



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

# **OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL:**

**Diseño Mecánico Óptimo de Piezas para  
Inyección de Plástico.**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

PRESENTA:

**DAVID LOZANO TREJO**

TUTOR:

**Dr. FERNANDO VELÁZQUEZ VILLEGAS**



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F., 2012.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente:	Dr. Vicente Borja Ramírez
Secretario:	Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich
Vocal:	Dr. Fernando Velázquez Villegas
1 <sup>er.</sup> Suplente:	Dr. Jesús Manuel Dorador González
2 <sup>do.</sup> Suplente:	Dr. Adrián Espinosa Bautista

Lugar donde se realizó la tesis: CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Fernando Velázquez Villegas

# Agradecimientos

*Esta tesis de maestría es sin duda el resultado de varios meses de un arduo trabajo, investigación y desarrollo, realizado siempre con la pasión, la dedicación y el detalle que implica el mundo de la Ingeniería. Con lo cual consigo un logro más, en mi vida, pero que sobretodo me ha permitido crecer como persona en todos los ámbitos.*

*Sin embargo, esto no hubiera sido posible, sin las ganas, pero sobretodo el compromiso profesional de colaborar con un trabajo de investigación que entregue un beneficio potencial, para la industria y sociedad mexicana.*

*Ya que uno puede estar mucho tiempo intentando resolver la cuadratura del círculo y es muy probable que ahora no se reconozca el esfuerzo, pero siempre esperando que en un futuro sea de gran ayuda y utilidad para otros.*

Quiero agradecer entonces:

*A mis Padres Joaquín e Irene, a mis hermanos Alejandro y Gabriela, por su apoyo, comprensión y confianza en mí, para lograr este tan anhelado sueño, que es también el suyo.*

*A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México, quien es la formadora de grandes proyectos de vida y al Posgrado de Ingeniería en donde adquirí conocimientos sólidos, pero sobretodo pase momentos realmente inolvidables.*

*Al Dr. Fernando Velázquez Villegas, quien además de ofrecerme su confianza, conocimiento y apoyo, me ha brindado lo más importante... su amistad.*

*A todos aquellos profesores y amigos que participaron en la realización de este sueño, ahora hecho realidad, con sus valiosos comentarios e ideas para mejora de este trabajo.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado para la realización de esta tesis, a través del Programa Nacional de Becas de Posgrado.*

*Agradecimiento especial a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo a través de los proyectos PAPIIT TA100112 "Diseño de estructuras ligeras para vehículos urbanos de bajo consumo energético aplicando métodos de optimización" y PAPIIME PE102212 "Material Didáctico Interactivo Digital para el aprendizaje del Método de los Elementos Finitos"*



*La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica.*

Aristóteles de Estagira

*Pensar es el trabajo más arduo que existe, lo que explica que haya tan pocas personas que se dediquen a ello.*

Henry Ford

*Cuanto más aumentan nuestros conocimientos, tanto más patente se vuelve nuestra ignorancia.*

John F. Kennedy



---

# Resumen

El problema de diseño en ingeniería y en particular en el área mecánica, se relaciona de manera muy estrecha con una gran variedad de disciplinas como son: diseño estructural, selección de materiales, procesos de manufactura, termofluidos, mecatrónica, ergonomía, etc. Aunque las técnicas de diseño denominadas “tradicional” ofrecen distintas maneras de resolver dicho problema, desde hace algunos años, se ha incrementado el uso de técnicas de optimización durante el proceso de diseño debido a su capacidad para resolver problemas complejos.

De esta manera la optimización estructural (i.e. SO, por sus siglas en inglés) se ha convertido en un campo de investigación bastante amplio, que busca desarrollar metodologías que permitan encontrar nuevas soluciones e incluso mejorar las existentes de manera que, bajo ciertos criterios, resulten ser las mejores y que a su vez se fabriquen con la menor cantidad de material posible y con mayor facilidad.

Actualmente el moldeo por inyección de plástico es un proceso muy utilizado en la industria, esto gracias a los avances en materiales y debido a su gran capacidad para obtener piezas de geometría compleja, su bajo costo en altos volúmenes de producción, sustitución de elementos metálicos, lo que provoca una reducción de peso y costos de las estructuras donde intervienen dichas partes plásticas, etc.

Bajo este contexto el introducir la fabricación en el proceso de optimización, representa un área de oportunidad que gracias a la gran capacidad de las computadoras y métodos numéricos actuales, ha comenzado a desarrollarse tanto académicamente como industrialmente.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos al implementar una metodología de diseño óptimo, que muestra la interacción entre la optimización estructural y la manufactura, integrando para ello herramientas de diseño e ingeniería asistidos por computadora (i.e. CAD, CAE por sus siglas en inglés), técnicas evolutivas y un proceso de manufactura: moldeo por inyección de plástico.

Dicha interacción se observa al llevar a cabo una adecuación para manufactura de una geometría obtenida del proceso de optimización o estructura óptima, mediante la aplicación de un conjunto de criterios o consideraciones generadas con base en el proceso de inyección de plástico, con el objetivo de generar una geometría que cumpla tanto con las restricciones de diseño así como del proceso se propone sea fabricada, es decir: obtener una estructura óptimo-manufacturable, logrando con ello reducir volumen y por ende peso en dicha estructura, además de mantener la esencia geométrica de la estructura óptima después de la adecuación.

Para mostrar la implementación de la metodología, se ha atacado un problema particular en la industria, optimizando un elemento perteneciente a un mecanismo de asiento. Donde la solución óptimo-manufacturable proporciona la generación de un nuevo concepto y la sustitución de dicha pieza originalmente metálica, por una plástica.

Finalmente se presenta una herramienta útil para los ingenieros, durante el diseño e incluso rediseño de elementos mecánicos plásticos en problemas de ingeniería. Limitando la metodología únicamente al diseño geométrico de piezas plásticas. Estableciendo así un antecedente importante para posteriores investigaciones relacionadas con la optimización y manufactura, con proyección hacia la obtención de un sistema experto.



---

# *Abstract*

The engineering design problem, particularly in the mechanical area, relates very closely with a wide variety of disciplines such as: structural design, selection of materials, manufacturing processes, thermal fluids, mechatronics, ergonomics, etc. Although design techniques called "traditional" offer different ways to solve this problem, in recent years, has increased the use of optimization techniques during the design process due to its ability to solve complex problems.

Thus the structural optimization (i.e. OS, for its acronym in English) has become a very broad field of research that seeks to develop methodologies to find new solutions and even improve existing ones so that, under certain criteria, prove to be the best and the same time are manufactured with the least amount of material possible.

Plastic injection molding, is currently a process widely used in the industry, thanks to advances in materials and due to its great capacity for complex geometry parts, its low cost in high volumes of production, replacement of metal, causing a weight and cost reduction of such intervening structures where plastic parts, etc.

In this context introduce the manufacturing in the optimization process, represents an area of opportunity, thanks to the great capacity of modern numerical methods and computers, has begun to develop both academically and industrially.

This paper presents the results obtained to implement an optimal design methodology, which shows the interaction between the structural optimization and manufacturing, integrating design and computer-aided engineering tools for it (i.e. CAD, CAE for its acronym in English), evolutionary techniques and a manufacturing process: plastic injection molding.

Such interaction is observed when performing an adjustment for manufacturing a geometry obtained from the optimization process or optimal structure, through the application of a set of criteria or considerations that are generated based on the injection molding process, with the aim of generating a geometry that meets both the design constraints of the process and is proposed to be manufactured, obtain an optimum-manufacturable structure, achieving to reduce weight and volume in said structure, while maintaining the geometric essence of optimal structure after the adjustment.

To show the implementation of the methodology has attacked a particular problem in the industry, optimizing an element belonging to a seat mechanism. The optimum-manufacturable solution provides generation of a new concept and replacing the original metal piece by plastic piece.

Finally is a useful tool for engineers, during the design and redesign even plastic mechanical components in engineering problems. Limiting the methodology only the geometric design plastic parts. Thus establishing an important precedent for future research related to optimization and manufacturing, with projection to obtain an expert system.



---

# *Prefacio*

La estructura general de este trabajo muestra tres capítulos, donde se realiza una síntesis del entorno de la ingeniería mecánica actual, la manufactura y su relación con la optimización estructural, además de los objetivos, alcances del trabajo, detalles de la metodología de optimización estructural implementada y la aplicación a un caso de estudio particular.

En el primero de ellos se observa el estado del arte, donde se realiza una breve comparación entre la metodología de diseño y diseño óptimo, en donde interviene la inteligencia artificial, además de una síntesis del entorno actual existente entre los métodos de optimización y procesos de manufactura. También se describen las características del proceso de inyección de plástico, identificando parámetros y restricciones principales del proceso, el cual es empleado en este trabajo.

En el segundo capítulo se muestra de manera general la implementación del método de diseño óptimo, describiendo cada una de las etapas que conforman la metodología presentada, durante la solución a un problema en la industria. La implementación muestra claramente un proceso de “adecuación para manufactura”, que se da al aplicar una serie de criterios geométricos (derivados de un análisis del proceso de inyección de plástico), a una estructura óptima. Se presentan ventajas y desventajas de cada criterio generado, durante la aplicación al problema establecido.

En el capítulo tercero, se muestran los resultados obtenidos por el método de optimización presentado mediante la utilización de tres materiales plásticos estructurales propuestos. Se presentan imágenes, gráficos, así como una discusión breve para seleccionar uno de dichos materiales que dan solución al problema de diseño planteado.

Finalmente se dan las conclusiones sobre el trabajo realizado, objetivos logrados, etc., así como las líneas de investigación abiertas y trabajo futuro, para continuar con este tema sobre la interacción entre optimización estructural y procesos de manufactura.



---

# Índice

<b>Resumen</b> .....	5
<b>Prefacio</b> .....	7
<b>Índice</b> .....	8
<b>Introducción</b> .....	11
I.1 Justificación .....	13
I.2 Objetivos .....	14

## *CAPÍTULO 1*

### *ESTADO DEL ARTE.*

<b>1.1 Introducción</b> .....	15
<b>1.2 Descripción de la metodología de diseño</b> .....	16
1.2.1 Metodología tradicional de diseño .....	16
1.2.2 Metodología de diseño óptimo .....	17
1.2.2.1 Inteligencia artificial .....	18
1.2.2.2 Diseño óptimo .....	19
<b>1.3 Optimización estructural</b> .....	20
1.3.1 Métodos de optimización estructural .....	21
1.3.1.1 Optimización estructural evolutiva (ESO) .....	22
1.3.1.2 Algoritmos genéticos (GA) .....	23
1.3.1.3 Recocido simulado (SA) .....	24
1.3.2 Tipos de optimización estructural .....	24
1.3.2.1 Optimización de dimensión (SIZE) .....	24
1.3.2.2 Optimización de forma (SHAPE) .....	25
1.3.2.3 Optimización topológica (TOPOLOGY) .....	25
<b>1.4 Optimización estructural y manufactura</b> .....	25
1.4.1 Optimización estructural e inyección de plástico .....	25



1.4.2	Descripción del proceso de inyección de plástico	26
1.4.2.1	Diseño de piezas	27
1.4.2.2	Diseño de moldes	28
1.4.2.3	Proceso de transformación	29
1.4.2.4	Materiales plásticos	29
1.4.3	Limitantes del trabajo	30

## **CAPÍTULO 2**

### **IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL**

<b>2.1</b>	<b>Introducción</b>	31
<b>2.2</b>	<b>Descripción del método de optimización estructural</b>	32
2.2.1	Proceso de optimización	33
<b>2.3</b>	<b>Problema de diseño o caso de estudio</b>	36
2.3.1	Definición del problema	36
2.3.2	Estado inicial	37
2.3.2.1	FEM del estado inicial	40
<b>2.4</b>	<b>Implementación del método de optimización topológica</b>	42
2.4.1	Modelado geométrico	42
2.4.1.1	Simplificación del modelo	45
2.4.2	Análisis por elementos finitos	46
2.4.2.1	Discretización del modelo	46
2.4.2.2	Escenario de carga	47
2.4.2.3	Análisis del espesor inicial	48
2.4.2.4	Resultados	52
2.4.3	Optimización topológica	53
2.4.3.1	Análisis de densidad de elementos	53
2.4.3.2	Creación del modelo sólido de la estructura óptima	56
2.4.4	Adecuación para manufactura	61
2.4.4.1	Consideraciones geométricas del proceso de inyección de plástico	62





2.4.4.2	Adecuación para manufactura de una estructura óptima	62
2.4.4.2.1	Espesor de pared	63
2.4.4.2.2	Agujeros	63
2.4.4.2.3	Dirección de extracción	65
2.4.4.1.4	Modificación de la geometría óptima	66
2.4.4.1.5	Costillas o nervios	69
2.4.4.1.6	Redondeos	71
2.4.4.1.7	Ángulos de desmoldeo	74
2.4.4.1.7	Punto de inyección	75

**CAPÍTULO 3**

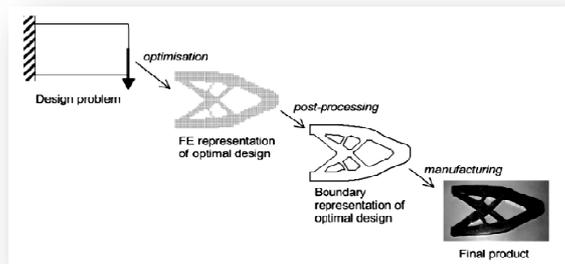
**RESULTADOS DEL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL PARA  
DISTINTOS MATERIALES PLÁSTICOS.**

<b>3.1</b>	<b>Introducción</b>	79
<b>3.2</b>	<b>Consideraciones geométricas para la adecuación para manufactura</b>	81
<b>3.3</b>	<b>Resultados de optimización y adecuación para distintos materiales</b>	84
3.3.1	Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	84
3.3.1.1	Gráficos de volumen y esfuerzo vs iteración	85
3.3.2	Polycarbonato (PC)	88
3.3.2.1	Gráficos de volumen y esfuerzo vs iteración	91
3.3.3	Poliamida 6,6 (Nylon 6)	93
3.3.3.1	Gráficos de volumen y esfuerzo vs iteración	96
<b>3.4</b>	<b>Comparativo de resultados</b>	99
3.4.1	Selección de la solución óptima	102
	<b>Conclusiones</b>	105
	<b>Bibliografía</b>	107
	<b>Anexos</b>	111



---

# Introducción



“Las mayores dificultades del hombre comienzan cuando puede hacer lo que quiere”.

Thomas Henry Huxley

El problema de diseño en la ingeniería está relacionado de manera general con una gran variedad de disciplinas tales como: diseño estructural, de productos, selección de materiales, transferencia de calor, manufactura, ergonomía, estética, economía, entre otras. La metodología de diseño actual y denominada por algunas personas como “tradicional”, provee distintas maneras de resolver dichos problemas, sin embargo las soluciones generadas difícilmente son las mejores, debido principalmente a la cantidad de variables de diseño involucradas, en las propuestas de solución que un equipo, generalmente de diseñadores, son capaces de manejar de manera práctica.

Bajo este contexto han surgido teorías, técnicas y métodos de optimización, desde diferentes ramas del conocimiento, planteando distintas formas de resolver problemas complejos, obteniendo soluciones cercanas a las óptimas. La aplicación de dichos métodos a problemas de diseño en ingeniería representa un área de oportunidad que, gracias a la gran capacidad de las computadoras actuales, ha empezado a desarrollarse tanto académicamente como industrialmente.

