A., Al Rashid, A., & Koç, M. (2024). Recent advances in the development of stereolithography-based additive manufacturing processes: A review of applications and challenges. *Bioprinting*, 43, e00360. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2024.e00360>
- Al Rashid, A., Khan, S. A., Al-Ghamdi, S. G., & Koç, M. (2020). Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. *Automation in Construction*, 118, 103268. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103268>
- Altaf, K., Qayyum, J. A., Rani, A. M. A., Ahmad, F., Megat-Yusoff, P. S. M., Baharom, M., Aziz, A. R. A., Jahanzaib, M., & German, R. M. (2018). Performance analysis of enhanced 3D printed polymer molds for metal injection molding process. *Metals*, 8(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/met8060433>
- Baneshi, V., Dehghan, S. M., & Hassanli, R. (2023). An experimental study on the behavior of interlocking masonry blocks manufactured using 3D printed mold. *Advances in Structural Engineering*, 26(2), 360-380. <https://doi.org/10.1177/13694332221126595>
- Bhaskaran, B., Nallasivam, J. D., & Aravinth, S. (2024). *The art of material removal: An overview of subtractive manufacturing*. https://www.researchgate.net/publication/379248680_THE_ART_OF_MATERIAL_REMOVING_AN_OVERVIEW_OF_SUBTRACTIVE_MANUFACTURING
- Black, R. (1996). The Manufacturing Process. En R. Black (Ed.), *Design and Manufacture: An Integrated Approach* (pp. 115-121). Macmillan Education UK. https://doi.org/10.1007/978-1-349-13429-8_6
- Boothroyd Dewhurst, Inc. (2025). *Historia de DFMA*. <https://www.dfma.com/origins.asp>

- Braian, M., Jönsson, D., Kevci, M., & Wennerberg, A. (2018). Geometrical accuracy of metallic objects produced with additive or subtractive manufacturing: A comparative in vitro study. *Dental Materials*, 34(7), 978-993. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.03.009>
- Brown, T. (2008). Design Thinking. *Harvard Business Review*.
<https://designthinkingmeite.web.unc.edu/wp-content/uploads/sites/22337/2020/02/Tim-Brown-Design-Thinking.pdf>
- Buchanan, C., Matilainen, V.-P., Salminen, A., & Gardner, L. (2017). Structural performance of additive manufactured metallic material and cross-sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 136, 35-48. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.05.002>
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Cabrera, S. P., Darras, G. L., & Losa, N. R. (2024). *Evaluación del proceso de prensado en la fabricación de bloques de tierra comprimida*. CONICET.
<https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/238178>
- Callister, W. D. Jr., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th Edition). John Wiley & Sons. <https://studyres.com/doc/24487605/>
- Carbas, R. J. C., Palmares, M. P., & da Silva, L. F. M. (2020). Experimental and FE study of hybrid laminates aluminium carbon-fibre joints with different lay-up configurations. *Manufacturing Review*, 7, 2-13. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2019027>
- Carrasco García, J. C. (2006). Tecnología avanzada del diseño y manufactura asistidos por computador- CAD/CAM. *Prospectiva*, 4(1), 75-81.
- Carro Paz, R., & González Gómez, D. (2012). *El sistema de producción y operaciones*. Centro de Documentación, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Universidad Nacional de Mar del Plata.

- Castro Castaneda, K. A. (2019). Proceso de fabricación y reparación de moldes para inyección de plástico utilizando herramientas de diseño y manufactura asistida por computadora. *Revista Tecnológica*, (12).
- Chaparro Chaparro, F., & Martínez Simbaqueba, J. J. (2023). *Manufactura aditiva aplicada*. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). <https://hdl.handle.net/20.500.14329/576>
- Chua, C. K., Leong, K. F., & An, J. (2020). Introduction to rapid prototyping of biomaterials. En *Rapid Prototyping of Biomaterials* (pp. 1-15). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102663-2.00001-0>
- Dassault Systèmes. (2022, diciembre 12). *Fabricación aditiva frente a sustractiva*. <https://www.3ds.com/es/make/solutions/blog/additive-vs-subtractive-manufacturing>
- Dassault Systèmes. (2023). *SolidWorks Simulation* (Versión 2023) [Software]. Dassault Systèmes. <https://www.solidworks.com>
- DeBoer, B., Nguyen, N., Diba, F., & Hosseini, A. (2021). Additive, subtractive, and formative manufacturing of metal components: A life cycle assessment comparison. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(1-2), 413-432. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07173-5>
- Del Giorgio Solfa, F., Amendolaggine, G., & Alvarado Wall, T. A. (2018). Nuevos paradigmas para el diseño de productos. Design Thinking, Service Design y experiencia de usuario. *Arte e Investigación*, (14), e012. <https://doi.org/10.24215/24691488e012>
- Diaz-Perete, D., Mercado-Colmenero, J. M., Valderrama-Zafra, J. M., & Martin-Doñate, C. (2020). New procedure for BIM characterization of architectural models manufactured using fused deposition modeling and plastic materials in 4.0 advanced construction environments. *Polymers*, 12(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/polym12071498>
- Dillon, A. P., & Shingo, S. (1985). *A Revolution in Manufacturing: The SMED System*. CRC Press.

- Dispreh. (2023). *Aplicaciones y beneficios de los adocretos*.
<https://www.dispreh.com/post/aplicaciones-y-beneficios-de-los-adocretos>
- Donley, M. (2024, abril 9). Guía de mecanizado CNC. *Setco*. <https://www.setco.com/es/blog/a-guide-to-cnc-machining/>
- Dutta, S. S. (2024). Lean Manufacturing and Process Optimization: Enhancing Efficiency in Modern Production. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 10(5), Article 5. <https://doi.org/10.32628/CSEIT241051024>
- Esmaelian, B., Behdad, S., & Wang, B. (2016). The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 39, 79-100.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001>
- Fajardo Roldan, C. A. (2022). *Manufactura aditiva en materiales poliméricos por procesos 3D FDM*.
<http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/5315>
- Ferraris, S. D. (Ed.). (2023). *The Role of Prototypes in Design Research: Overview and Case Studies*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-24549-7>
- Goudswaard, M., Real, R., Snider, C., Camargo, L. E. M., Zamora, N. S., & Hicks, B. (2023). Knowledge dimensions in prototyping: Investigating the what, when and how of knowledge generation during product development. *Design Science*, 9, e26.
<https://doi.org/10.1017/dsj.2023.24>
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems* (4.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Gudeta, E. A., & Kim, J. Y. (2024). Appropriate Technology: Construction of Cobblestone Roads. *Journal of Technology and Innovative Knowledge*, 1(1), Article 1.