Recordando que a lo largo de la historia el hombre ha llevado a cabo la “optimización” dentro de sus sistemas, con el fin de crear estructuras, mecanismos, ensambles, etc., al igual que diferentes componentes mecánicos, capaces de mejorar el funcionamiento de dicho sistema. Sin embargo, los métodos de optimización actuales tienen su origen desde los tiempos de la Segunda Guerra Mundial. Desde los años 40, el término “optimización” ha sido también conocido como programación matemática. En aquella época el término programación no hacía referencia a un programa computacional sino a la logística militar. En la actualidad la optimización es un proceso que tiene grandes aplicaciones en prácticamente cualquier área, con lo cual se logra una mejora de procesos y por tanto reducción de costos, tiempos, etc., todo ello debido a su definición:

*“La optimización es un proceso a través del cual se busca obtener o determinar la mejor solución posible, de entre un grupo de resultados, que a su vez satisface las restricciones que presenta el sistema al cual se aplica.”*[46]

Lo que significa matemáticamente: *“La búsqueda del máximo o mínimo de una función objetivo.”* [28]

Por tanto, en ingeniería, tiene más sentido describir la optimización como el cálculo de uno o varios objetivos, por ejemplo: el peso, el esfuerzo, el costo, la geometría, las frecuencias naturales, la temperatura, etc., que dependen de variables conocidas: las cotas, las cargas, las restricciones, los materiales, los requisitos de fabricación, etc. Sin embargo, los ingenieros de diseño pocas veces conocen todos estos datos en las fases iniciales del proceso de diseño.



En general, el diseño en ingeniería es un proceso *iterativo*, que se modifica continuamente hasta cumplir un criterio aceptable de calidad definido por: el factor de seguridad, costo, eficiencia, estética, etc., que requiere fundamentalmente una gran experiencia por parte del diseñador, quien debe utilizarla en casi todas las etapas del proceso. Aunque recientemente esta forma de pensar ha cambiado debido a la importancia que ha tomado el campo de la optimización en diseño en ingeniería, y a que durante las últimas dos décadas, los ingenieros de diseño han aprendido a utilizar y a confiar en herramientas de ingeniería asistida por computadora (CAD, CAM y CAE), para producir mejores diseños con más rapidez.

## OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.

Existen distintos tipos de problemas de diseño dentro de la ingeniería y en particular del área mecánica, en donde desde hace varias décadas, se han realizado estudios en el campo de optimización de estructuras. Desarrollando metodologías eficientes para encontrar estructuras óptimas que faciliten resolver problemas complejos en áreas como: la arquitectura, la ingeniería civil y mecánica. De esta manera la definición de optimización estructural es:

*“La optimización estructural es una fusión en las áreas de ingeniería, matemáticas, ciencia y tecnología, que tiene la meta de llevar a cabo la mejor función de una estructura, como puede ser un puente, un vehículo espacial o simplemente un elemento mecánico.”*[26]

Existen varias técnicas que pueden ser usadas satisfactoriamente para determinar el óptimo dentro de un grupo de variables de diseño, lo cual ofrece un óptimo estructural. Estos pueden ser agrupados en dos grandes categorías: Métodos basados en gradientes (programación matemática) y Métodos heurísticos (técnicas evolutivas). En general el proceso de optimización de un diseño en su forma estructural se resume como se muestra en la figura I. 1.

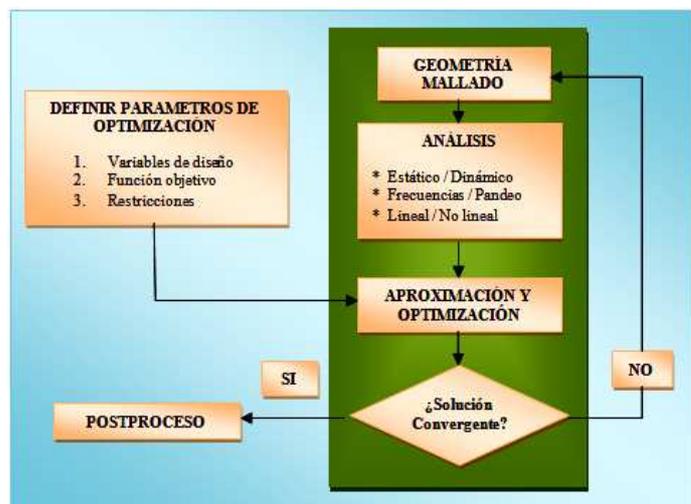


Fig. I.1. Proceso general de optimización estructural.

La optimización de un diseño incrementa el valor de un producto mejorando su rendimiento en su entorno operativo a menor costo de producción, mediante la reducción de la cantidad de material utilizado para su fabricación. Al utilizar la optimización, el ingeniero de diseño incrementará los conocimientos sobre el comportamiento de su producto y mejorará el diseño, mientras compara los datos nuevos, con los obtenidos de análisis realizados previamente.

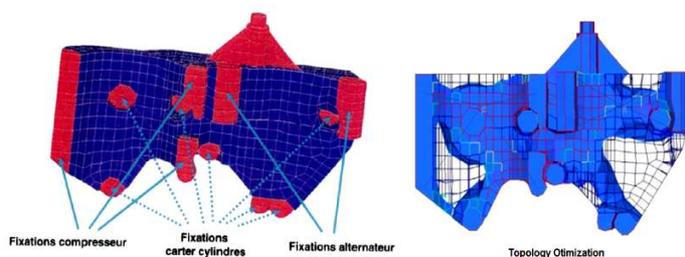


Fig. I.2. Ejemplo de optimización estructural de topológica [31].

El diseño y desarrollo de componentes mecánicos incluye normalmente secciones no uniformes que dan lugar al incremento en el nivel de esfuerzo. Es posible entonces calcular la distribución de estos esfuerzos de forma analítica o mediante diferentes métodos, entre los cuales destaca el de elementos finitos, permitiendo analizar un diseño y realizar una mejora en zonas de concentración de esfuerzo debido a las cargas que soportan. Lo que da lugar a la introducción de técnicas o métodos de optimización para el diseño de componentes mecánicos.



---

Es por ello que los sistemas computacionales proporcionan al ingeniero de diseño hoy en día, una gran herramienta para analizar componentes de manera rápida y eficaz, antes de que estos sean producidos. En la figura I.2 se muestra un ejemplo de optimización estructural de un componente mecánico.

Aunque muchos de los componentes mecánicos en la actualidad, son plásticos, diseñados en gran medida para llevar a cabo una sustitución de material, es decir componentes plásticos que proporcionen la misma resistencia a las cargas, pero con un peso mucho menor, garantizando un tiempo de vida mucho mayor que un componente metálico bajo ciertas restricciones. El proceso de moldeo por inyección de plástico, es uno de los más comunes, utilizados en la industria: automotriz, de consumo, etc., debido a la gran capacidad para obtener piezas de geometría compleja, por su bajo costo en altos volúmenes de producción, etc.

Desde hace algunos años, se ha investigado sobre la relación existente entre la optimización estructural y algunos de los procesos de manufactura más comunes, mediante la inclusión de algunas restricciones propias del proceso como pueden ser: diámetros, espesores, formas, etc., en los algoritmos computacionales que dan solución al problema de optimización. Así la mayoría de las investigaciones sobre optimización estructural, se encuentran enfocadas en el desarrollo de metodologías de diseño, logrando mejores soluciones a un problema, desde el punto de vista conceptual, aunque no sean necesariamente las mejores para ser manufacturadas. Es entonces donde el criterio del diseñador entra en juego, para poder realizar un análisis de las posibles soluciones, obtenidas durante el proceso de optimización, con el fin de encontrar la que cumpla con los criterios impuestos y que además sea posible fabricarla.

Esto se ha vuelto una tarea demasiado compleja ya que esto implica tener un sistema inteligente robusto capaz de analizar un número infinito de posibilidades y tomar la decisión, de cuál es la solución óptima a un problema estructural, y que además sea la mejor para un proceso de manufactura particular, todo al mismo tiempo.

## **I.1 JUSTIFICACIÓN.**

La optimización estructural en los últimos años ha cobrado gran importancia, gracias a su poder para encontrar nuevas soluciones, lo cual en la actualidad debido a la competitividad existente por ofrecer productos innovadores y eficientes en todos aspectos, hace de esta, una técnica de diseño que comienza a formar parte importante dentro de las herramientas al alcance de los ingenieros de diseño.

En la actualidad, la mayoría de las investigaciones sobre optimización estructural se encuentran enfocadas en el desarrollo de metodologías que permitan obtener las mejores soluciones, desde el punto de vista conceptual, aunque no sean necesariamente las mejores para ser manufacturadas. Sin embargo desde hace algunos años, se ha intentado relacionar la optimización estructural con algunos procesos de manufactura, mediante la inclusión de algunas restricciones generales de los procesos como son: espesores, longitudes, forma, etc., en los algoritmos computacionales ya conocidos (i.e. ESO, AG, etc.) que dan solución al problema de optimización.

La tarea de involucrar parámetros de manufactura en el proceso de optimización, se ha vuelto demasiado compleja, debido a la necesidad de tener un amplio y profundo conocimiento de cada proceso de manufactura, así como de una gran habilidad de programación de algoritmos computacionales. Esto conlleva a tener un sistema inteligente sumamente complejo, capaz de analizar un número infinito de posibilidades y tomar la decisión, de cuál es la solución geométrica óptima, y que además dicha solución sea la óptima para un proceso de manufactura particular, todo sucediendo al mismo tiempo, donde surge una pregunta sumamente importante y sobretodo difícil de responder ¿Cómo enseñarle a un sistema a tomar decisiones propias?

Bajo el contexto anterior, se presentan algunos argumentos que sustentan la realización de este trabajo, como se mencionan a continuación:



- 
- La inquietud de ahondar en un tema con un amplio campo de investigación como es la optimización estructural, dando continuación con un trabajo iniciado hace algunos años, intentando ahora relacionar diseño, optimización y manufactura.
  - Debido a que las soluciones óptimas por lo general son soluciones geoméricamente complejas para ser fabricadas, se hace entonces obvia la necesidad de involucrar parámetros de manufactura, de alguna manera, al proceso de optimización y con ello obtener soluciones geométricas que puedan ser llevadas a producción, que sean de bajo peso y que soporten las cargas a las cuales estarán sometidas durante su vida útil.
  - El proceso de moldeo por inyección de plástico, es uno de los procesos más comunes, utilizados en la industria, gracias al desarrollo de nuevos materiales plásticos, su gran capacidad para obtener piezas de geometría compleja, su bajo costo en altos volúmenes de producción, la posibilidad de sustituir materiales, etc. Razones por las cuales se eligió a éste, como el proceso de manufactura, para el desarrollo de este trabajo.
  - De esta manera el involucrar la optimización estructural y dicho proceso de inyección de plástico, se convierte en un tema muy atractivo por ser un nicho de oportunidad a nivel académico e industrial. Donde la metodología a desarrollar puede ser extendida a otros procesos de manufactura.
  - El tener una metodología que involucre optimización y manufactura puede volverse un punto atractivo para que la industria: automotriz manufacturera, aeroespacial, entre otras. Comiencen a utilizar este tipo de tecnología con mucho más auge, tal y como lo están haciendo ya países más desarrollados.
  - Para el grupo de diseño mecánico óptimo (GDMO), se convierte en un tema que dará inicio a una línea de investigación, dando el paso natural a seguir hacia la manufactura, dentro de la denominada metodología de diseño mecánico óptimo, y que además esperando que este trabajo pueda ser utilizado en proyectos futuros de gran trascendencia.

## I.2 OBJETIVOS.

Objetivo principal:

Presentar una metodología de diseño óptimo, basada en reglas evolutivas, donde se observa la interacción entre optimización estructural y manufactura, con el fin de obtener estructuras óptimas que sean manufacturables, a través del proceso de inyección de plástico.

Objetivos:

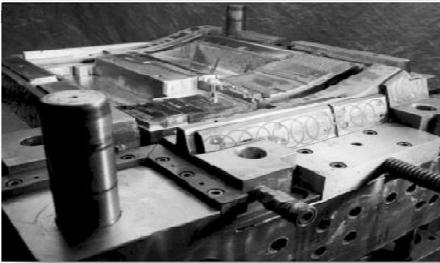
- Obtener la distribución de esfuerzos en la pieza, al inicio, durante y final del proceso de optimización, utilizando el análisis por elementos finitos como herramienta principal de solución para problemas tridimensionales.
- Generar un conjunto de reglas o criterios, con base en parámetros geométricos del proceso de inyección de plástico, que permitan adecuar una estructura optimizada topológicamente, para que esta sea fabricada mediante dicho proceso de manufactura.
- Realizar una comparación entre los resultados obtenidos del proceso de optimización, antes y después de la adecuación para manufactura de la estructura óptima.
- Mostrar la implementación de la metodología, dando solución a un problema particular en la industria, para reducir peso, volumen y la utilización de distintos materiales plásticos.



---

## CAPÍTULO 1

# *Estado del Arte.*



*“¿Por qué esta magnífica tecnología científica, que ahorra trabajo y nos hace la vida más fácil, nos aporta tan poca felicidad? La respuesta es está, simplemente: porque aún no hemos aprendido a usarla con tino.”*

Albert Einstein.

### 1.1 INTRODUCCIÓN.

Entendiendo como funciones básicas del ingeniero de diseño: el diseñar nuevos sistemas y elementos más eficientes y menos costosos, así como proyectar procedimientos para mejorar el funcionamiento de los sistemas existentes, se puede decir que es necesario complementar la formación del diseñador con herramientas para hacer mejores selecciones de alternativas de diseño. Una de las herramientas más poderosas para realizar la selección de la mejor alternativa es la conocida como “teoría de optimización”, con la cual es posible determinar el mejor caso sin probar realmente todos los casos posibles. La aplicación de la teoría de optimización en ingeniería comienza a reportarse a partir de la década de los 40, pero aún continúa siendo desconocida en muchas áreas, y en otras, aunque conocida, no se le ha dado la importancia que merece. El desarrollo la teoría de optimización ha sido posible gracias al surgimiento de nuevos métodos numéricos, al uso de nuevas estrategias evolutivas y finalmente al desarrollo de computadoras cada vez más potentes y veloces, capaces de realizar miles de cálculos en tiempos relativamente cortos, obteniendo simulaciones computacionales con una muy buena aproximación a la realidad.

De esta manera el propósito de aplicar los conceptos de la teoría de optimización a la ingeniería de diseño es el de obtener una solución a un problema de ingeniería que cumpla con las solicitudes y restricciones impuestas y que su vez resulte ser la mejor en cuanto a uno o varios criterios de diseño previamente establecidos. El proceso de diseño actual es realizado en gran parte por la experiencia e intuición del diseñador, quien debe utilizarla en casi todas las etapas del proceso de diseño, empleando el método de prueba y error, donde el ingeniero define un diseño inicial cuyo comportamiento es analizado numéricamente; de los resultados del análisis se deducen cambios para mejorar el diseño. El proceso termina cuando el ingeniero considera que el diseño final es lo suficientemente bueno con base en un criterio. Con esto se obtienen buenas soluciones, pero no las mejores, además de implicar un alto precio: el tiempo por parte del diseñador.