- Harrison, N. (2024, noviembre 6). 12 tipos de máquinas CNC explicados: ¿cuál es la mejor? *rapiddirect*. <https://www.rapiddirect.com/es/blog/12-types-of-cnc-machines/>
- He, F., Yuan, L., Mu, H., Ros, M., Ding, D., Pan, Z., & Li, H. (2023). Research and application of artificial intelligence techniques for wire arc additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *82*, 102525. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102525>
- Homburg, C., Schwemmler, M., & Kuehnl, C. (2015). New Product Design: Concept, Measurement, and Consequences. *Journal of Marketing*, *79*(3), 41-56. <https://doi.org/10.1509/jm.14.0199>
- Hsueh, M.-H., Lai, C.-J., Wang, S.-H., Zeng, Y.-S., Hsieh, C.-H., Pan, C.-Y., & Huang, W.-C. (2021). Effect of Printing Parameters on the Thermal and Mechanical Properties of 3D-Printed PLA and PETG, Using Fused Deposition Modeling. *Polymers*, *13*(11), 1758. <https://doi.org/10.3390/polym13111758>
- IBM. (2025). *IBM SPSS Statistics* [Software]. <https://www.ibm.com/spss>
- INEGI. (2024). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE)*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/descarga/>
- Jayawardane, H., Davies, I. J., Gamage, J. R., John, M., & Biswas, W. K. (2023). Sustainability perspectives: A review of additive and subtractive manufacturing. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, *2*, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100015>
- Joyanes Aguilar, L. (2017). *Industria 4.0: La cuarta revolución industrial*. Alpha Editorial.
- Kanishka, K., & Acherjee, B. (2023). Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials, developments, and challenges. *Journal of Manufacturing Processes*, *107*, 574-619. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.024>

- Khan, I., Tariq, M., Abas, M., Shakeel, M., Hira, F., Al Rashid, A., & Koç, M. (2023). Parametric investigation and optimisation of mechanical properties of thick tri-material based composite of PLA-PETG-ABS 3D-printed using fused filament fabrication. *Composites Part C: Open Access*, 12, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100392>
- Kharat, V. J., Singh, P., Sharath Raju, G., Kumar Yadav, D., Satyanarayana.Gupta, M., Arun, V., Hussein Majeed, A., & Singh, N. (2023). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.033>
- Kincaid, J., Zamoski, R., Charles, E., No, T., Bohling, J., Compton, B., & Schmitz, T. (2023). Hybrid manufacturing by additive friction stir deposition, metrology, CNC machining, and microstructure analysis. *Manufacturing Letters, 51st SME North American Manufacturing Research Conference (NAMRC 51)*, 35, 549-556. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.021>
- Koskinen, I., Zimmerman, J., Binder, T., Redstrom, J., & Wensveen, S. (2011). *Design Research Through Practice: From the Lab, Field, and Showroom*. Elsevier.
- Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639-649. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>
- Le, V., Tran, M., & Ding, S. (2024). Subtractive manufacturing of composite materials with robotic manipulators: A comprehensive review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 135(1), 81-117. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14427-5>
- Li, H., Shi, X., Wu, B., Corradi, D. R., Pan, Z., & Li, H. (2024). Wire arc additive manufacturing: A review on digital twinning and visualization process. *Journal of Manufacturing Processes*, 116, 293-305. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.001>

- Liu, J., & Wen, P. (2022). Metal vaporization and its influence during laser powder bed fusion process. *Materials & Design*, 215, 110505. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110505>
- Ma, J., Harstvedt, J. D., Dunaway, D., Bian, L., & Jaradat, R. (2018). An exploratory investigation of additively manufactured product life cycle sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, 192, 55-70. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.249>
- Martínez González, B., & Gaviño Ortiz, G. (2024). *Análisis de impacto en el diseño de los nuevos procesos de producción y tecnología*. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/141738>
- Meher, J., Nayak, B. B., Panda, A., Kumar, R., & Sahoo, A. K. (2022). Recent research development of CNC based milling machining conditions: A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, 62, 3983-3989. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.582>
- Merz, R., Prinz, F. B., Ramaswami, K., Terk, M., & Weiss, L. E. (1994). *Shape deposition manufacturing*. Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, USA. <https://repositories.lib.utexas.edu/server/api/core/bitstreams/8ddbfacb-0827-4a15-9fe6-3a149ff24c7e/content>
- Microsoft. (2025). *Microsoft Excel* [Software]. <https://www.microsoft.com/excel>
- Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: A review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3(1), 42-53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- Montoya, J., & Flórez, L. (2022). Manufactura aditiva: Tendencias, retos y caso de estudio en impresión 3D de hidrocoloides. En D. L. M. Baena Pérez, J. A. Tamayo Sepúlveda, & A. J. Benítez Lozano (Eds.), *Manufactura y gestión del ciclo de vida del producto (PLM)* (pp. 268-280). Universidad del Valle.
- Moura, C. G. de. (2019). A palavra design. *Eikon – Journal on Semiotics and Culture*, (5), 64-68.

- Mwema, F. M., & Akinlabi, E. T. (2020). Basics of Fused Deposition Modelling (FDM). En F. M. Mwema & E. T. Akinlabi (Eds.), *Fused Deposition Modeling: Strategies for Quality Enhancement* (pp. 1-15). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48259-6_1
- Nassehi, A., Newman, S., Dhokia, V., Zhu, Z., & Asrai, R. I. (2012). Using formal methods to model hybrid manufacturing processes. En H. A. ElMaraghy (Ed.), *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability* (pp. 52-56). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23860-4_8
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. CRC Press.
- ONNCCE. (2014). *NMX-C-314-ONNCCE-2014: Industria de la construcción – Mampostería – Adoquines para uso en pavimentos – Especificaciones y métodos de ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Pacheco Espejel, A. A., & Cruz Estrada, M. C. (2014). *Metodología Crítica de la Investigación*. Grupo Editorial Patria.
- Paolini, A., Kollmannsberger, S., & Rank, E. (2019). Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Additive Manufacturing*, 30, 100894. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>
- Part Manufacturing. (2023). *Tabla de propiedades de los filamentos para impresión 3D*. Part Manufacturing. <https://www.partmfg.com/es/3d-printing-filament-properties-table/>

- Powarsteam. (2022, diciembre 20). *Tecnologías de fabricación sustractiva*.
<https://docentes.powarsteam.com/fabricacion-digital/metodos-de-fabricacion-digital/tecnologias-de-fabricacion-sustractiva>
- Rabalo, M. A., Rubio, E. M., Agustina, B., & Camacho, A. M. (2023). Hybrid additive and subtractive manufacturing: Evolution of the concept and last trends in research and industry. *Procedia CIRP, 16th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 118*, 741-746. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.127>
- Rasiya, G., Shukla, A., & Saran, K. (2021). Additive manufacturing-A review. *Materials Today: Proceedings, 47*, 6896-6901. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.181>
- Salazar Henao, A. J., & Serna Pedreros, J. P. (2024). *Desarrollo de moldes impresos por manufactura aditiva para fabricar piezas en series cortas de materiales compuestos*.
<https://red.uao.edu.co/entities/publication/afd3eab7-9cd4-46c3-a65a-b0545b2bc7dd>
- Sastrawidana, D. K., Sukarta, I. N., Saraswati, L. P. A., Maryam, S., & Putra, G. A. (2022). Plastic waste reinforced with inorganic pigment from red stone in manufacturing paving block for pedestrian application. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 110(2)*, 49-58. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.7042>
- Sathish, K., Kumar, S. S., Magal, R. T., Selvaraj, V., Narasimharaj, V., Karthikeyan, R., Sabarinathan, G., Tiwari, M., & Kassa, A. E. (2022). A Comparative study on subtractive manufacturing and additive manufacturing. *Advances in Materials Science and Engineering, 2022(1)*, 6892641. <https://doi.org/10.1155/2022/6892641>
- Schneevogt, H., Stelzner, K., Yilmaz, B., Abali, B. E., Klunker, A., & Völlmecke, C. (2021). Sustainability in additive manufacturing: Exploring the mechanical potential of recycled PET filaments. *Composites and Advanced Materials, 30*, 26349833211000063.
<https://doi.org/10.1177/26349833211000063>

- Scott, C. (2023, marzo 30). Wohlers Report 2023 unveils continued double-digit growth. *Wohlers Associates*. <https://wohlersassociates.com/news/wohlers-report-2023-unveils-continued-double-digit-growth/>
- Segovia-Guerrero, L., Baladés, N., Gallardo-Galán, J. J., Gil-Mena, A. J., & Sales, D. L. (2025). Additive vs. Subtractive Manufacturing: A Comparative Life Cycle and Cost Analyses of Steel Mill Spare Parts. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(4), 138. <https://doi.org/10.3390/jmmp9040138>
- Sheikhi, M. R., & Kuşhan, M. C. (2021, junio 21). *Investigating Production of Polyurethane Elastomer Materials Using Shape Deposition Manufacturing Method*. 8th International Fiber and Polymer Research Symposium, Eskişehir, Turkey. https://www.researchgate.net/publication/352564361_Investigating_Production_of_Polyurethane_Elastomer_Materials_Using_Shape_Deposition_Manufacturing_Method
- Shenzhen Dadesin Prototype Co., Ltd. (2023). *Imagen del proceso de mecanizado CNC*. <https://www.dadesin.com/es/news/cnc-machining.html>
- Sociedad de Diseñadores Industriales de América. (2019, septiembre 17). *¿Qué es el diseño industrial?* Sociedad de Diseñadores Industriales de América. <https://www.idsa.org/about-idsa/advocacy/what-industrial-design/>
- Solís-Santamaría, S. I., Solís-Santamaría, T. M., Lasluisa-Naranjo, H. G., & Albán-Andrade, E. D. (2023). Evolución y utilidad del mecanizado CNC en el diseño industrial. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación.*, 6(11), Article 11.
- Spear, S., & Bowen, H. K. (1999). Decoding the DNA of the Toyota Production System. *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/1999/09/decoding-the-dna-of-the-toyota-production-system>

- Srinivasan, R., Ruban, W., Deepanraj, A., Bhuvanesh, R., & Bhuvanesh, T. (2020). Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1838-1842.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.797>
- Swift, K. G., & Booker, J. D. (2013). *Manufacturing process selection handbook*. Butterworth-Heinemann.
- Syrlybayev, D., Zharylkassyn, B., Seisekulova, A., Akhmetov, M., Perveen, A., & Talamona, D. (2021). Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts—A Critical Review. *Polymers*, 13(10), 1587. <https://doi.org/10.3390/polym13101587>
- Tabassum, R., Zaman, U. K. U., Baqai, A. A., Mazhar, A. R., & Butt, S. U. (2024). Hybrid additive manufacturing: A review from a process planning perspective. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 23(1), 227-262. (world).
<https://doi.org/10.1142/S0219686724500100>
- Tawfik, L., Chauvel, A. M., & Araiza, J. G. M. (1992). *Administración de la producción*. McGraw-Hill / Nueva Editorial Interamericana.
- Thyer, G. E. (2014). *Computer Numerical Control of Machine Tools*. Elsevier.
- Titu, A. M., & Pop, A. (2024). Implementation of CAD/CAM/CAE Systems for Improved Design and Manufacturing Processes in Industrial Organizations. *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*, 18, 3069-3078. <https://doi.org/10.2478/picbe-2024-0253>
- Tran, T. Q. (2025). Recent Advances in 3D Printing and Additive Manufacturing Technology. *Applied Sciences*, 15(17), 9599. <https://doi.org/10.3390/app15179599>
- United States Environmental Protection Agency. (2024). *3D Printing Research at EPA*.
<https://www.epa.gov/chemical-research/3d-printing-research-epa>

- Vera Lázaro, A. (2014). *Simulación con SolidWorks: Análisis estático lineal*. Macro.
- Vido, M., de Oliveira Neto, G. C., Lourenço, S. R., Amorim, M., & Rodrigues, M. J. F. (2024). Computer-Aided Design and Additive Manufacturing for Automotive Prototypes: A Review. *Applied Sciences*, 14(16), 7155. <https://doi.org/10.3390/app14167155>
- Von Bertalanffy, L. (1976). *Teoría general de los sistemas: Fundamentos, desarrollo, aplicaciones*. Fondo de Cultura Económica.
- Wagner, T., Herrmann, C., & Thiede, S. (2017). Industry 4.0 Impacts on Lean Production Systems. *Procedia CIRP*, 63, 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.041>
- Weflen, E. (2023). *Hybrid additive and subtractive manufacturing of large-scale and multi-material parts* [Doctoral dissertation, Iowa State University]. (ID 30813153). <https://www.proquest.com/openview/fe96389331c60e28e8dc15d9c5715713/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Wengren, J., & Rizk, A. (2024). Prototyping for Digital Innovation: Investigating the Impact of Digital Technology on Prototyping Elements. *Administrative Sciences*, 14(7), 142. <https://doi.org/10.3390/admsci14070142>
- Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., & Gorecky, D. (2015). Towards Industry 4.0—Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 579-584. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.143>
- WOD. (2025). *Definición de Diseño Industrial*. <https://wdo.org/about/definition/>
- Wojtyła, S., Klama, P., & Baran, T. (2017). Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(6), D80-D85. <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1285489>
- Wong, K. V., & Hernández, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>

Yehia, H. M., Hamada, A., Sebaey, T. A., & Abd-Elaziem, W. (2024). Selective Laser Sintering of Polymers: Process Parameters, Machine Learning Approaches, and Future Directions. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(5), 197. <https://doi.org/10.3390/jmmp8050197>

Yoon, H.-S., Lee, J.-Y., Kim, H.-S., Kim, M.-S., Kim, E.-S., Shin, Y.-J., Chu, W.-S., & Ahn, S.-H. (2014). A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1(3), 261-279. <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0033-0>

Živanović, S., Popović, M., Vorkapić, N., Pjević, M., & Slavković, N. (2020). An overview of rapid prototyping technologies using subtractive, additive and formative processes. *FME Transactions*, 48(2), 246-253. <https://doi.org/10.5937/fmet2001246Z>

ANEXOS

7.1 ANEXOS A

Encuesta a empresas externas sobre moldes para adocretos

Objetivo: Recabar información sobre el uso, costos, vida útil y desempeño de moldes para adocretos, así como explorar la viabilidad del uso de tecnologías CAD/CAM e impresión 3D en su diseño y fabricación.

Población: Empresas productoras de adocretos en el estado de Hidalgo que utilicen moldes.

Muestra: Mínimo 5 empresas seleccionadas por experiencia en moldes de adocretos.

Instrumento: Cuestionario estructurado con preguntas cerradas y abiertas.

Sección 1: Datos generales de la empresa

1. Nombre de la empresa: _____
2. Ubicación (ciudad y estado): _____
3. Tiempo de operación en el sector (años): _____

Sección 2: Moldes para adocretos

4. ¿Qué tipo de moldes utilizan actualmente?

Acero completo

Acero con inserto plástico

Otro: _____

5. ¿Con qué frecuencia reemplazan los moldes?

Cada 6 meses

Cada 1 año

Cada 2 años

Otro: _____

6. ¿Cuál es la vida útil promedio de un molde?

Menos de 6 meses

6 meses – 1 año

1 – 2 años

Más de 2 años

7. Factores que afectan la durabilidad de los moldes (puede marcar más de uno):

Compactación excesiva

Material del molde

Frecuencia de uso

Condiciones de almacenamiento

Otro: _____

Sección 3: Costos y adquisición

8. Costo promedio de un molde (MXN): _____

9. Tiempo promedio de adquisición de un molde (días): _____

Sección 4: Observaciones y mejoras

10. ¿Qué aspectos mejorarían en sus moldes actuales?

11. ¿Estarían interesados en moldes híbridos acero + inserto 3D (PLA o PETG)?