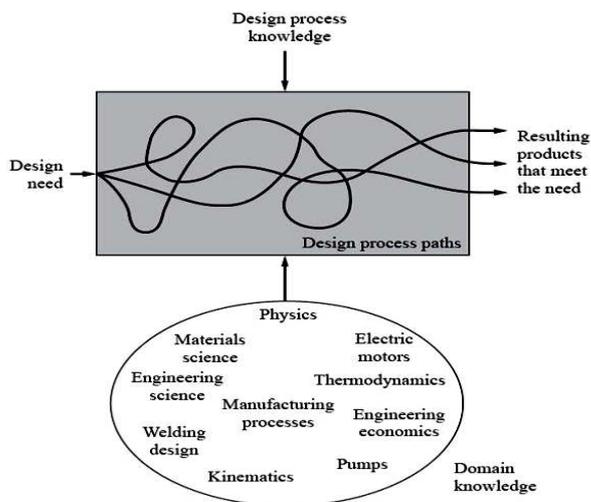
Esta forma de diseñar está cambiando, debido a la importancia que en la actualidad ha tomado la aplicación de la teoría de optimización, en la ingeniería de diseño, ya que mediante su aplicación se logran reducir costos y tiempos durante el proceso de diseño.



## 1.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO.

### 1.2.1 METODOLOGÍA TRADICIONAL DE DISEÑO.

La metodología de diseño denominada “Tradicional” es aquella en la cual la experiencia e intuición del diseñador es fundamental durante y en cada una de las etapas del proceso de diseño, desde la fase de idealización hasta su fase de fabricación. En la figura 1.1, se muestra la representación de la metodología de diseño, en forma de un diagrama de caja negra.

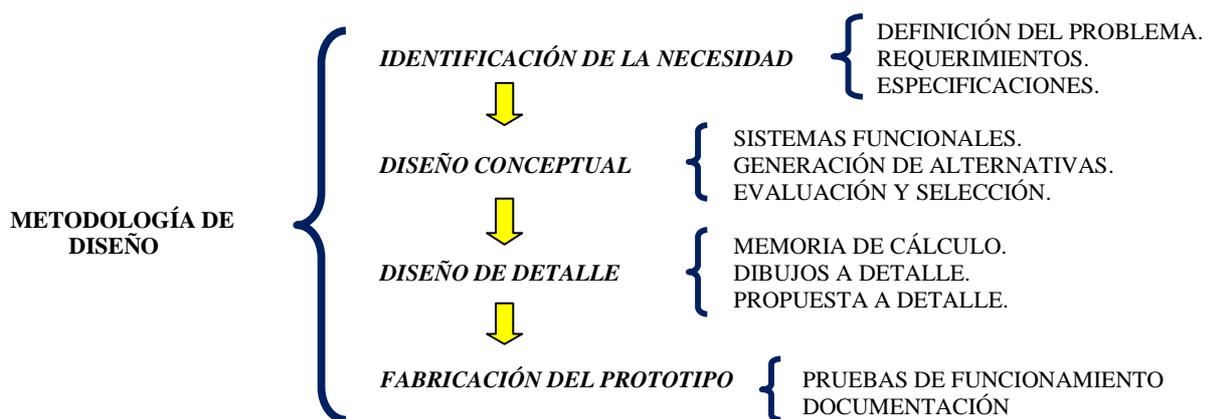


La mayoría de las técnicas que existen y se aplican durante las fases del proceso de diseño, utilizan una alteración del “razonamiento habitual” por un procedimiento propio de cada técnica. Para la generación de ideas no se requiere ser un experto en el tema sobre el que se razona, aunque en el proceso de resolución de un problema hay fases de análisis de las ideas aportadas y de construcción de la solución, que deben ser realizadas por especialistas.

Entre las herramientas más conocidas para solucionar el problema de diseño, se encuentran técnicas tales como: QFD, matriz de decisión, triz, cartas morfológicas, entre otras, que son muy utilizadas dependiendo de la fase del proceso en la que se encuentre el diseño.

Fig. 1.1. Proceso de diseño [22].

Con base en lo antes mencionado, la metodología de diseño puede ser resumida mediante una serie de pasos a seguir, cada uno con sus respectivos procesos intermedios, como se muestra en el siguiente cuadro 1.1:



Cuadro 1.1. Fases de la metodología de diseño.

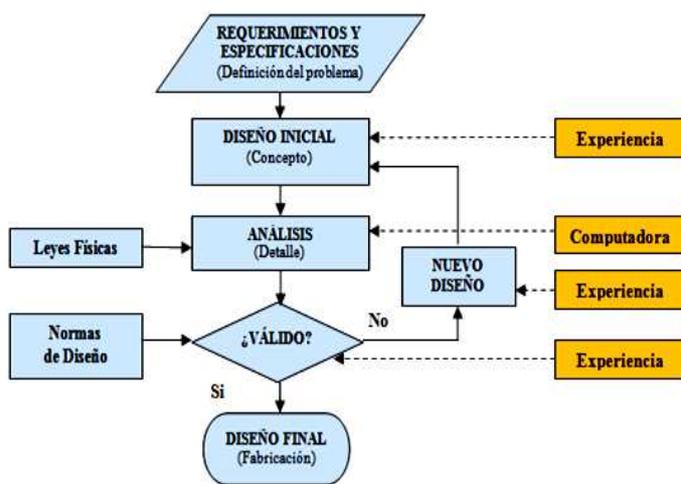


**IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD.** Es la fase considerada como medular en la metodología de diseño, es aquí donde la buena comprensión del problema con base en un entendimiento fuerte de las cantidades cualitativas (requerimientos), transformadas en cuantitativas (especificaciones), lleva a obtener una solución que satisfice las condiciones que definen el problema de diseño, lo cual va de la mano con la generación de conceptos.

**DISEÑO CONCEPTUAL.** Es en esta etapa donde se generan los conceptos, es decir se idealiza de varias maneras y formas un diseño, que cumpla con los requerimientos del problema, incluso ideas de alguna manera irreales, en cuanto a funcionamiento, manufactura, ergonomía, donde posteriormente se llevara a cabo la selección de alguno de ellos.

**DISEÑO DE DETALLE.** En esta fase de la metodología, es donde se evalúa el diseño, a través comparaciones, cálculos, análisis numéricos, simulaciones por computadora, etc., hasta que el diseño satisfaga los requerimientos y especificaciones planteadas al inicio del problema.

**FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO.** Aquí es donde el diseñador observa todo el trabajo realizado, es decir la construcción tangible de la solución, también se puede observar claramente el funcionamiento y en general algunos detalles y aspectos que pudieran ser omitidos en etapas anteriores durante el proceso de diseño, lo que permitirá tener una realimentación de cómo mejorar el diseño.



De esta manera la metodología de diseño puede ser representada en un diagrama de flujo de trabajo, donde se observa que el proceso es iterativo, tal y como se muestra en la figura 1.2. Bajo este esquema se puede depurar el proceso involucrando los requerimientos en cada una de ellas, según sea el caso, en cualquiera de las etapas de diseño, dejando entrever lo que se conoce como reingeniería.

En la figura siguiente se puede ver claramente que la experiencia del diseñador o equipo de diseño involucrado en la solución del problema, juega un papel sumamente importante durante el proceso, donde las computadoras son utilizadas casi siempre para propósitos definidos en la etapa de diseño de detalle.

Fig. 1.2. Metodología del proceso de diseño [15].

### 1. 2. 2 METODOLOGÍA DE DISEÑO ÓPTIMO.

Dada la naturaleza iterativa del proceso que se lleva a cabo en la metodología de diseño, existen fases o etapas donde pueden ser aplicadas técnicas denominadas evolutivas, que son derivadas de la teoría de optimización y que a su vez provienen de la inteligencia artificial, con el objeto de obtener no sólo una buena solución, sino tener la mejor solución posible de un problema de diseño, debido a la gran versatilidad y poder de cálculo que tienen las computadoras en la actualidad, es por ello que a continuación se describe brevemente la inteligencia artificial y su relación con la metodología de diseño.



---

### 1. 2. 2. 1 INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA).

Dentro del ámbito de la ingeniería, la inteligencia artificial (i.e. IA) es una de las áreas que causa mayor expectación, incluso dentro de la sociedad en general, debido a que la búsqueda para comprender los mecanismos de la inteligencia ha sido la piedra filosofal del trabajo de muchos científicos por muchos años y lo sigue siendo. Dentro de las áreas de la inteligencia artificial lo que más ha atraído, es el aprendizaje de máquinas, resultando vital el proceso de emular comportamientos inteligentes, permitiendo que un sistema pueda mejorar su comportamiento sobre la base de la experiencia que recoge al efectuar una tarea repetitiva y que además, tenga una noción de lo que es un error y que pueda evitarlo [7].

La inteligencia artificial en la actualidad incluye varios campos de desarrollo tales como: la robótica, usada principalmente en el campo industrial; comprensión de lenguajes y traducción; visión en máquinas que distinguen formas y usadas en líneas de ensamble; reconocimiento de palabras; sistemas computacionales expertos, y nuevas aplicaciones que incluyen el diseño asistido por computadora, ingeniería de software, gestión y administración de procesos, etc. Las características principales de la inteligencia artificial que son de gran aprovechamiento en la teoría de optimización y como consecuencia, en la aplicación a la metodología de diseño en ingeniería, son las siguientes:

- ⊕ Un algoritmo computacional. El algoritmo especifica cómo encontrar la secuencia de pasos necesarios para resolver un problema dado (programa declarativo). En contraste con los métodos tradicionales, que siguen un algoritmo definido, que especifica explícitamente cómo encontrar las variables de salida para cualquier variable dada de entrada (programa de procedimiento) [25].
- ⊕ El *comportamiento emergente*, el cual aparece cuando se puede generar un sistema complejo a partir de reglas sencillas. Para ello se requiere que el sistema en cuestión sea *iterativo*, es decir, que el mismo proceso se repita de forma continua y además que las ecuaciones matemáticas que definen el comportamiento de cada paso sean no lineales [25].
- ⊕ El uso de programación matemática como herramienta principal de solución, se ha permitido incorporar técnicas evolutivas a algoritmos computacionales, con el objetivo de adquirir la habilidad de aprender a partir de la experiencia.
- ⊕ Tales tareas reducen costos, riesgos en la manipulación humana en áreas peligrosas, mejoran el desempeño de elementos expertos, y mejoran el control de calidad sobre todo en el ámbito comercial.

Gracias a estas características se puede relacionar fuertemente el proceso de diseño con algoritmos computacionales en el que interviene la inteligencia artificial, para resolver problemas no lineales, estocásticos, o componentes caóticos, etc., con un dominio especializado donde ordinariamente se requiere experiencia humana. Sin embargo, estas técnicas son más bien de soporte y apoyo más que remplazos para los humanos expertos, siendo una herramienta de ayuda en la toma de decisiones. Bajo este contexto se conoce como inteligencia artificial a:

*“Al proceso que realiza un algoritmo computacional, que es capaz de “tomar una decisión” durante un proceso heurístico, el cual es un proceso que intenta reproducir actividades realizadas por la naturaleza, todo ello a través de un número de parámetros o criterios modificables dentro de éste y que al final generan una respuesta propia del algoritmo.” [7]*

La programación matemática requerida para este tipo de algoritmos computacionales se ha ido complicando con el pasar de los años, ya que su desarrollo demanda tiempo y un buen equipo de programadores.



### 1. 2. 2. 2 DISEÑO ÓPTIMO.

Tradicionalmente, un diseño se realiza siguiendo un proceso *iterativo*. Esta metodología presenta el inconveniente de que las modificaciones dependen en demasía de la experiencia del diseñador, obteniéndose soluciones que no son las mejores y además, con un alto costo en tiempo, ya que las responsabilidades de un diseñador en el proceso de toma de decisiones son muchas, pero principalmente [53]:

- ⊕ Definir las especificaciones del problema.
- ⊕ Elegir criterios de diseño adecuados.
- ⊕ Modelar y evaluar.
- ⊕ Realizar cálculos.
- ⊕ Interpretar y evaluar los resultados.
- ⊕ Elegir la mejor de las soluciones e incluso proponer mejoras.

La última actividad en la lista, elegir la mejor solución y mejorarla, depende fuertemente de la experiencia del diseñador, por lo que no es simple. Además, el diseñador no dispone de los parámetros o la capacidad suficiente para asegurar que la última propuesta de solución que obtenga sea la óptima, ya que le es físicamente imposible evaluar el espectro completo de posibles soluciones.

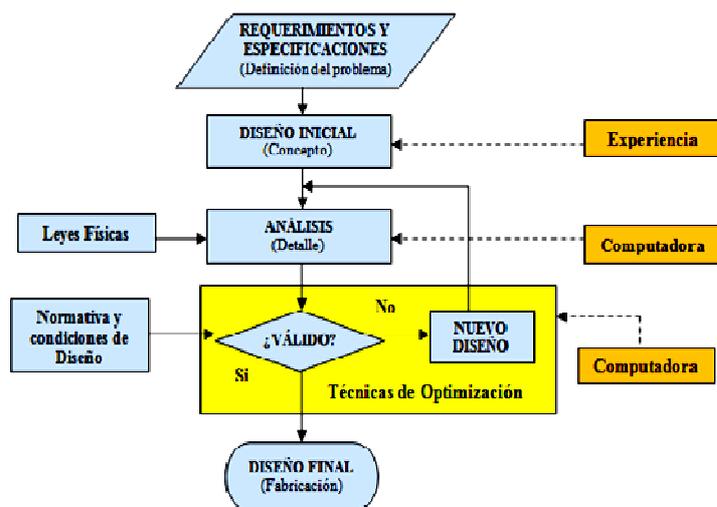


Fig. 1.3. Metodología del proceso diseño óptimo. [15]

Es por ello que el propósito de incluir los conceptos de la teoría de optimización e inteligencia artificial a la ingeniería de diseño, es el de obtener una solución a un problema de diseño que cumpla con todas las condiciones y restricciones dadas, y que su vez resulte ser la mejor en cuanto a uno o varios criterios de diseño previamente establecidos, de una manera rápida y eficaz.

Al mismo tiempo se han realizado intentos para automatizar el proceso de diseño, realizando la fase de síntesis mediante el empleo de técnicas de optimización. Para conseguir una solución del problema más rápida, y analizando un mayor número de soluciones, permitiéndoles mayor dedicación a fases más creativas del diseño, y la posibilidad de considerar especificaciones, cada vez más numerosas y difíciles de cumplir, que se exigen a las estructuras actuales de forma que el resultado se acerque al óptimo.

Así, se ha ido conformando el proceso de diseño hasta el esquema mostrado en la figura 1.3, diseño óptimo. En dicha figura se puede observar que la integración de la computadora al proceso de diseño es mayor, atacando principalmente las fases de diseño conceptual, análisis y de diseño de detalle, utilizando la experiencia del diseñador adquirida en diseños precedentes en la fase inicial del proceso. De esta manera el diseño óptimo puede definirse como:

*“...el desarrollo y aplicación de técnicas de optimización mediante simulaciones por computadora, interactivas o automáticas, para obtener mejores diseños, que sean de costo mínimo y que cumplan todas las condiciones del problema” [53].*



---

Con este planteamiento quedan expuestas las tres características fundamentales del problema de diseño óptimo: las variables de diseño, la función objetivo y las restricciones. El objetivo del diseño óptimo es obtener el mejor diseño, es decir, un conjunto de valores de las *variables de diseño*, que minimice o maximice, según sea el caso, una *función objetivo* y que a su vez cumpla una serie de *restricciones* que dependen de los valores de las variables de diseño [17].