- Sí

- No
- Tal vez

12. ¿Qué tan viable considera el uso de sistemas CAD para apoyar el diseño y fabricación de moldes mediante impresión rápida (impresión 3D)? _____

13. ¿Qué beneficios o limitaciones percibe en la fabricación de moldes mediante impresión 3D, considerando que los moldes de acero suelen implicar costos elevados y tiempos de entrega de 2 a 3 meses? _____

14. Desde su experiencia, ¿cree que el uso de programas CAD/CAM permitiría diversificar los diseños de adocretos y hacerlos más flexibles en su producción?

- Sí
- No
- Tal vez
- ¿Por qué? _____

15. ¿Considera que la adopción de tecnologías CAD/CAM e impresión 3D podría impactar positivamente en la productividad y competitividad de las PYMEs del sector?

- Sí
- No
- Tal vez
- ¿Por qué? _____

16. ¿Considera que contar con moldes personalizados, diseñados con CAD e impresión 3D, sería una ventaja para su empresa (para adaptarse a demandas específicas del cliente)?

- Sí
- No
- Tal vez
- ¿Por qué? _____

Gracias por su tiempo y colaboración.

7.2 ANEXO B

Resultados de desplazamiento total (URES)

En el presente anexo se muestran los resultados correspondientes al desplazamiento total (URES) obtenidos a partir de las simulaciones numéricas realizadas mediante el método de elementos finitos en el software SolidWorks Simulation.

Estos resultados se presentan como información complementaria al análisis principal, con el objetivo de visualizar la magnitud y distribución de los desplazamientos generados en los moldes bajo la carga de compactación aplicada. Si bien el desplazamiento no constituye el criterio primario de falla estructural en este estudio, su análisis permite corroborar el comportamiento global y la rigidez de los diseños evaluados.

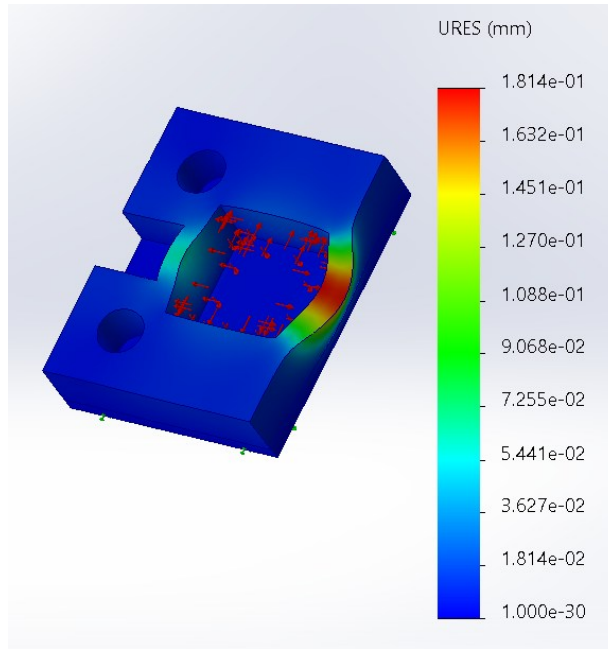


Figura B.1. Distribución del desplazamiento total del molde con geometría cuadrada fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

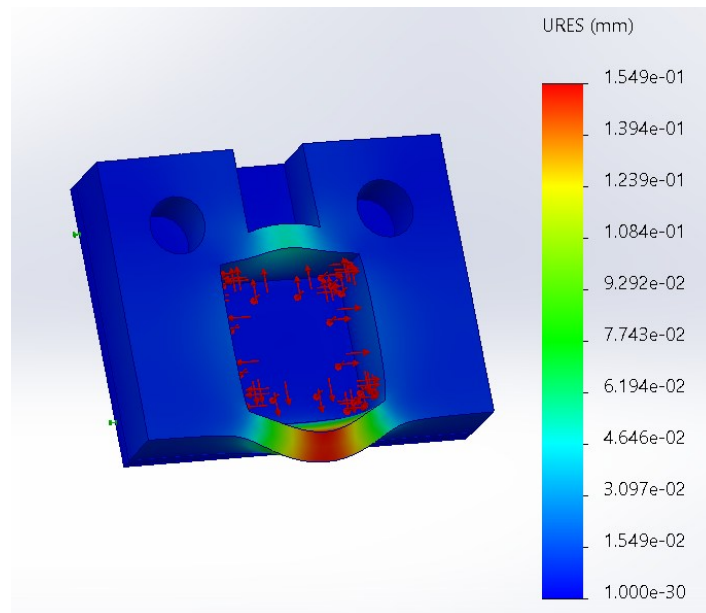


Figura B.2. Distribución del desplazamiento total del molde con geometría cuadrada fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

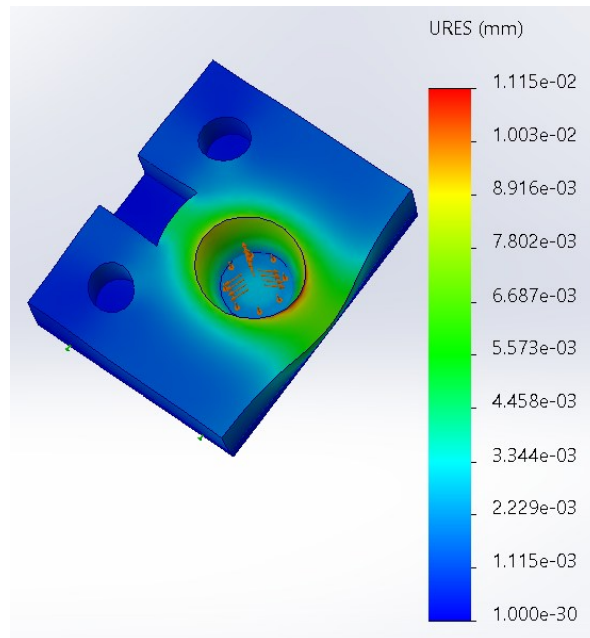


Figura B.3. Distribución del desplazamiento total del molde con geometría circular fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

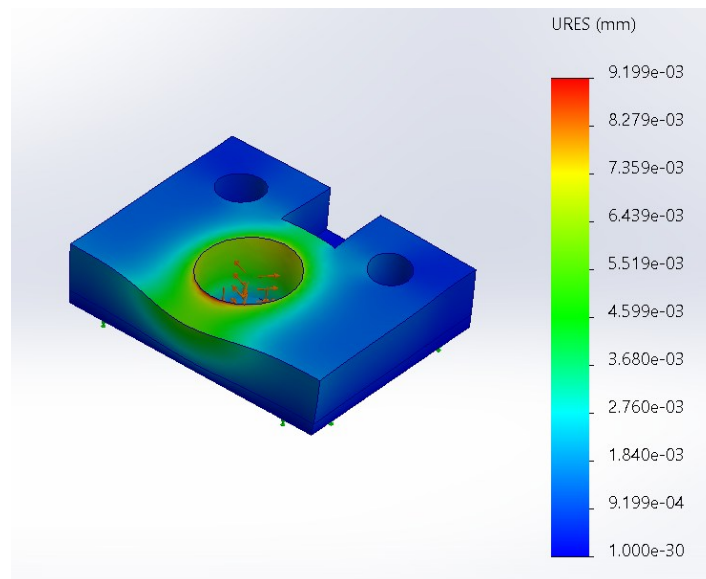


Figura B.4. Distribución del desplazamiento total (URES) del molde con geometría circular fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

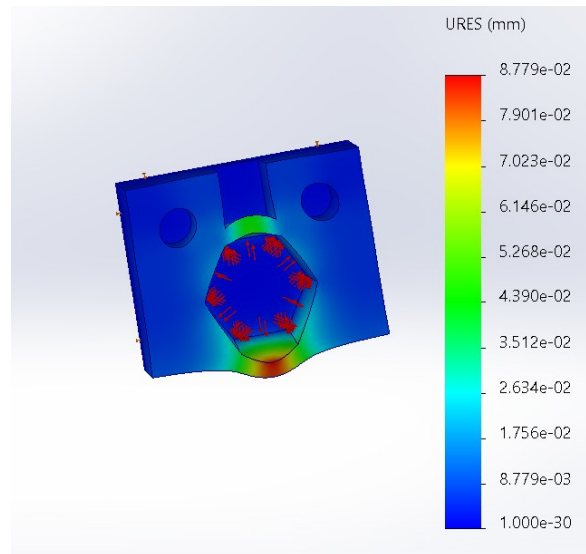


Figura B.5. Distribución del desplazamiento total del molde con geometría hexagonal fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

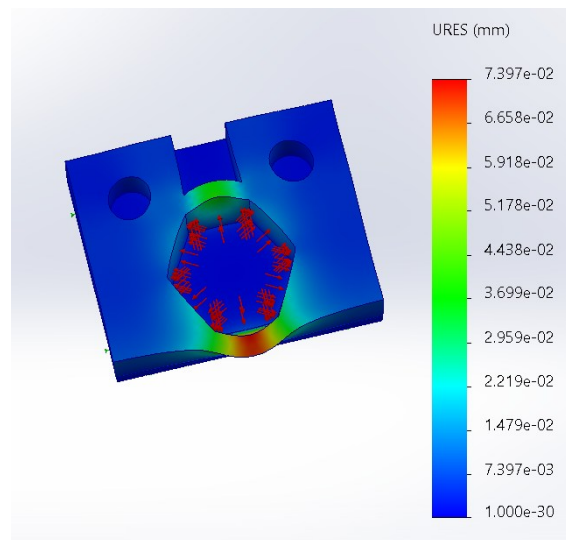


Figura B.6. Distribución del desplazamiento total del molde con geometría hexagonal fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

7.3 ANEXO C

Resultados de deformación unitaria equivalente

Este anexo presenta los resultados de deformación unitaria equivalente obtenidos durante las simulaciones numéricas de los moldes analizados. La deformación unitaria permite identificar las regiones con mayor concentración de deformación bajo la carga aplicada y verificar que el comportamiento del material se mantiene dentro del régimen elástico.

Los resultados se incluyen como información de respaldo al análisis estructural principal, ya que el criterio determinante para la evaluación de la integridad del molde se basó en el esfuerzo equivalente de von Mises y el factor de seguridad.

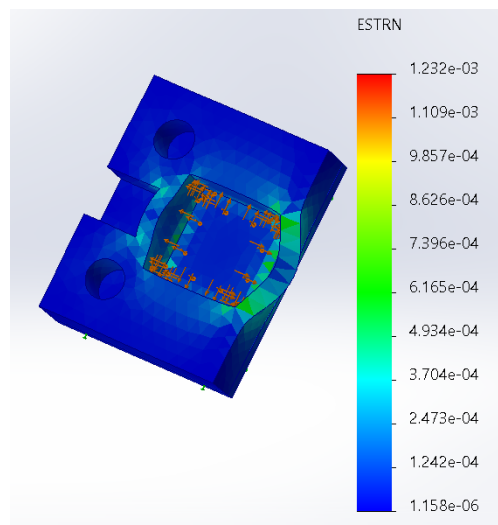


Figura C.1. Distribución de la deformación unitaria equivalente del molde con geometría cuadrada fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

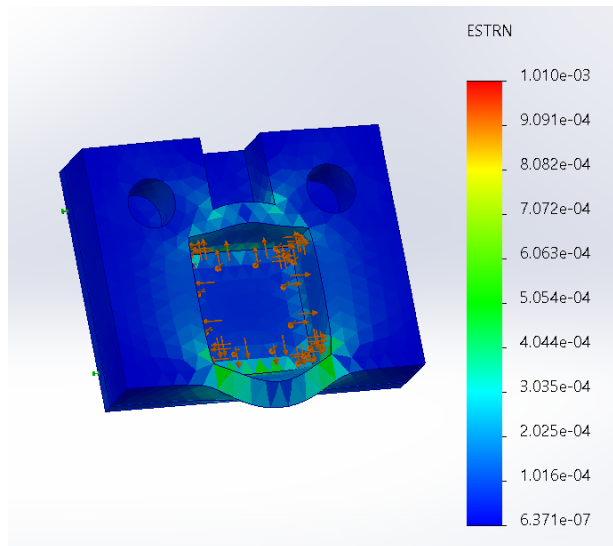


Figura C.2. Distribución de la deformación unitaria equivalente del molde con geometría cuadrada fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

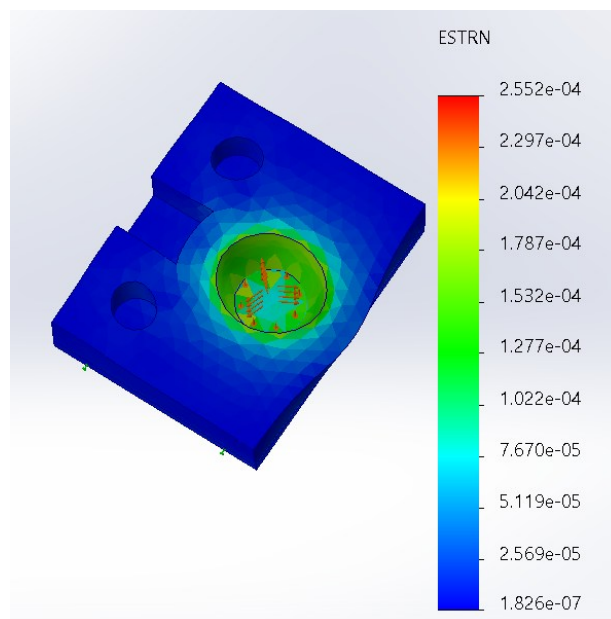


Figura C.3. Distribución de la deformación unitaria equivalente del molde con geometría circular fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

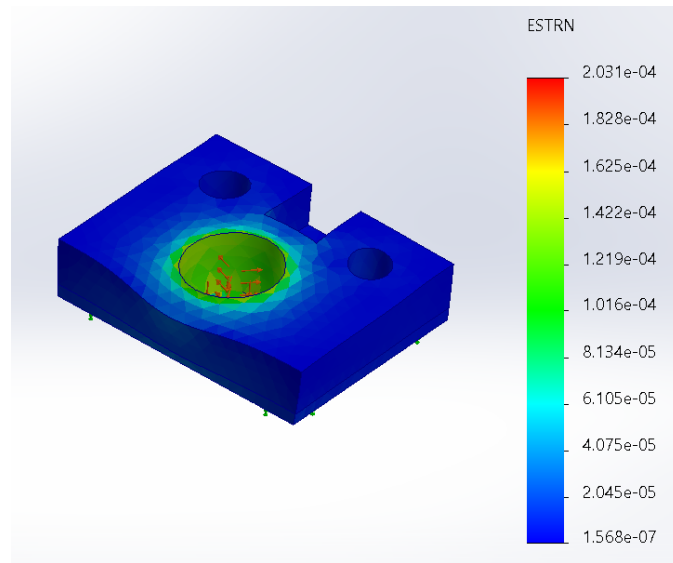


Figura C.4. Distribución de la deformación unitaria equivalente (ESTRN) del molde con geometría circular fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