1. **Variables de diseño.** Son aquellas variables que son cuantitativas, donde su valor inicial es tomado de las condiciones iniciales del problema. Dichas variables de diseño tomadas en consideración por el problema de diseño óptimo pueden ser: Propiedades geométricas (áreas, espesores, momentos de inercia, etc.); Topología de la estructura (nodos y conexiones de los elementos); Propiedades del material de la estructura, entre otros.
2. **Función objetivo.** Es aquella función que el diseñador determina como objetivo final, durante el proceso, donde la optimización dependerá del tipo de variables que se consideren para la solución del problema. Tradicionalmente se ha buscado el diseñar estructuras de peso mínimo, lo que ha conducido a que la función objetivo más habitual sea el peso de la estructura. Sin embargo, en otras aplicaciones el peso no es el factor determinante y se recurre al empleo de otras funciones objetivo, tales como desplazamiento, rigidez, esfuerzo, etc.
3. **Restricciones.** Son las condiciones que son consideradas como los límites de las variables de diseño, para lograr el cumplimiento de la función objetivo y que se deben cumplir para que un diseño pueda ser considerado como válido.

El problema planteado de esta manera se puede resolver mediante diferentes métodos como: optimización estructural, algoritmos genéticos, criterios de optimización, etc. A continuación se presenta algunas ventajas que permiten tomar una decisión para utilizar la metodología de diseño óptimo:

- ⊕ El diseñador define los criterios de inicio, tal y como sucede con los métodos tradicionales.
- ⊕ El rango de parámetros para la solución del problema es mucho mayor que en cualquier método tradicional.
- ⊕ Capacidad de abarcar un número mayor de posibilidades de solución en un lapso relativamente más corto, siempre cumpliendo con los criterios establecidos.
- ⊕ El diseñador puede, aún con las técnicas convencionales o tradicionales, ser capaz de dar solución, mas no el mejor, a un problema analizando un número finito de posibles respuestas en un tiempo largo, y con técnicas de inteligencia artificial el tiempo podría ser reducido.
- ⊕ Proporciona una solución máxima (óptima), dentro de un rango de posibles soluciones para un problema en particular.

### 1.3 OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL (SO).

El tema de optimización estructural comenzó a desarrollarse desde hace 20 años debido a la complejidad en las matemáticas y al surgimiento de computadoras cada vez más potentes para realizar una mayor cantidad de cálculos a gran velocidad. Comenzó por un gran número de analistas estructurales, quienes llegaron a la mejora en algoritmos usados para la optimización del diseño, donde un número importante de variables y restricciones, tienen que ser manipuladas necesariamente para la solución de un problema. Cada vez hay más y más actividades de investigación dirigidas hacia la realización de estos desarrollos y hacerlos disponibles, fáciles, de bajo costo y sobretodo confiables para ingenieros, científicos, etc. [26]



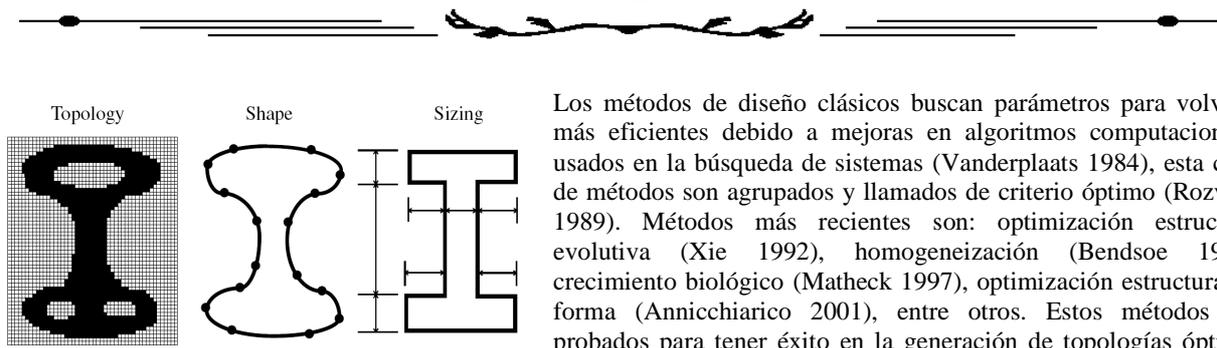


Fig. 1.4. Solución de un problema bajo tres tipos distintos de optimización estructural. [51]

Los métodos de diseño clásicos buscan parámetros para volverse más eficientes debido a mejoras en algoritmos computacionales usados en la búsqueda de sistemas (Vanderplaats 1984), esta clase de métodos son agrupados y llamados de criterio óptimo (Rozvany 1989). Métodos más recientes son: optimización estructural evolutiva (Xie 1992), homogeneización (Bendsoe 1995), crecimiento biológico (Matheck 1997), optimización estructural de forma (Annicchiarico 2001), entre otros. Estos métodos son probados para tener éxito en la generación de topologías óptimas para estructuras continuas, como se muestra en la figura 1.4, para tratar la densidad de elementos como una variable de diseño. De esta forma la optimización estructural puede definirse como:

*“Búsqueda de diseños de estructuras que minimicen una función objetivo, frente a un juego de variables de diseño y teniendo en cuenta restricciones a cumplir, tales como: valores máximos de esfuerzo o deformación, volumen, masa flujo, etc., obteniendo la mejor solución posible y que a su vez se fabrique con la menor cantidad de material posible.”* [26]

### 1. 3. 1 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.

Los métodos de optimización estructural basados en la suposición de continuidad en los cuales la configuración estructural fue fijada durante un proceso de optimización mientras la tarea fue encontrar el tamaño óptimo (dimensión) del miembro estructural satisfaciendo al mismo tiempo requerimientos de diseño y restricciones impuestas. Este tema se volvió un punto de inicio para un desarrollo de dos grandes enfoques de optimización estructural que todavía existen al día de hoy: Métodos incrementales y Métodos heurísticos.

**MÉTODOS INCREMENTALES:** son aquellos que hacen uso de cálculos de las derivadas de una función objetivo  $f(x)$ , además de las restricciones para buscar determinar el óptimo, de un grupo de variables de diseño que pueden proveer un valor mínimo o un máximo para una función específica. Se asume que la solución existe, es decir que en el problema y la función objetivo debe haber continuidad, ya que es el principio básico para poder encontrar un gradiente. Algunos de los más conocidos son:

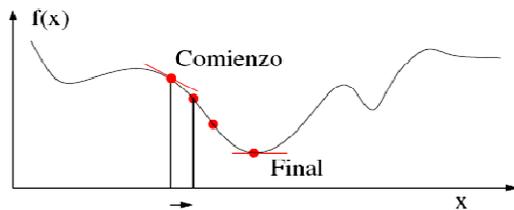


Fig. 1.5. Método incremental o de gradiente. [9]

- ⊕ Optimización sin restricción y con restricción.
- ⊕ Método de los Multiplicadores de Lagrange.
- ⊕ Programación Lineal (LP) y Lineal Integral (ILP).
- ⊕ Programación Secuencial Lineal (SLP) y No Lineal (NLP).
- ⊕ Métodos de Homogeneización.
- ⊕ Teoría de distribución Óptima.

**MÉTODOS BASADOS EN LA HEURÍSTICA:** son aquellos que son desarrollados de cualquier idea intuitiva dentro del problema, o de argumentos convincentes de metodologías de optimización basados en la observación de la naturaleza, es decir que estos métodos se basan en simples reglas y sentido común, derivado de la emulación de procesos que suceden a diario en la naturaleza, pero no garantizan encontrar una solución óptima; sin embargo en principio determinan la mejor solución obtenida dentro del tiempo permitido. Siendo los más representativos:



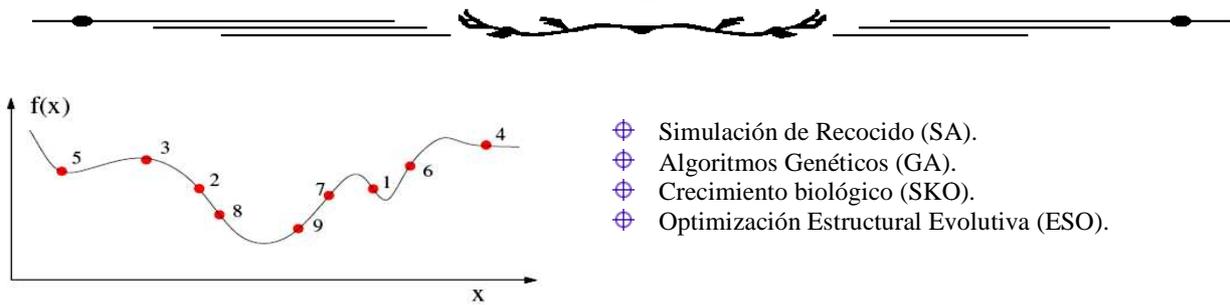


Fig. 1.6. Método heurístico. [9]

### 1.3.1.1 OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL EVOLUTIVA (ESO).

Xie y Steven (1993) desarrollan esta técnica a la que bautizaron como Optimización Estructural Evolutiva (i.e. ESO). Es un método de optimización que se integra al análisis por elementos finitos (FEA), dando un acercamiento intuitivo al óptimo. Es una combinación de los métodos: heurístico y pendiente, se acerca a la optimización estructural basándose en las distribuciones de esfuerzo en una estructura, obteniendo el óptimo deseado removiendo el material esforzado más bajo de la misma. La definición formal de ESO es:

*“ESO es basado en el simple concepto de remover lentamente el material ineficiente de una estructura, la forma resultante de ésta, evoluciona o se desarrolla hacia la óptima.”*[26]

El método es capaz de resolver de manera confiable, muchos problemas de tamaño, forma y topología de una estructura, además de ser fácil de entender y trabajar, ofrece un nuevo enfoque de optimización estructural, el cual supera más de los problemas asociados que las técnicas tradicionales. Las restricciones de la optimización del método puede ser basada en: esfuerzos, desplazamientos, frecuencias, fuerzas, etc.



Fig. 1.7. Ejemplo de una estructura óptima obtenida mediante ESO [26].

El proceso de optimización estructural se da tradicionalmente, siguiendo una vía paramétrica, donde la forma y la topología de una estructura, son definidas por un grupo de parámetros, los cuales son modificados para conseguir un objetivo como: un volumen mínimo, reducción de concentradores de esfuerzos, etc., pero sin violar ninguna restricción. En general el proceso evolutivo requiere de dos parámetros: el primero es una *tasa de rechazo* (RR) y el segundo es una *tasa evolutiva* (ER).

La remoción de material está basada en un nivel de esfuerzos, proveniente de un análisis por elementos finitos. Se eliminan haciendo una comparación entre el esfuerzo en cada elemento ( $\sigma_0$ ) y el esfuerzo máximo de von Mises de la estructura ( $\sigma_{\text{máx}}$ ), donde todos los elementos que satisfacen la condición son borrados del modelo:



$$\frac{\sigma_o}{\sigma_{max}} < RR_i \quad \text{Donde } RR_i \text{ es la tasa de rechazo} \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

El ciclo del análisis y remoción de elementos se repite utilizando algún valor de tasa de rechazo ( $RR_i$ ) hasta alcanzar un estado estable. En esta fase una tasa evolutiva (ER) es introducida y añadida a la tasa de rechazo:

$$RR_{i+1} = ER_i + ER \quad i = 1, 2, 3, 4 \dots n \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

Con este incremento de la tasa de rechazo, el ciclo de análisis por elementos finitos y remoción de elementos se reanuda hasta alcanzar un nuevo estado estable. El proceso evolutivo continúa hasta lograr el óptimo deseado, aunque en la actualidad el tiempo que dure este proceso dependerá únicamente de la complejidad del problema, así como del tipo de solución que se necesite.

### 1. 3. 1. 2 ALGORITMOS GENÉTICOS (GA).

Es otro de los métodos de optimización estructural más comunes en la práctica, debido a su gran poder para encontrar el máximo valor dentro de un número valores máximos, los cuales se adaptan perfectamente a las restricciones impuestas por un problema.

Los algoritmos genéticos fueron desarrollados por John Holland (profesor de la Universidad de Michigan). Sus objetivos fueron: Explicar el proceso de adaptación de los sistemas naturales y el diseño de sistemas artificiales que conservan los mecanismos más importantes de dichos sistemas naturales. Éste enfoque permitió importantes descubrimientos en ambos sistemas científicos: naturales y artificiales. El tema central de búsqueda de un algoritmo genético fue la robustez, es decir el balance entre la eficiencia y la eficacia necesaria para la sobrevivencia en diferentes entornos. El tener un sistema artificial más robusto, permite alcanzar altos niveles de adaptación, y con ello una reducción o eliminación de diseños costosos. Bajo este contexto un algoritmo genético se puede definir como:

*“Un algoritmo de búsqueda basado en los mecanismos de selección natural y genética, que combina la sobrevivencia del más apto entre un grupo estructurado con una estructura que aún intercambia información aleatoriamente, formando un algoritmo de búsqueda con algunos los estilos innovadores de búsqueda humana.” [11]*

Estos algoritmos utilizan por lo menos 3 operadores: la reproducción, el cruce y la mutación. El operador reproducción, permite una alta producción de cromosomas (cadenas) y produce hijos para la siguiente generación. El operador cruce, usa la probabilidad, intercambia información genética por la desintegración de dos cromosomas en un lado aleatorio y une la primera parte de un cromosoma con la segunda parte de otro cromosoma. La mutación introduce cambios ocasionales en una posición aleatoria de la cadena con una probabilidad de mutación específica. El procedimiento general de los algoritmos genéticos en problemas de diseño se describe a continuación:

1. Una apropiada representación de un cromosoma debe definirse para representar la combinación de variables de diseño que corresponden a la aptitud o valores de la función objetivo.
2. Se especifican las probabilidades de cruce y mutación. El tamaño de la población y el máximo número de iteraciones son seleccionados, y una población inicial es generada en un sistema genético.
3. Los valores de la función objetivo o aptitud son evaluados en cada solución en la generación actual.
4. Aplicando los tres operadores a dichas soluciones en la generación actual se produce una nueva población.
5. Repetir los pasos 3 y 4 mientras el máximo número de generaciones sea rechazado.



En la figura 1.8, se muestra un ejemplo de optimización mediante la aplicación de algoritmos genéticos. Se tiene el parte del proceso iterativo y una comparación de esfuerzos entre pieza original y la pieza optimizada.

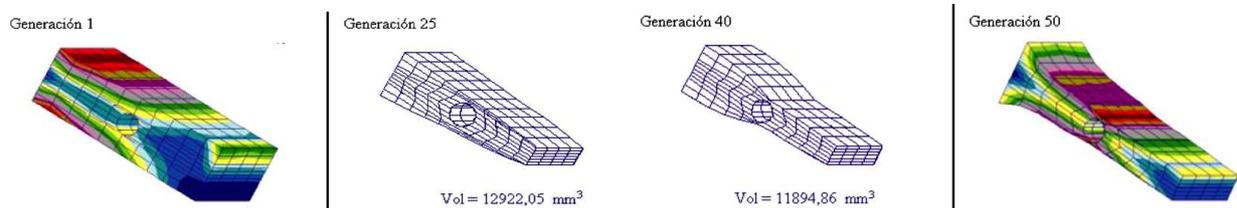


Fig. 1.8. Optimización de forma a través de algoritmos genéticos [28].