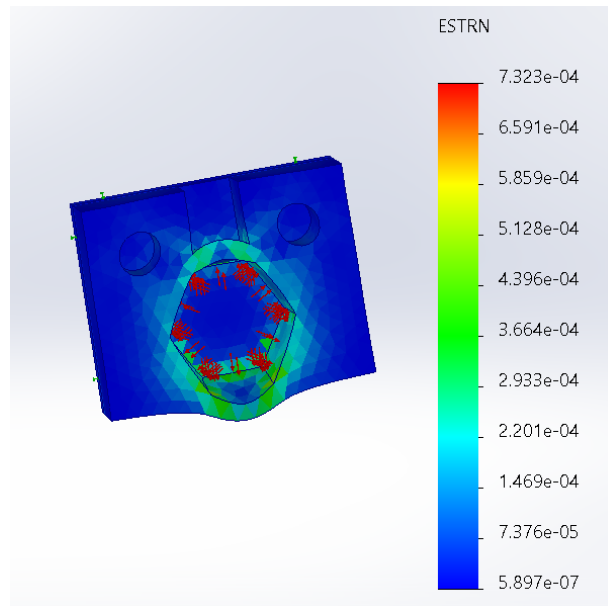


Figura C.5. Distribución de la deformación unitaria equivalente del molde con geometría hexagonal fabricado en PETG bajo una presión uniforme de

0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica

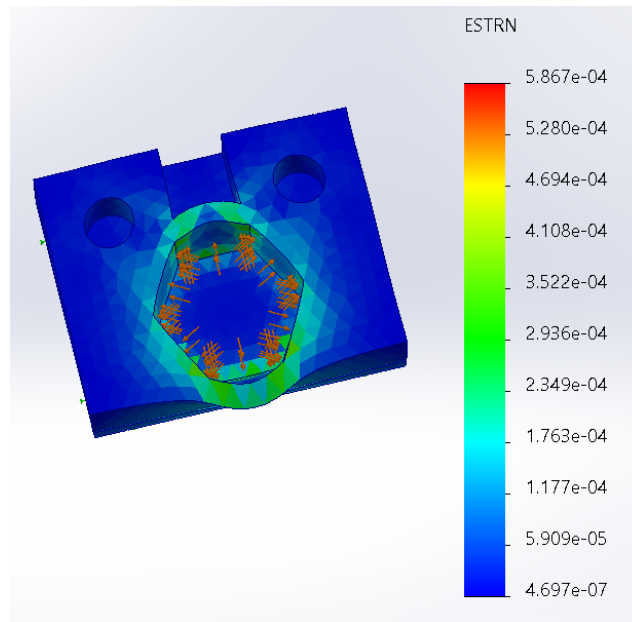


Figura C.6. Distribución de la deformación unitaria equivalente (ESTRN) del molde con geometría hexagonal fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

En todos los casos analizados, los desplazamientos y deformaciones obtenidos se mantuvieron dentro de rangos reducidos, sin comprometer la integridad estructural del molde, lo cual es consistente con los resultados de esfuerzo y factor de seguridad presentados en el capítulo de resultados.

7.4 Anexo D

Resultados completos de simulación para geometrías no incluidas en el análisis principal

Las geometrías incluidas en el presente anexo fueron evaluadas bajo los mismos criterios de carga, condiciones de frontera y propiedades mecánicas descritos en los capítulos anteriores. Dado que los resultados de desplazamiento total y deformación unitaria mostraron un comportamiento elástico consistente en todas las configuraciones analizadas, en este anexo se presentan únicamente los resultados del esfuerzo equivalente de von Mises y del factor de seguridad, por ser los parámetros determinantes para la evaluación estructural de los moldes.

Geometría 4 – Molde rectangular

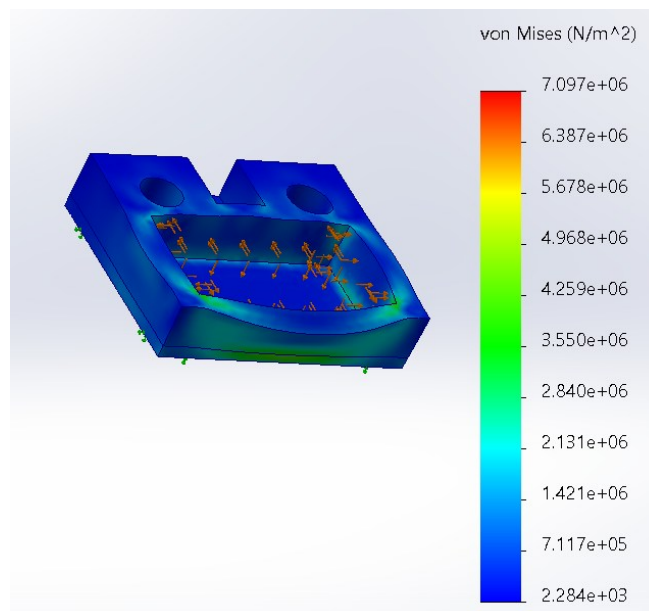


Figura D.1. Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría alargada fabricado en PETG bajo una presión uniforme de

0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

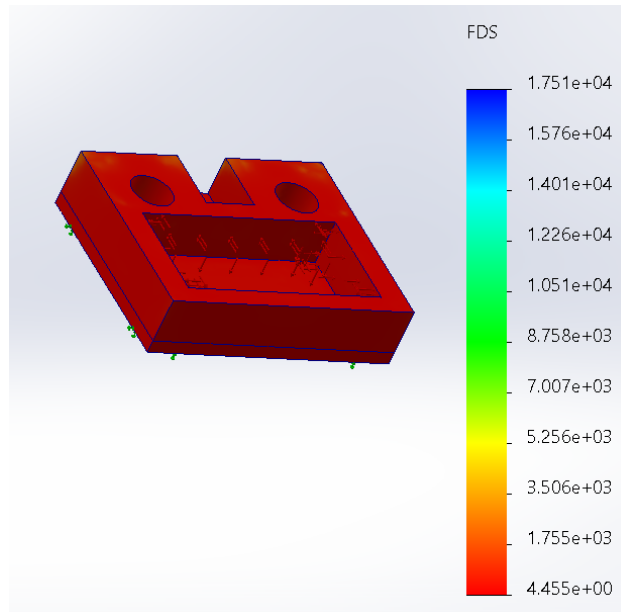


Figura D.2. Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde con geometría alargada fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

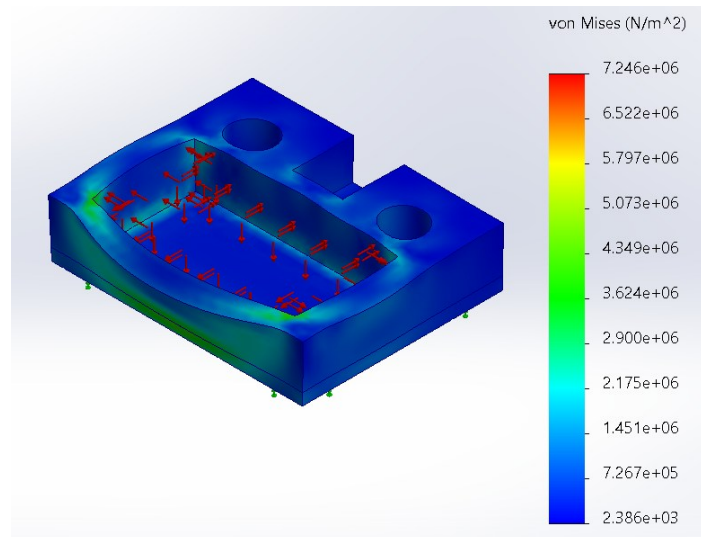


Figura D.3. Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría rectangular fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

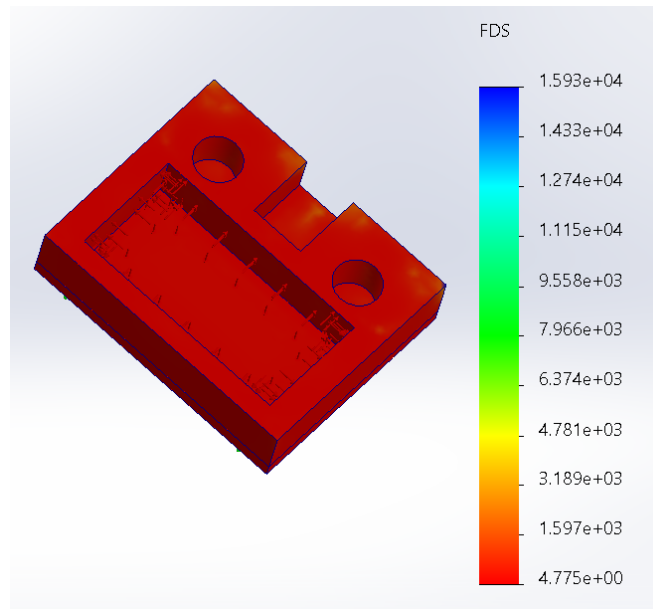


Figura D.4. Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde con geometría rectangular fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

Geometría 5 – Molde tipo abanico

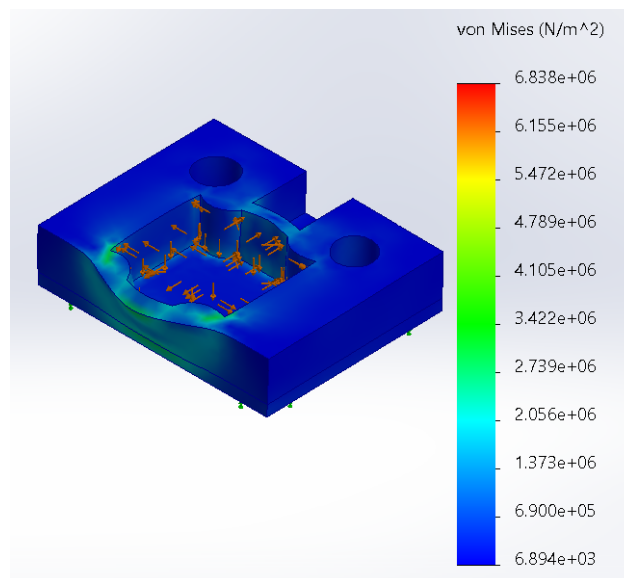


Figura D.5. Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría tipo abanico fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

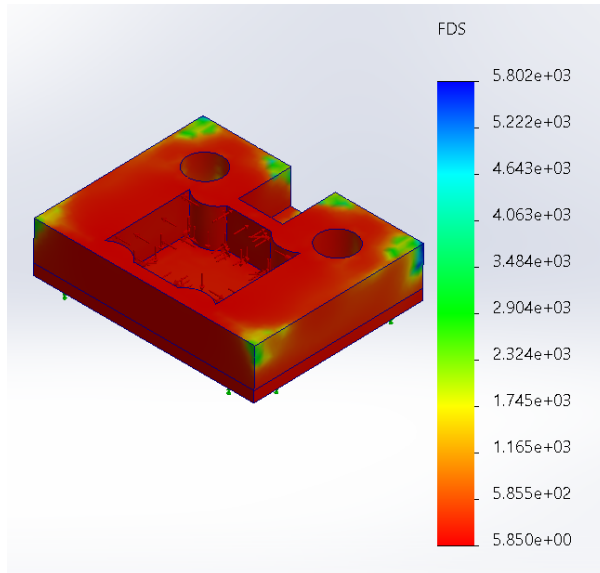


Figura D.6. Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde con geometría tipo abanico fabricado en PETG bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

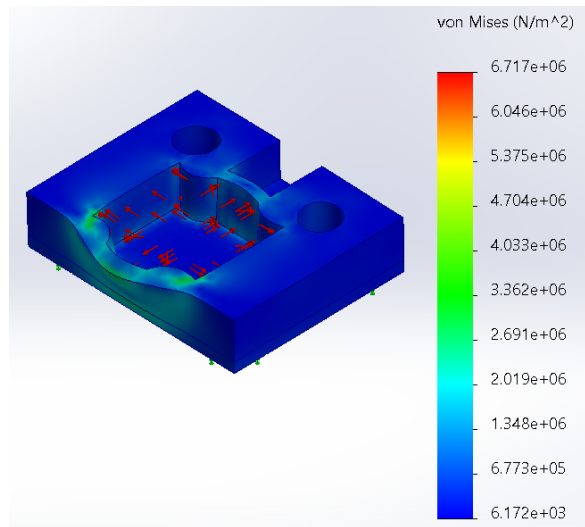


Figura D.7. Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises del molde con geometría alargada fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica

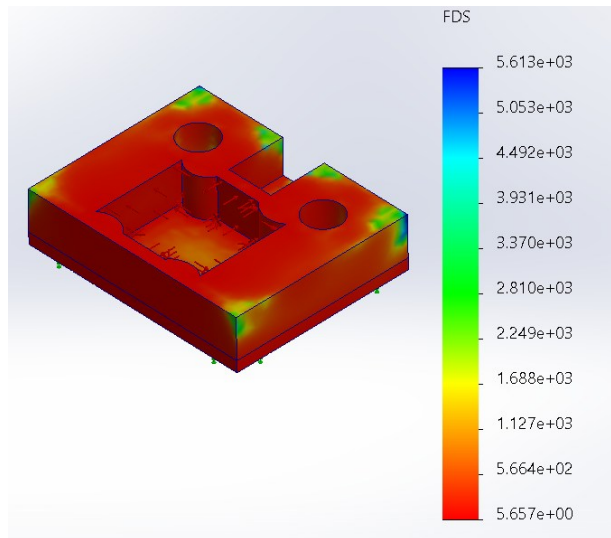
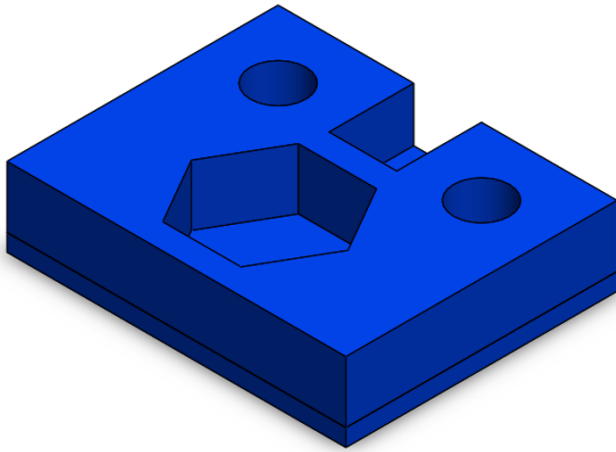


Figura D.8. Distribución del factor de seguridad (FDS) del molde con geometría alargada fabricado en PLA bajo una presión uniforme de 0.37 MPa, análisis FEM en SolidWorks Simulation. **Fuente:** Elaboración propia a partir de simulación numérica.

En todas las configuraciones incluidas en este anexo, los valores máximos del esfuerzo equivalente de von Mises se mantuvieron significativamente por debajo de los límites de compresión estimados para los materiales PLA y PETG, y los factores de seguridad obtenidos fueron superiores a la unidad. Estos resultados confirman que las geometrías adicionales evaluadas presentan un comportamiento estructural seguro bajo las condiciones de carga consideradas.