### 1. 3. 1. 3 RECOCIDO SIMULADO (SA).

El recocido simulado fue propuesto en 1983 por S. Kirkpatrick. Es una simulación del proceso físico de recocido (tratamiento térmico de metales). Hace uso de un parámetro “temperatura”, que es modificado durante el proceso de optimización. Si la temperatura es alta, entonces los cambios de temperatura son grandes, si la temperatura es baja, entonces los cambios de temperatura son más pequeños, inicialmente la temperatura es alta e irá disminuyendo conforme transcurra el tiempo. En cada iteración el método de recocido simulado evalúa algunos vecinos del estado actual  $s$  y probabilísticamente decide entre efectuar una transición a un nuevo estado  $s'$  o quedarse en el estado  $s$ . En el ejemplo de recocido de metales, el estado  $s$  se podría definir en función de la posición de todos los átomos del material en el momento actual; el desplazamiento de un átomo se consideraría como un estado vecino del primero. Típicamente la comparación entre estados vecinos se repite hasta que se encuentre un estado óptimo que minimice la energía del sistema o hasta que se cumpla cierto tiempo computacional u otras condiciones. El problema con este método es que no puede asegurar que la solución encontrada sea un óptimo global, pues el espacio de búsqueda explorado no abarca todas las posibles variaciones del sistema obteniendo soluciones óptimas locales. Los elementos básicos del algoritmo de recocido simulado son listados como sigue:

1. Configuración: una solución del problema.
2. Mover: una transición de una configuración a otra.
3. Configuración cercana o vecina: un resultado de un paso.
4. Función Objetivo: una medida de que tan buena es una solución.
5. Programa de enfriamiento: que tan alta debe ser la temperatura inicial, y las reglas para determinar (a) cuando la temperatura actual debe ser disminuida, (b) por cuanto la temperatura debe ser disminuida, y (c) cuando el proceso de recocido debe ser terminado.

### 1. 3. 2 TIPOS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.

#### 1. 3. 2. 1 Optimización de dimensión (SIZE).

En los problemas de optimización de dimensiones las variables de diseño son las dimensiones de los elementos estructurales (secciones, espesores, etc.) y se encuentran asociadas a las propiedades geométricas de las secciones transversales. En la figura 1.9 se muestra un ejemplo de este tipo de optimización

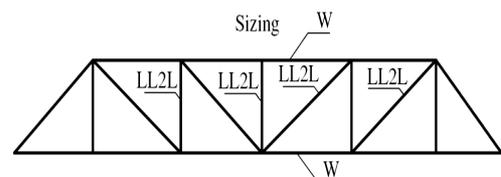


Fig. 1.9. Optimización de dimensión [44].



---

### 1. 3. 2. 2 Optimización de forma (SHAPE).

En problemas de optimización de forma, las variables de diseño definen la forma de la pieza, consisten en variar algunos contornos del modelo a ser diseñado a fin de mejorar su comportamiento mecánico como por ejemplo: reducir altas concentraciones de esfuerzos que normalmente aparecen en las esquinas de las piezas o en aquellas zonas donde ocurren cambios bruscos en la forma de la sección, las reducciones de peso, modificaciones de forma en su totalidad, etc., como se observa en la figura 1.10.

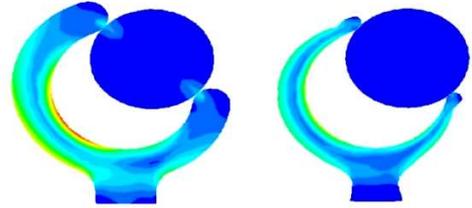


Fig. 1.10. Optimización de forma [45].

### 1. 3. 2. 3 Optimización topológica (TOPOLOGY).

En problemas de optimización topológica, no solamente se modifican dimensiones o posición de puntos característicos, sino también la existencia o no de elementos estructurales. Por ejemplo en la optimización topológica de una estructura reticulada se obtiene como respuesta cuáles barras deben constituir la estructura, y sus dimensiones. En la figura 1.11 se muestra un ejemplo de optimización topológica.

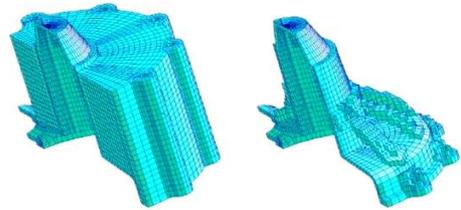


Fig. 1.11. Optimización topológica [51].

## 1. 4 OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL Y MANUFACTURA.

El diseñador es responsable no sólo del funcionamiento y aspecto del producto sino también de los costos y fabricación del componente. Diseñar no puede ser, por consiguiente, una actividad aislada, pero dirigirá todas las rutas de manufactura disponibles, con una visión de optimización de la calidad y costo del componente. El ejercicio de diseñar es conducido no sólo de la especificación de la forma del componente, sino también de las restricciones de manufactura, de maquinaria, material, herramental, y condiciones del procesamiento. El Diseño para manufactura asistido por computadora es actualmente la forma principal de implementación de la Ingeniería concurrente, es decir que el CAD/CAM, es usado popularmente como una aproximación de diseño, ya que el diseño simultáneo provee al diseñador de información de todas las fuentes posibles requeridas por el diseño y manufactura de componentes.

### 1. 4. 1 OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL E INYECCIÓN DE PLASTICO.

Actualmente la mayoría de los esfuerzos realizados por los investigadores se han enfocado en gran medida en la creación de nuevos y eficientes métodos de optimización, permitiendo que los diseños queden en la fase conceptual dejando fuera por el momento la fabricación. Muchos de los trabajos existentes en los últimos 10 años, dedicados a involucrar la optimización estructural con los procesos de manufactura más comunes, son pocos debido a que son demasiadas consideraciones a tomar en cuenta (propias de cada proceso), lo que hace de ello una tarea muy compleja.

Esto nos llevaría a la crear de un algoritmo computacional robusto, es decir un sistema experto, que contemple todas las posibilidades de cada uno de los procesos de fabricación y optimización en tan sólo un análisis.



---

Dichos trabajos han sido orientados a procesos tales como el estampado, utilizando la optimización para crear preformas óptimas que mejorarían el proceso. Algunos otros en los cuales se utiliza la teoría de optimización para introducirla en la reducción de costos de fabricación en particular en la reducción de los costos de maquinado. Pero en general no hay trabajos explícitos donde se involucren parámetros de cualquier proceso de manufactura durante el proceso de optimización.

En cuanto a la relación entre optimización y el proceso de inyección de plástico, los trabajos realizados se enfocan a los costos de fabricación de un molde, y a la modificación de diámetros del canal o serpentín de enfriamiento, para tener la mayor disipación de calor y tener un mejor enfilamiento de la piza al interior del molde. Lo cual en un sentido estricto quedaría fuera del diseño de piezas plásticas. Aunque también se ha intentado optimizar la localización de un punto de inyección en una pieza.

Se han hecho intentos por relacionar la optimización y la inyección en el diseño de piezas plásticas, pero no se ha presentado un trabajo que muestre la inclusión de parámetros de dicho proceso en la optimización. Es por ello que este trabajo, se vuelve relevante al mostrar la interacción ambos procesos optimización-manufactura, en esta búsqueda de encontrar un sistema experto en un futuro no muy lejano capaz de realizar dicha relación de una manera automática.

#### 1. 4. 2 PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICO.

El moldeo por inyección es un proceso que provee ventajas importantes, cuando se deben producir grandes cantidades de piezas con geometrías complejas. Algunas de las más tangibles son las siguientes: una parte moldeada por este proceso puede remplazar a otra en un ensamble de componentes, incluso de otros materiales; el color y la superficie final a menudo pueden ser moldeados directamente sobre la pieza, sin la necesidad de un proceso secundario; el bajo costo económico en grandes volúmenes de producción, entre otras [10].

El moldeo por inyección es un proceso de producción en masa. En general este proceso no se aplica cuando la producción de piezas se encuentra por debajo de 10000 piezas idénticas. La razón para esta limitante es la necesidad de construir un molde único para cada pieza. La producción debe ser lo bastante grande para que los costos del molde puedan ser amortizados sobre la cantidad manufacturada. Para piezas complejas los costos pueden ser de decenas de cientos de miles de dólares. En general el proceso de inyección de plástico, puede llegar a ser dividido en cuatro grandes grupos tal y como se muestra en la figura 1.12.

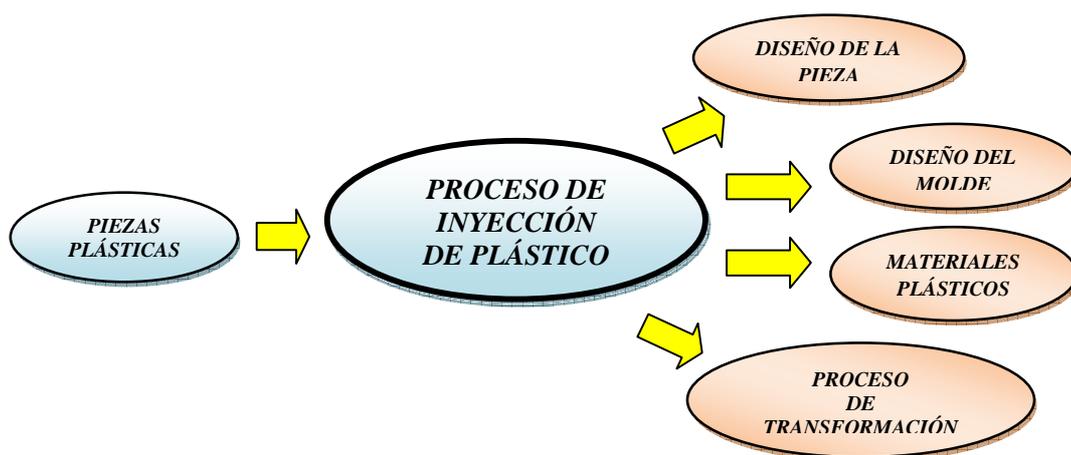


Fig. 1.12. Proceso de inyección de plástico dividido en cuatro categorías.



---

El moldeo por inyección genera piezas de pared delgada, aunque es posible obtener secciones gruesas y espesores de pared variable normalmente no se recomiendan. Esto es debido a que los materiales termoplásticos utilizados en este proceso de moldeo por inyección, son generalmente menos resistentes que los metales y son más apropiados para utilizarlos en aplicaciones altamente esforzadas. Sin embargo los materiales termoplásticos han sido desarrollados gradualmente con más y mejores características para ser usados para piezas móviles y en más aplicaciones estructurales. La “ingeniería plástica”, nylon, policarbonato, acetal, polisulfato, poliéster termoplástico y otros, particularmente cuando son reforzados con fibras de vidrio u otras fibras, son funcionalmente competitivos con zinc, aluminio y algunos aceros.

#### 1. 4. 2. 1 DISEÑO DE PIEZAS.

El diseño estructural de una pieza plástica, empieza por el análisis de cargas de la aplicación en cuestión. Conociendo el tipo y la magnitud de las solicitaciones, se realiza un estudio mecánico y de este modo se obtiene un pre-dimensionamiento y un cálculo aproximado de los espesores. Estas indicaciones que valdrían para el diseño en general de materiales deben ir acompañadas de otras que se utilizarán de forma exclusiva para el diseño con materiales plásticos (ver anexo 3).

Otras consideraciones como: son la uniformidad de espesores en las la pieza, la facilidad de desmoldeo, la capacidad del material fundido pueda acceder a todas las zonas de la cavidad del molde de forma uniforme y evitar al máximo los defectos provocados por líneas de unión, burbujas de aire, zonas con material frío, etc., son especialmente estudiadas cuando se está diseñando la pieza para ser fabricada en un material plástico.



Fig. 1.13. Piezas plásticas.

Una aplicación satisfactoria de la ingeniería termoplástica, requiere más de identificar un producto específico o varios. En muchos casos, antes del proceso debe ser determinada una resina específica de un conjunto del que pueden ser seleccionada. Durante este tiempo, los diseñadores también necesitan considerar si los procesos son capaces de reunir los requerimientos de diseño como son: dimensión, forma, detalles y tolerancias [18]. A continuación se describen brevemente algunos de los aspectos más importantes durante el diseño de piezas plásticas:

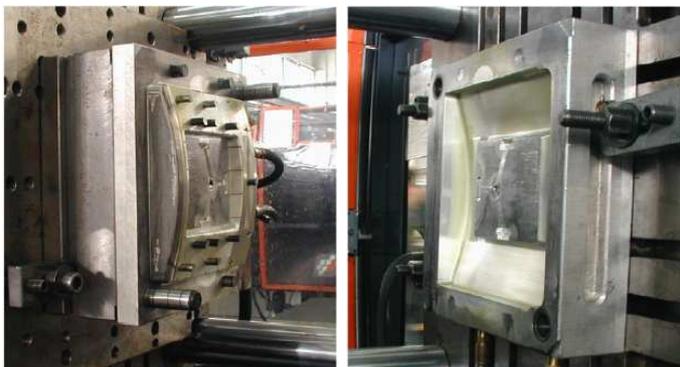
- **ESPESOR DE PARED.** Las partes plásticas típicas deben ser consideradas para tener una configuración típica de cáscara (Shell) con una superficie base y características que son adjuntas en la reunión de requerimientos funcionales. La actual determinación del espesor de pared está basada en un número de consideraciones que incluyen entre otras:
  - ⊕ Aplicación de requerimientos. Los requerimientos estructurales incluyen fuerzas, impacto, fatiga, deformación, etc., y son influenciados por el espesor de pared seleccionado. Cargas eléctricas también impactarán en el espesor de pared.
  - ⊕ Moldeabilidad. El tamaño de la pieza y facilidad del material para llenar el punto más alejado, puede determinar el espesor de pared mínimo. La máxima longitud del flujo es también una función del diseño de herramental con localización de la entrada y número de entradas usadas.
  - ⊕ Requerimientos del proceso. La clasificación está basada en un valor mínimo de espesor de pared, que la pieza diseñada debe cumplir para satisfacer los requerimientos.
  - ⊕ El espesor de pared típico especificado debe cumplir todas las consideraciones escritas. Desde un punto de vista de costo, la pared delgada utiliza el mínimo material y resulta en la rapidez de los ciclos de moldeo.



- 
- **REDONDEOS.** Los redondeos de una pieza plástica están en función del espesor de pared y se utilizan para reducir el nivel de esfuerzos en la pieza, en zonas donde existan concentradores de esfuerzo.
  - **NERVIOS O COSTILLAS.** Son pequeñas secciones que proveen de rigidez a una pieza, en zonas donde se necesite quitar material sólido, creando un pequeño entramado, sin la necesidad de aumentar la masa de la pieza.
  - **AGUJEROS.** Los agujeros o zonas donde se alojan barrenos dependerán de su localización dentro de la pieza, así como de la tornillería necesaria para fijar la pieza.
  - **LÍNEA DE PARTICIÓN.** La línea o superficie de partición, es a través de la cual, será diseñado el molde, debido a que ésta proporciona la dirección de extracción de la pieza inyectada, así como la apertura y cierre del molde.
  - **ÁNGULOS DE SALIDA O DESMOLDEO.** Estos ángulos se aplican a la pieza, con base en la dirección de apertura y cierre del molde, para poder extraer la pieza con mayor facilidad.
  - **PUNTOS DE INYECCIÓN.** Puntos donde se sitúa la boquilla para iniciar el vaciado del material caliente a alta presión, para llenar la cavidad del molde.

#### 1. 4. 2. 2 DISEÑO DE MOLDES.

Un molde consiste básicamente en dos partes: una parte estacionaria (plano de la cavidad) y otra que contiene el lugar donde será inyectado el polímero, que funcionará como una placa deslizante para proveer el movimiento de apertura y cierre del molde. La línea que separa estas dos piezas se le conoce como línea, plano o superficie de partición.



El diseño del molde de una pieza plástica, va de la mano con el diseño de la pieza, ya que se debe tener en cuenta una posible dirección de extracción de la misma, para con ello poder dimensionar el molde y dividirlo a través de la superficie de partición, así como de visualizar cuántos insertos puede llevar el molde, el número de los expulsores o también llamados “botadores”, y muy importante también crear el circuito de refrigeración, además de con esto poder dar pauta a conocer las fuerzas necesarias para la apertura y cierre de dicho molde [5].

Fig. 1.14. Ejemplo de un molde para una pieza. [38]

Otros factores sumamente importantes durante el diseño de moldes, son la buena refrigeración, además de los tiempos de expulsión, apertura y cierre del molde, así como la presión y temperatura a la cual se debe inyectar el material y que debe soportar el material del cual se fabrica el molde, con el fin de que la pieza plástica obtenida, se de buena calidad.



### 1. 4. 2. 3 PROCESO DE TRANSFORMACIÓN.

El proceso de transformación es todo el proceso que sufre el material, desde su forma sólida, hasta convertirse en la pieza plástica final, después de un proceso de calentamiento, inyección, enfriamiento y solidificación, sufrido a lo largo de todo el proceso de inyección de plástico. El material plástico normalmente es recibido de forma granular, en la tolva de una máquina de moldeo por inyección (o inyectora), los cuales alimentan un cilindro caliente, que funde o plastifica los gránulos de material. Una temperatura típica de fundición de dichos gránulos es de cerca de 180 °C (350 °F), aunque éstas varían con diferentes materiales y condiciones de moldeo [5].

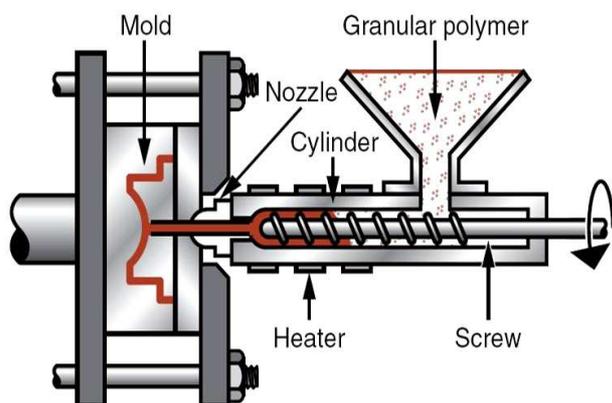


Fig. 1.15. Proceso de moldeo por inyección de plástico. [22]

El molde es usualmente de acero, está sujeto en la máquina y es enfriado por agua. Un émbolo fuerza al material fundido del cilindro a entrar al molde, es decir lo “inyecta al molde”, éste se enfría y solidifica. El molde es abierto y la pieza moldeada es expulsada por los botadores, que en ocasiones son automáticos. Esto requiere cerca de 45 seg/ciclo, aproximadamente, aunque depende del enfriamiento del material en el molde, el cual a su vez depende de la masa y la geometría de la pieza. Se utilizan altas presiones, del orden de 70000 kPa (10000 lbf/in<sup>2</sup>) o más, requeridas durante la inyección.

En la actualidad casi todas las máquinas de inyección disponen de un pistón de dosificación-plastificación en forma de husillo que, al girar cierto número de vueltas, realiza la carga del material, siendo obligado por éste a retroceder hasta una posición tope, previamente regulada, quedando el cilindro completamente lleno de material.

La plastificación mediante husillo proporciona una fusión regular y homogénea y posibilita un llenado del molde a presiones más bajas, combinando el movimiento giratorio con su desplazamiento longitudinal. El trabajo que realiza el husillo es: cuando termina la inyección anterior se queda en la posición más adelantada. Al empezar a girar, toma el material frío de la tolva y lo transporta hacia la parte delantera, al tiempo que lo calienta.

Una vez que llega a la parte anterior, estando la válvula de descarga cerrada, el husillo ejerce grandes esfuerzos de corte sobre el material, como ocurre en las extrusoras, a la vez que retrocede y, cuando tiene acumulada suficiente cantidad para llenar el molde, deja de girar, quedando en espera. Al acoplarse la boquilla al bebedero, se abre la válvula de descarga y el husillo actúa ahora como émbolo, comprimiendo y haciendo fluir material a través de la tobera, hasta llenar el molde, transmitiendo al interior de éste toda la presión.

### 1. 4. 2. 4 MATERIALES PLÁSTICOS.

Los materiales termoplásticos son compuestos químicos orgánicos sintéticos de alto peso molecular que se combinan cuando son calentados y solidifican cuando son enfriados. Cuando se enfrían son relativamente resistentes, durables y apropiados para una gran variedad de aplicaciones en productos. Para una correcta selección de materiales plásticos es importante que el diseñador tenga un conocimiento general de los materiales, así como experiencia en el manejo de sus características [10].



---

El primer paso será un buen entendimiento de las funciones que deberá realizar la pieza y una correcta identificación de las condiciones de trabajo a las que se verá sometida. Una correcta determinación de las condiciones puede tener en cuenta los siguientes puntos:

- Determinar las condiciones de carga estructurales.
- Determinar el ámbito de trabajo de la pieza.
- Tolerancias dimensionales.
- Normativas existentes en el campo de aplicación.
- Especificaciones de mercado.

Una vez realizado lo anterior podemos exigir en cada una de las características del material las prestaciones adecuadas a las necesidades requeridas. A continuación se enuncian las características más comunes a tener en cuenta en el momento de seleccionar un material.

- Propiedades mecánicas: Rigidez, resistencia al impacto, resistencia a fatiga, dureza, etc.
- Propiedades a fricción: Los coeficientes de fricción y su efecto en la temperatura, la resistencia al desgaste de los materiales implicados y la posible utilización de lubricación.
- Propiedades térmicas: Máxima temperatura de servicio, temperatura de reblandecimiento y el coeficiente de dilatación térmica.
- Propiedades de resistencia a la intemperie: Resistencia a la humedad, resistencia a los rayos UV, resistencia a la oxidación, etc.
- Propiedades químicas: resistencia química del plástico en diferentes disolventes y en diversos medios, resistencia química a altas temperaturas.
- Propiedades ópticas: Grados de transparencia del polímero, acabados superficiales, brillo de la pieza, etc.
- Precio de la materia prima: Un bajo precio de la materia prima.

Será importante empezar por determinar, aquellas propiedades que no influyen directamente al diseño, como son las propiedades ópticas, térmicas, eléctricas, químicas, resistencia a la intemperie, etc. Realizando este análisis, se pueden eliminar familias enteras de productos que no cumplen las características requeridas.

#### **1. 4. 3 LIMITANTES DEL TRABAJO.**

La metodología de optimización estructural que se presentará más adelante, se limita a un solo proceso de manufactura, en este caso al moldeo por inyección de plástico, aunque la idea principal podrá extenderse a otros procesos, con sus propios parámetros y/o restricciones, es por facilidad el reducir el espacio de procesos a tan sólo uno.

La metodología se limitará únicamente al diseño geométrico de elementos mecánicos plásticos, sin ahondar en los detalles de la fabricación del molde, elección de la maquinaria e incluso costos de operación, lo cual por si solos son temas que sobrepasan los alcances de este trabajo.

En este trabajo se mostrará la solución óptima, obtenida para sólo tres materiales plásticos utilizados muy comúnmente en el proceso de inyección de plástico.

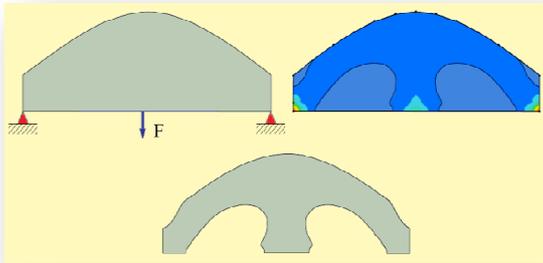
Dada la complejidad que existe para obtener un sistema inteligente o experto, la metodología mostrada, no involucra la introducción directa de parámetros de manufactura en un algoritmo computacional, con lo cual se deja de lado la programación. Sin embargo el trabajo aquí presentado es un preámbulo para poder llegar a dicho sistema experto, planteando una serie de restricciones del proceso de manufactura, que pueden ser programables.



---

## CAPÍTULO 2

# *Implementación del Método de Optimización Estructural.*



*No basta saber, se debe también aplicar.  
No es suficiente querer, se debe también hacer.*

W. Goethe.

### 2.1 INTRODUCCIÓN.

Actualmente las computadoras son utilizadas en diseño estructural casi siempre para propósitos en las fases de diseño de detalle. Hoy en día su rol ha comenzado a ser más y más versátil. Estas han comenzado a aplicarse a todas las fases del proceso de diseño, desde la generación del concepto a través de diseños preliminares (especificaciones de forma) y finalmente en el proceso de diseño de detalle (dimensionamiento, etc.). Se requiere un nuevo marco de programación para beneficiarnos totalmente de los progresos en tecnología de información. Entre los paradigmas computacionales, la programación evolutiva (e.g. EC) es ahora reconocida como apropiada, particularmente para varias aplicaciones tradicionales y de alto nivel en ingeniería estructural.

La programación evolutiva es una moderna técnica de búsqueda, la cual utiliza modelos computacionales, conceptos y mecanismos darwinianos como evolución y selección natural, que son codificados en algoritmos evolutivos y usados para resolver problemas en muchos campos de la ciencia. Desde el punto de vista de la ingeniería, esto puede ser entendido como la búsqueda y proceso de optimización en donde la población de soluciones sufre cambios graduales.

Los procesos evolutivos básicos son denominados “algoritmos evolutivos simples”, estos contienen el grupo mínimo de características necesarias para ser un sistema evolutivo Darwiniano. Estos tienen sorprendentemente uso de propiedades, principalmente relacionadas para resolver problemas complejos de optimización global y funcionan bien cuando se aplican a problemas no lineales, estocásticos, o componentes caóticos, donde las técnicas tradicionales, son tradicionalmente no satisfactorias.



## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.

La metodología de diseño óptimo presentada, involucra reglas enfocadas a la optimización topológica, es decir estrategias heurísticas las cuales provocan una convergencia entre las distintas posibles soluciones, lo que se puede observar como una “evolución” hacia la solución óptima de una manera lenta y gradual. Permitiendo que la geometría responda a las condiciones a las que se encuentra sometido algún modelo, obteniendo con esto una estructura que responde de la mejor manera a dichas condiciones y restricciones conforme avanza el tiempo.

Además dicha metodología, integra un aspecto muy importante a diferencia de las metodologías de optimización estructural más comunes utilizadas en la actualidad, y es la integración de la manufactura al proceso de optimización, para con ello obtener estructuras óptimas que sean manufacturables. Dicha metodología se basa en tres principios básicos:

1. El análisis por elementos finitos (FEA). En la actualidad es una herramienta muy popular en el diseño de elementos mecánicos, es por ello que esta técnica es la base para dar solución al problema de optimización, al proporcionar un nivel de esfuerzos de una estructura, que es modificado a través del proceso de optimización y el cumplimiento de un criterio de diseño.
2. El proceso de optimización. En este trabajo se utiliza la optimización topológica como estrategia de optimización por ser la más común y utilizada hoy en día, mediante el empleo del software Hyperworks y su módulo específico para ello Optistruct (ver capítulo 1), debido a que dicho paquete utiliza algoritmos genéticos como técnica evolutiva para la solución. De ésta manera se define a los algoritmos genéticos como técnica de optimización dentro de la metodología propuesta en este trabajo.
3. La adecuación para manufactura. Dicha adecuación muestra la interacción entre optimización y manufactura, llevándose a cabo al aplicar una serie de criterios geométricos, derivados de un proceso de manufactura particular, para obtener una geometría óptima que pueda ser llevada a producción, es decir una estructura óptimo-manufacturable.

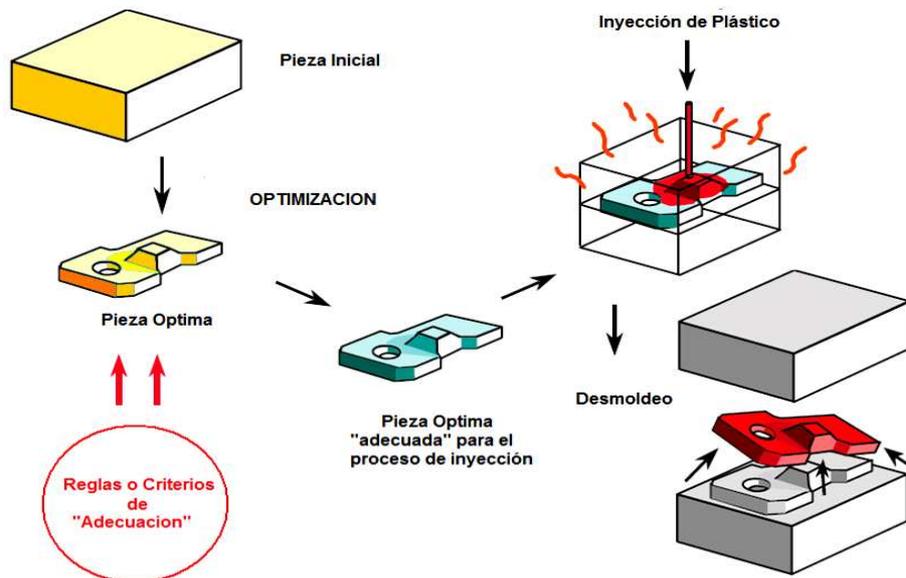


Fig. 2.1. Idealización de la metodología que integra optimización estructural, al proceso de inyección de plástico.



## 2.2.1 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.

Para lograr una mejor descripción del método de optimización estructural, se planteó inicialmente como un diagrama de caja negra como se observa en la figura 2.2, lo cual sirvió para tener un panorama general de lo que se pretende y posteriormente desarrollar el método de optimización.

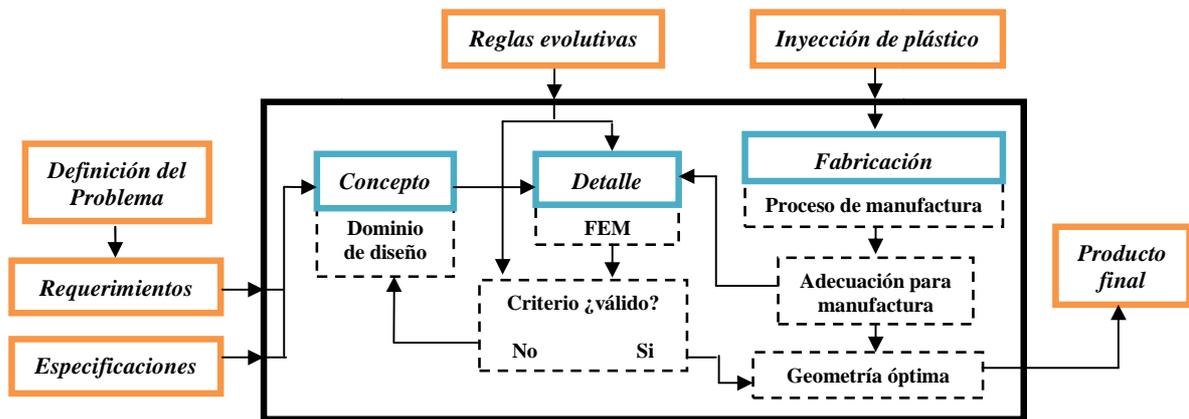


Fig. 2.2. Diagrama inicial de caja negra del proceso de optimización estructural propuesto.