Asimismo, se incluye la geometría final del molde correspondiente a la configuración más eficiente, junto con el producto obtenido (adocreto), a fin de ilustrar su aplicación en el proceso de vibrocompactado.

Molde (objeto de estudio)



Producto (adocreto)

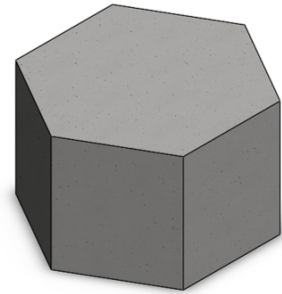


Figura D.9. Geometría del molde optimizado y producto obtenido (adocreto), asociados al proceso de vibrocompactado considerado en las condiciones de carga del análisis estructural. **Fuente:** Elaboración propia.

GLOSARIO

Adocreto

Bloque prefabricado de concreto utilizado en sistemas de pavimentación, diseñado para colocarse de forma trabada y soportar cargas peatonales o vehiculares.

CAX (Computer-Aided Technologies – Tecnologías Asistidas por Computadora)

Conjunto de tecnologías asistidas por computadora utilizadas para apoyar diferentes etapas del ciclo de vida de un producto, como el diseño, análisis, manufactura y planificación. Incluye herramientas como CAD (Computer-Aided Design), CAM (Computer-Aided Manufacturing) y CAE (Computer-Aided Engineering).

CAD (Computer-Aided Design – Diseño Asistido por Computadora)

Tecnología empleada para crear, modificar y analizar modelos geométricos en dos y tres dimensiones mediante software especializado.

CAD/CAM (Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing – Diseño y Manufactura Asistidos por Computadora)

Integración de tecnologías digitales que permite una transición directa del diseño al proceso de fabricación.

CAM (Computer-Aided Manufacturing – Manufactura Asistida por Computadora)

Tecnología que utiliza modelos CAD para planificar, controlar y automatizar procesos de fabricación, como mecanizado CNC o impresión 3D.

CAE (Computer-Aided Engineering – Ingeniería Asistida por Computadora)

Tecnología que emplea software para analizar y simular el comportamiento de diseños mediante herramientas de ingeniería, como análisis estructural, térmico o de fluidos.

CNC (Computer Numerical Control – Control Numérico por Computadora)

Sistema automatizado que controla máquinas herramienta mediante instrucciones digitales para realizar operaciones de mecanizado con alta precisión.

Design thinking (Pensamiento de diseño)

Enfoque metodológico orientado a la solución de problemas que integra creatividad, viabilidad técnica y necesidades del usuario.

DFM (Design for Manufacturing – Diseño para la Manufactura)

Metodología de diseño que optimiza los productos considerando desde etapas tempranas los procesos de fabricación y sus restricciones técnicas.

DFA (Design for Assembly – Diseño para el Ensamblaje)

Metodología enfocada en simplificar el ensamblaje de productos, reduciendo el número de componentes, tiempos y costos asociados.

DFMA (Design for Manufacturing and Assembly – Diseño para la Manufactura y el Ensamblaje)

Enfoque integrado que combina DFM y DFA para optimizar simultáneamente la manufactura y el ensamblaje de productos.

FDM (Fused Deposition Modeling – Modelado por Deposición Fundida)

Tecnología de impresión 3D que fabrica piezas mediante la deposición capa por capa de material termoplástico fundido.

Fresadora CNC (CNC Milling Machine – Fresadora de Control Numérico por Computadora)

Máquina herramienta controlada por computadora que permite la remoción de material para generar superficies, cavidades y geometrías prismáticas.

Impresión 3D (3D Printing)

Proceso de manufactura aditiva que permite fabricar objetos físicos a partir de modelos digitales mediante la adición sucesiva de material.

Lean Manufacturing (Manufactura esbelta)

Estrategia de producción orientada a la eliminación de desperdicios y a la maximización del valor en los procesos productivos.

Manufactura aditiva (Additive Manufacturing, MA)

Proceso de fabricación que construye piezas mediante la adición de material capa por capa a partir de un modelo digital.

Manufactura híbrida (Hybrid Manufacturing)

Enfoque de manufactura que integra procesos aditivos y sustractivos dentro de una misma estrategia productiva.

Manufactura sustractiva (Subtractive Manufacturing)

Proceso de fabricación que obtiene la geometría final de una pieza mediante la remoción controlada de material de un cuerpo sólido.

Molde híbrido (Hybrid Mold)

Molde que combina insertos poliméricos fabricados mediante manufactura aditiva con una base estructural de acero.

Molde para adocretos (Paver Mold)

Herramental utilizado para dar forma y dimensiones específicas a los bloques de concreto durante su proceso de fabricación.

PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol – Tereftalato de Polietileno Modificado con Glicol)

Polímero termoplástico empleado en impresión 3D que presenta buena resistencia mecánica, estabilidad dimensional y adhesión entre capas.

PLA (Polylactic Acid – Ácido Poliláctico)

Polímero termoplástico biodegradable, comúnmente utilizado en impresión 3D por su facilidad de procesamiento.

Producción en masa (Mass Production)

Sistema de producción caracterizado por la fabricación de grandes volúmenes de productos estandarizados mediante procesos repetitivos.

Prototipado rápido (Rapid Prototyping, PR)

Estrategia de desarrollo que permite fabricar modelos físicos en etapas tempranas para validar geometría y funcionalidad.

Prototipo funcional (Functional Prototype)

Modelo físico que, además de representar la geometría final, permite evaluar aspectos estructurales y de ensamblaje.

SDM (Shape Deposition Manufacturing – Manufactura por Deposición de Forma)

Proceso híbrido que alterna la deposición de material y el mecanizado para fabricar piezas con alta precisión geométrica.

Sistema CAD/CAM (CAD/CAM System)

Entorno digital que integra el diseño, la simulación y la fabricación de productos mediante herramientas computacionales.

Sistema de producción (Production System)

Conjunto organizado de recursos, procesos y flujos de información destinados a la transformación de insumos en productos.

SLA (Stereolithography – Estereolitografía)

Tecnología de manufactura aditiva basada en la fotopolimerización de resinas líquidas mediante luz ultravioleta.

SLS (Selective Laser Sintering – Sinterizado Selectivo por Láser)

Proceso de manufactura aditiva que utiliza un láser para sinterizar selectivamente material en polvo capa por capa.

SMED (Single-Minute Exchange of Die – Cambio de molde en un solo minuto)

Metodología orientada a reducir los tiempos de cambio de moldes en procesos productivos, utilizada como referente conceptual en este estudio.

Torno CNC (CNC Lathe – Torno de Control Numérico por Computadora)

Máquina herramienta controlada por computadora que realiza operaciones de mecanizado sobre piezas de revolución.

TABLA DE SIMBOLOGÍAS

Símbolo	Descripción	Unidad
σ	Esfuerzo normal	<i>MPa</i>
σ_t	Resistencia última a la tracción	<i>MPa</i>
σ_y	Límite elástico estimado	<i>MPa</i>
σ_c	Límite de compresión estimado	<i>MPa</i>
σ_{vm}	Esfuerzo equivalente de von Mises	<i>MPa</i>
<i>E</i>	Módulo de Young	<i>MPa</i>
ν	Coefficiente de Poisson	–
<i>FS</i>	Factor de seguridad	–
<i>P</i>	Presión aplicada	<i>MPa</i>
<i>F</i>	Fuerza aplicada	<i>N</i>
<i>MPa</i>	Megapascal	<i>N/m²</i>
<i>MEF</i>	Método de elementos finitos	–