Las piezas plásticas de manera general, tienen la característica principal de ser piezas de pared delgada, esto es muy útil durante el proceso de optimización, ya que estas piezas pueden ser simplificadas mediante cascarones o Shells, que representan a todo el dominio permitiendo una reducción en tiempo de cálculo con una buena aproximación. A continuación se describe brevemente el desarrollo del método de optimización estructural, que en general consta de tres pasos fundamentales:

### PROCESO DE OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA.

- ⊕ El modelado geométrico proporciona un aproximado a la geometría real, con el fin de realizar simulaciones sin la necesidad de fabricar los modelos o prototipos.
  - El modelo geométrico debe ser simplificado inicialmente, eliminando del modelo aristas, superficies, sesgos, etc., que pueden llegar a ser innecesarios al crear el dominio inicial para el proceso de optimización.
  - Con base en el modelo simplificado, se obtiene un Shell o cascarón, a través de la obtención de una superficie media que representa a todo el dominio de la pieza a optimizar.

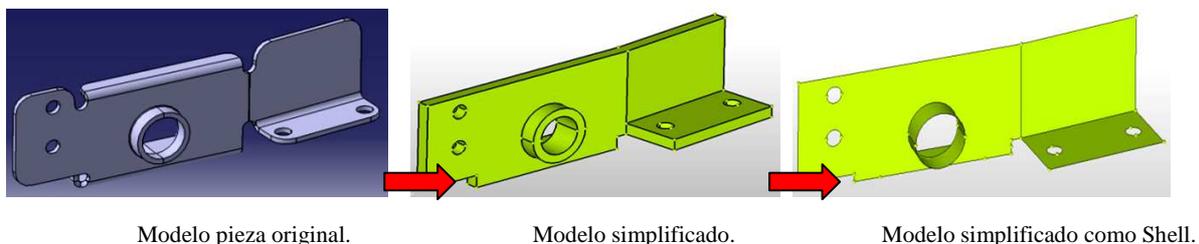


Fig. 2.3. Simplificaciones hechas al modelo CAD de la pieza a optimizar.



- 
- ✦ El análisis por elementos finitos se utiliza para obtener el nivel de esfuerzos en el dominio inicial a optimizar, bajo el sistema de cargas y restricciones dadas.
    - Se debe encontrar el estado inicial de la pieza en análisis, para proceder a establecer el escenario de carga y sus restricciones.
    - Dada la condición del modelado geométrico, el espesor inicial asignado al Shell para iniciar el análisis, es determinado por el espesor de pared mínimo del material plástico a utilizar.
    - El esfuerzo de von Mises se calcula para cada caso de carga impuesto al dominio, obteniendo la distribución de esfuerzo y detectando regiones con un alto o bajo nivel del mismo en la pieza.
  
  - ✦ La geometría se optimiza topológicamente mediante la remoción gradual de elementos con base en el nivel de esfuerzos que presenta el dominio.
    - Se realiza un análisis de densidad para identificar regiones con elementos que tengan un valor de espesor en común, relacionado directamente con el espesor de pared del material plástico empleado.
    - La optimización se da en el tiempo a través de iteraciones, donde la estructura óptima cumple con la reducción de volumen, sin sobrepasar el esfuerzo de fluencia del material plástico utilizado y un factor de seguridad asignado.

#### ***MODELADO SÓLIDO DE LA ESTRUCTURA ÓPTIMA TOPOLÓGICA.***

- ✦ El modelado sólido de la geometría óptima se da al interpretar los resultados obtenidos de la optimización del dominio simplificado como Shell.
  - Con base en el análisis de densidad de elementos, se identifican capas o regiones con un valor de espesor semejante, esto genera un número “n” de capas, cada una de ellas con un valor de espesor distinto. Lo cual al direccionarlas, proporcionan un “crecimiento”, que es interpretado como la geometría sólida de la estructura óptima.
  - Se pueden tener uno o dos direcciones de “crecimiento”, el utilizar una u otra dependerá de las condiciones presentadas en el estado inicial de análisis.

#### ***ADECUACIÓN DE LA ESTRUCTURA ÓPTIMA TOPOLÓGICA.***

- ✦ La adecuación para manufactura de la estructura óptima se da a través de:
  - Se aplica una serie de criterios geométricos o pasos a seguir, obtenidos del estudio del proceso de inyección, al modelo sólido optimizado, para lograr una estructura óptimo-manufacturable.
  - La modificación de la estructura óptima se realiza de manera manual, pero con visión a una posible programación.
  - Se realiza un nuevo análisis de FEA a la estructura óptima adecuada para manufactura, para corroborar que sigue cumpliendo con los casos de carga y restricciones del diseño.



Este procedimiento se lleva a cabo de una manera iterativa, hasta que ya no se pueden obtener mejoras en el modelo, es decir que se ha encontrado la estructura óptima a las condiciones dadas. En la figura 2.4 se muestra el diagrama de flujo general, correspondiente a la metodología de optimización topológica en este trabajo, donde se observa claramente la integración de la manufactura al proceso de optimización.

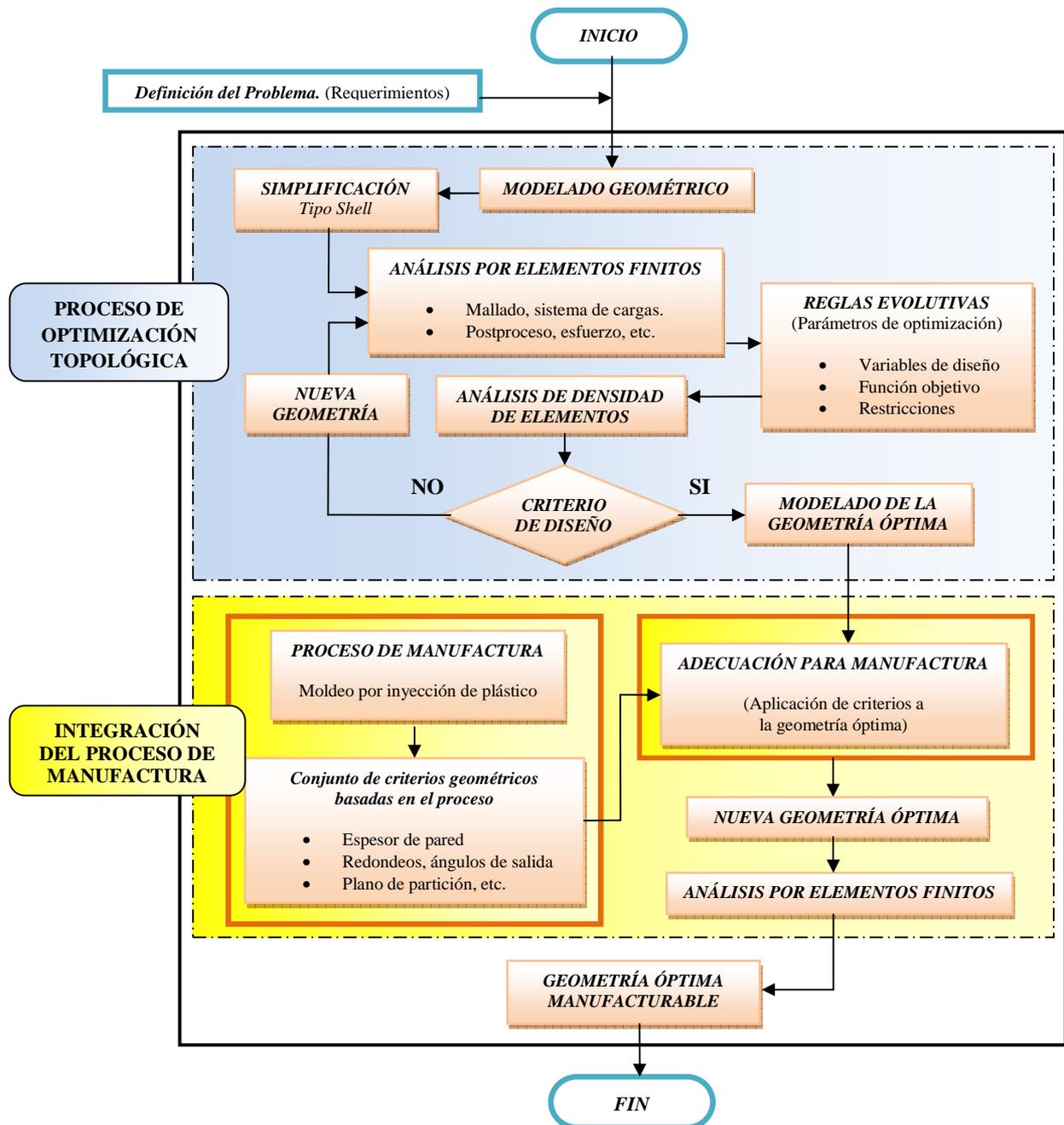


Fig. 2.4. Diagrama de flujo de la metodología de optimización estructural.



---

## 2.3 PROBLEMA DE DISEÑO O CASO DE ESTUDIO.

### 2.3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La pieza que será utilizada como caso de estudio, para mostrar la implementación de la metodología de optimización estructural propuesta, es una pieza que pertenece a un mecanismo que provee de movimiento a un asiento de una butaca.

Este problema de diseño o caso de estudio, fue seleccionado, debido a que después de realizar un análisis del producto, se observó que dentro de una butaca existen elementos que son susceptibles de sufrir un cambio de material, es decir el cambio de elementos metálicos por plásticos. Con base en esto, se determinó que una de dichas piezas a sufrir cambios es aquella que denominada como soporte de mecanismo.



Fig. 2.5. Caso de estudio

Bajo este contexto, se presenta la definición del problema, así como los requerimientos y especificaciones dadas para resolver el diseño de la pieza en material plástico.

#### Definición.

*“El problema es diseñar o rediseñar un elemento perteneciente a un mecanismo que provee de movimiento al asiento de una butaca, llamado soporte de mecanismo.”*

#### Requerimientos.

1. El nuevo diseño debe funcionar de buena manera, bajo las condiciones normales de operación del soporte actual.
2. Dicho diseño deberá fabricarse a través de un proceso de manufactura, distinto al actual (troquelado y doblado de lámina).
3. Deberá ser de fácil ensamblaje, para poder realizar un rápido armado del mecanismo.
4. El nuevo diseño no debe provocar cambios en las demás piezas con las cuales interactúe.
5. El diseño debe mantener su característica de unicidad, es decir que siga siendo una sola pieza que pueda ser ensamblada para cualquiera de los anchos de las butacas actuales.
6. Deberá ser factible desde el punto de vista económico.

#### Especificaciones.

1. Debe soportar un peso de una persona de 120 Kg.
2. Debe existir una pieza derecha e izquierda simétricamente iguales.

Para poder implementar la metodología de optimización estructural, para resolver el problema, se necesita conocer el entorno en el cual se encuentra la pieza interactuando y por tanto encontrar su estado considerado como inicial.



### 2. 3. 2 ESTADO INICIAL.

El estado inicial es aquel estado que se considera como inicio para un análisis estructural, donde se define un escenario de carga, así como las restricciones involucradas para dar solución al problema de diseño. De esta manera se necesita conocer el entorno en el cual se encuentra sometido la pieza que será analizada y su relación con otras piezas que conforman el mecanismo de asiento. En la siguiente figura 2.6, se muestra el modelo geométrico del asiento completo, así como los diferentes subensambles y componentes que forman el asiento de una butaca, realizados con el sistema CATIA v5 r19 versión estudiantil.

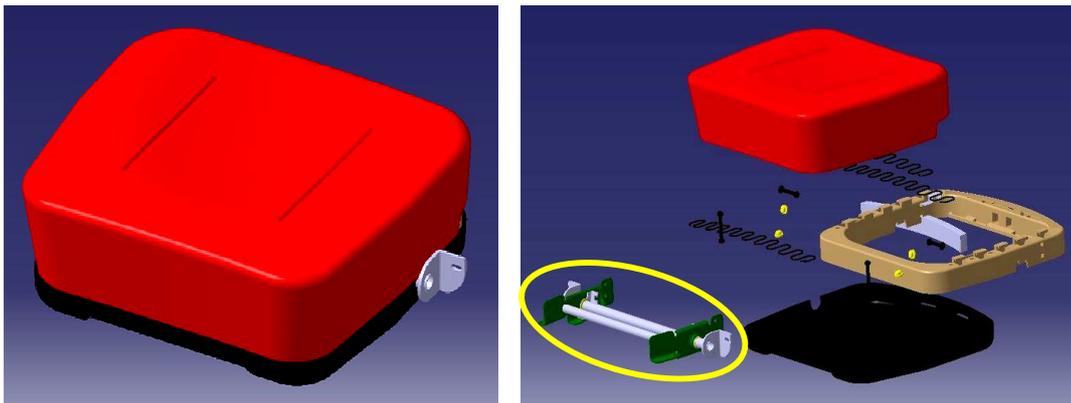
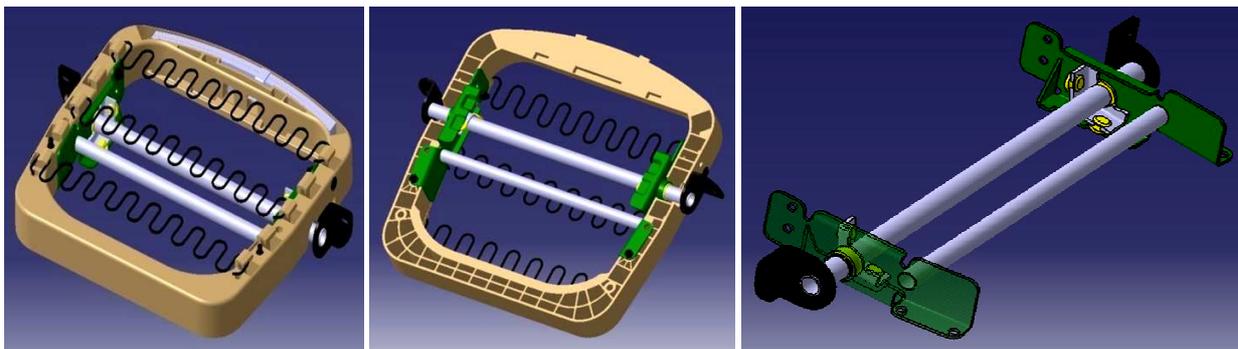


Fig. 2.6. Modelo CAD del asiento y explosivo de los elementos del modelo.

En la figura 2.7 se observa la posición y los elementos que interactúan con el mecanismo de asiento para formar el subensamble llamado mecanismo total de asiento: chasis bastidor, contrapeso, tornillería, resortes, contratope, etc. Así mismo, también se observa en particular el soporte de asiento (color verde), pieza derecha e izquierda según el mecanismo y que es el objetivo de análisis planteado en el problema de diseño antes mencionado.



a) Vista superior.

b) Vista inferior.

c) Mecanismo de asiento.

Fig. 2.7. Vistas del subensamble al que pertenece el mecanismo de asiento.

Para poder encontrar el estado inicial se realizó inicialmente una separación del mecanismo por elementos (figura 2.8) y posteriormente por funciones como se muestran en la tabla 2.1.



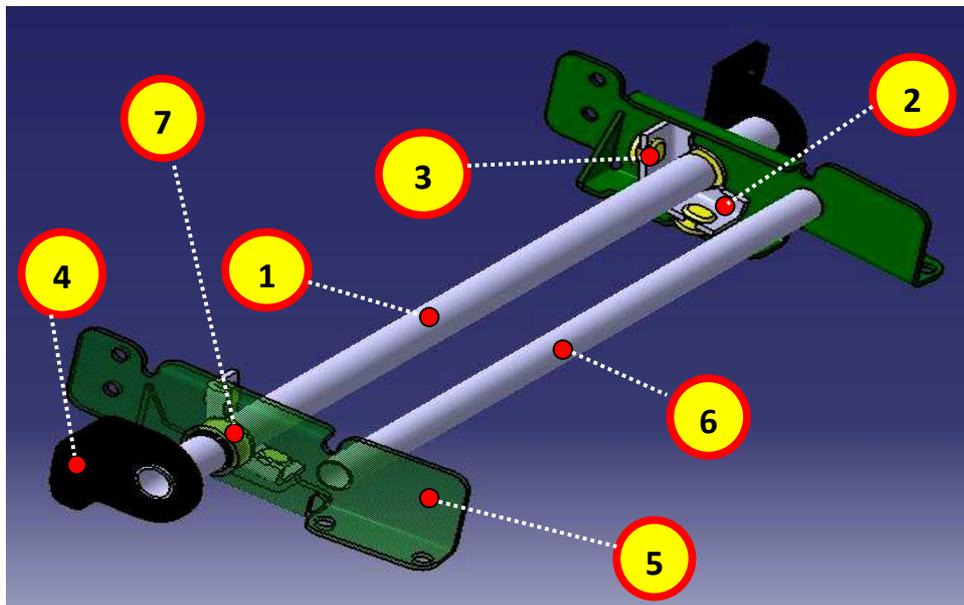


Fig. 2.8. Elementos principales del mecanismo de asiento.

Cada pieza se analizó según su comportamiento e interacción existente con otras piezas con las cuales se encuentra en contacto, con el objetivo de obtener más información del funcionamiento de la pieza en análisis (soporte lateral).

Nombre	Función	Conexión con otras piezas	Cantidad en el Mecanismo
<b>1 EJE DE GIRO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permite la rotación o giro de todo el asiento.</li> <li>Su longitud varía para distintas medidas del mecanismo (ancho de 19, 20, 22 y 24 in).</li> </ul>	4, 5	1
<b>2 CONTRATOPE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permite fijar al asiento en dos posiciones: inicial y final.</li> <li>Dar sujeción a los silenciadores.</li> </ul>	1, 3, 5	2
<b>3 SILENCIADOR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Evita el choque entre metales, reduciendo el nivel de ruido.</li> </ul>	2	4
<b>4 OREJA SOPORTE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es la unión entre el todo el asiento y los pedestales.</li> <li>Da soporte al eje de giro.</li> </ul>	1	2 (Der. e Izq.)
<b>5 SOPORTE LATERAL (REF LAT)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Da soporte y sujeción al chasis del asiento.</li> <li>Permite el movimiento de giro del chasis del asiento.</li> <li>Es el elemento que une el chasis del asiento con el eje de giro.</li> </ul>	1, 2, 3	2 (Der. e Izq.)
<b>6 TRAVESAÑO TENSOR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permite que el giro sea al mismo tiempo, dando rigidez al mecanismo.</li> </ul>	5	1
<b>7 BUJE DE PLASTICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permite el giro del ref. lateral.</li> </ul>	1, 5	2

Tabla 2.1. Funciones por elemento del mecanismo de asiento.



El modelo sólido del soporte lateral se muestra en la figura 2.9, dicho modelo se realizó con el sistema CAD, CATIA v5 r19 (versión estudiantil).

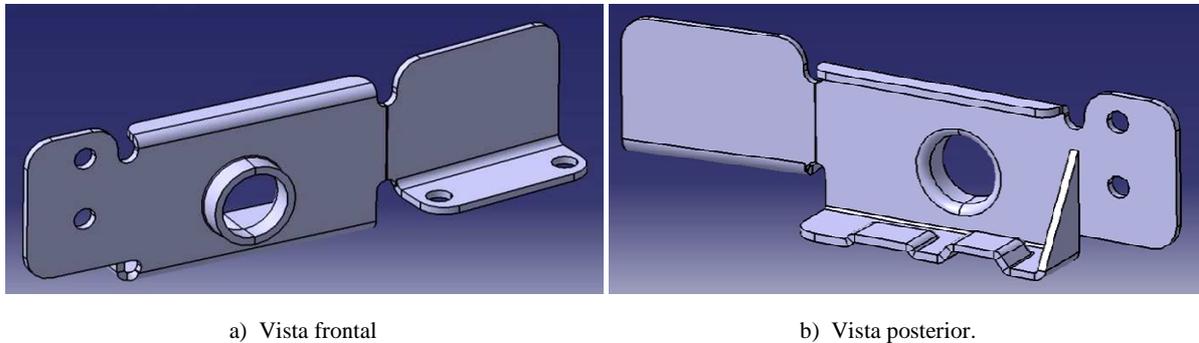
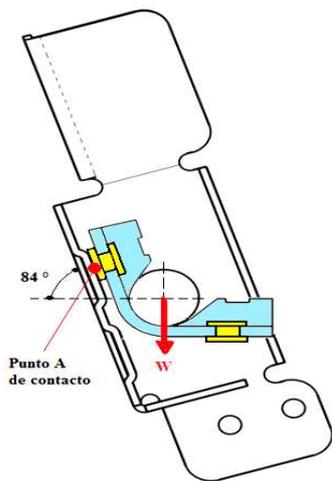
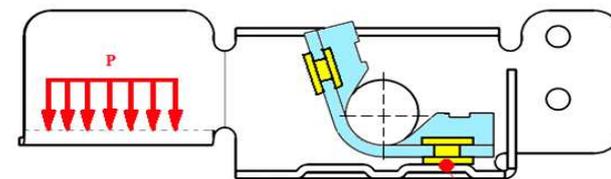


Fig. 2.9. Vistas del modelo CAD del soporte lateral, fabricado con lámina de acero.



La única fuerza actuante en esta posición es el peso del asiento.

Posición (1)



Punto B de contacto

b) Posición (2)

Posteriormente se encontraron dos posiciones críticas: posición (1) en donde únicamente actúa el peso del asiento, y posición (2) donde ya se observan las fuerzas actuantes debidas al peso de una persona, lo que provoca un estado crítico, tal y como se indica en un corte transversal del mecanismo en la figura 2.10. Con base en lo anterior se determina que el estado inicial, es decir el estado con el cual se comenzará el análisis de la pieza, dado que se considera como crítico, será en la posición (2).

En esta posición, las fuerzas actuantes son debidas al peso de una persona de 120 kg.

Fig. 2.10. Definición del estado inicial.

Para la posición (2), se procede entonces a realizar el cálculo de las fuerzas actuantes, donde se sabe que una de las especificaciones es que el nuevo diseño debe calcularse para una persona de 120 Kg. Así la fuerza debida al peso de la persona se calcula como:

$$m = 120 [Kg]; \quad g = 9.81 [m/s^2];$$

$$W_{Persona} = m * g \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$W_{Persona} = (120)[Kg] * (9.81)[m/s^2] \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$W_{Persona} = 1177.20 [N] \quad \dots\dots\dots (2.3)$$



Se utiliza un factor de carga de un 30 %, debido a que considera un caso en el cual la persona se sienta con un fuerte impulso, es decir deja caer todo su peso en el asiento de una manera brusca. Con base en ello, la fuerza total se calcula como:

$$P = W_{Persona} + (W_{Persona} * 0.3) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$P = (1177.20)[N] + (1177.20 * 0.3)[N] \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$P = 1530.36 [N] \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

Dado que se utilizan dos piezas, es decir pieza derecha e izquierda, dicho valor de fuerza (P) calculado se divide a la mitad, para obtener el valor de la fuerza actuante en el soporte lateral derecho ( $P_{RLD}$ ) o pieza en análisis será:

$$P_{RLD} = P/2 \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$P_{RLD} = 1530.36/2 [N] \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

$$P_{RLD} = 765.18 [N] \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

Este tipo de fuerza es mejor conocida como carga del tipo distribuida. Así, al conocer el valor de carga distribuida ejercida sobre el soporte lateral, en este caso derecho, se procede entonces a realizar un análisis por elementos finitos para conocer la distribución de esfuerzo en toda la pieza, paso necesario para dar inicio al proceso de optimización estructural.

### 2.3.2.1 FEA DEL ESTADO INICIAL.

El análisis por elementos finitos (i. e. FEA) es uno de los métodos numéricos para la obtención de soluciones aproximadas de ecuaciones diferencial ordinarias y parciales, más común utilizado en la actualidad. Este es especialmente poderoso cuando se trata con condiciones de frontera definidas por geometrías complejas comunes en aplicaciones prácticas. Otros métodos numéricos como son: diferencias finitas y elementos frontera, deben ser competitivos o igualmente superiores al método del elemento finito, solo para ciertas clases de problemas. Es por ésta versatilidad de manejar dominios arbitrarios y disponibilidad de sofisticados software, que en las últimas décadas, el método de los elementos finitos ha sido el método preferido para la solución de muchos problemas prácticos [3]. En general, la aplicación del método de los elementos finitos a un problema dado, involucra los siguientes pasos:



Fig. 2.11. Metodología de elementos finitos [3].

Tomando en cuenta lo anterior, se procede a realizar el análisis por elementos finitos para posteriormente iniciar la optimización estructural, lo cual permitirá saber cómo es la distribución de esfuerzos en el soporte lateral, bajo el sistema de cargas y restricciones derivadas del estado inicial. Para realizar todo lo que conlleva un análisis por elementos finitos, se utilizó el software HIPERWORKS 11, versión estudiantil, y en particular su módulo RADIOSS, específico para llevar a cabo este tipo de cálculos.



**SISTEMA DE CARGAS Y RESTRICCIONES.**

A continuación en la figura 2.12, se muestra por un lado, la zona en la que se aplica la carga distribuida sobre el soporte lateral (en color azul), así como también las dos condiciones de frontera (color rojo) dadas por el estado inicial, una de ellas en la zona de color rojo donde se indica que esa superficie del soporte lateral debe mantenerse fija, es decir que los desplazamientos y las rotaciones en las direcciones XYZ, son nulos.

$$dx, dy, dz = 0; \quad rx, ry, rz = 0 \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

Cabe mencionar que en la parte central donde se da la segunda restricción o condición impuesta (en la figura 2.12 b), el círculo rojo), es de rotación, es decir un Join ya que esto permitirá simular la rotación existente entre el soporte lateral y la parte fija del mecanismo, el eje de giro, restringiendo así todos los demás desplazamientos y rotaciones:

$$dx, dy, dz, rx, ry = 0; \quad rz \neq 0 \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

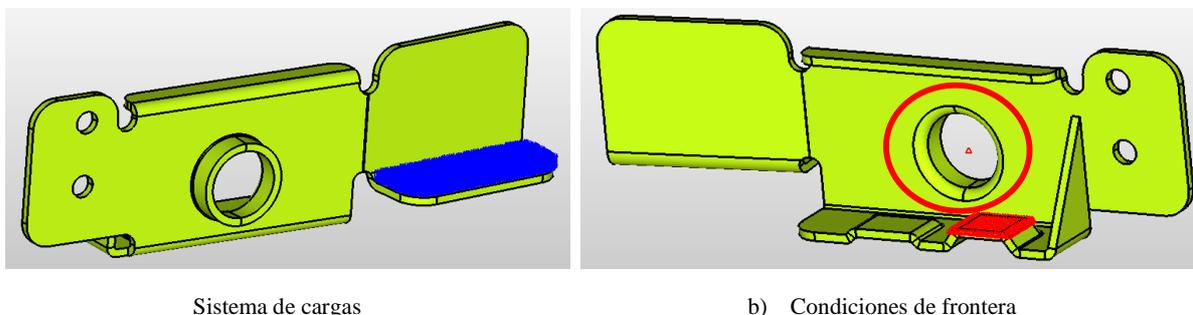


Fig. 2.12. Escenario de carga del soporte lateral.

Posterior a esto, se realiza la discretización del modelo, para ello se utilizó como elemento de discretización los de tipo CHEXA o hexaedros (figura 2.13), ya que este tipo de elementos está formado por de 8 nodos y por tanto 3 grados de libertad por nodo, con lo cual guarda más información del modelo.

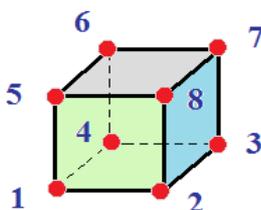


Fig. 2.13. Elemento hexaédrico.

A pesar del inconveniente del tiempo de cálculo con respecto a los CTETRAS o tetraedros, y la generación de más elementos durante la discretización, no es de gran impacto durante el análisis, ya que los elementos hexaédricos generan una malla mucho más estructurada que los elementos tetraédricos. En la figura 2.14 se muestran distintos tamaños de elemento de malla con los cuales se llega a la conclusión que el mejor para realizar la simulación de FEM es con un tamaño de elemento de 1, ya que este tiene una buena aproximación en zonas que se necesitan.



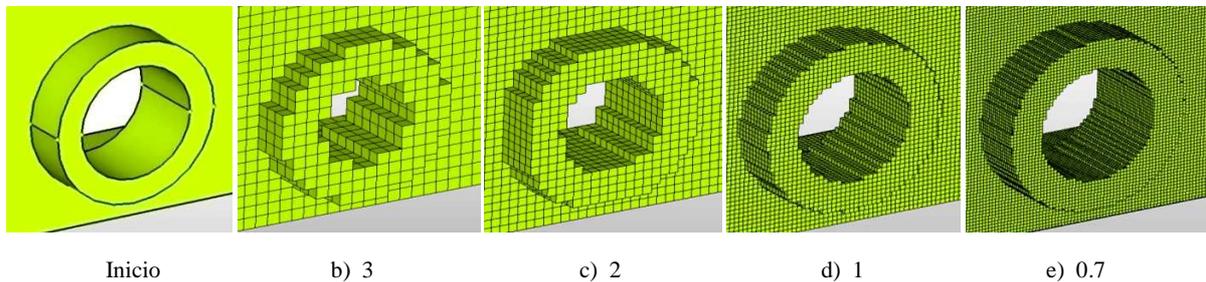


Fig. 2.14. Malla generada según el tamaño de elemento.

En la figura 2.15 se muestra el tipo de elemento utilizado y el modelo final discretizado, obteniendo: nodos: 94086, elementos: 72509 y GDL: 284861. Las propiedades del material del cual se hace actualmente el soporte lateral son las siguientes para un ACERO ASTM A36 (comercial): densidad = 7850 [Kg/m<sup>3</sup>], módulo de elasticidad = 210 [GPa], esfuerzo de fluencia = 250 [MPa].

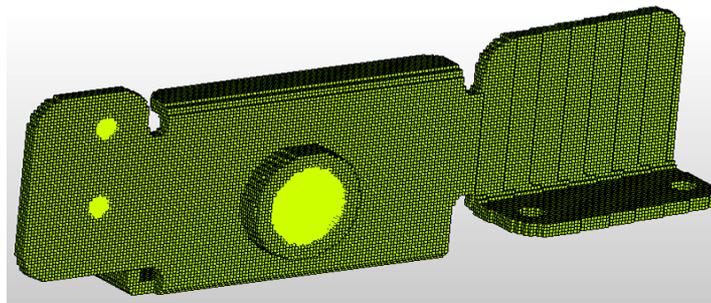


Fig. 2.15. Malla hexaédrica del soporte lateral.

En la figura 2.16 se observan los resultados obtenidos del FEA, donde se muestra claramente las zonas de bajo y alto nivel de esfuerzos presentados en la distribución en el soporte lateral. En ellos se muestra que el esfuerzo máximo es de 17.281 [MPa], cuando el esfuerzo de cedencia del acero es de 250 [MPa], lo que quiere decir que el soporte lateral tiene un factor de seguridad muy alto y por consiguiente que la pieza está sobre-diseñada. Razón que permite introducir técnicas de optimización en el diseño de esta pieza y pensar en la sustitución de materiales.

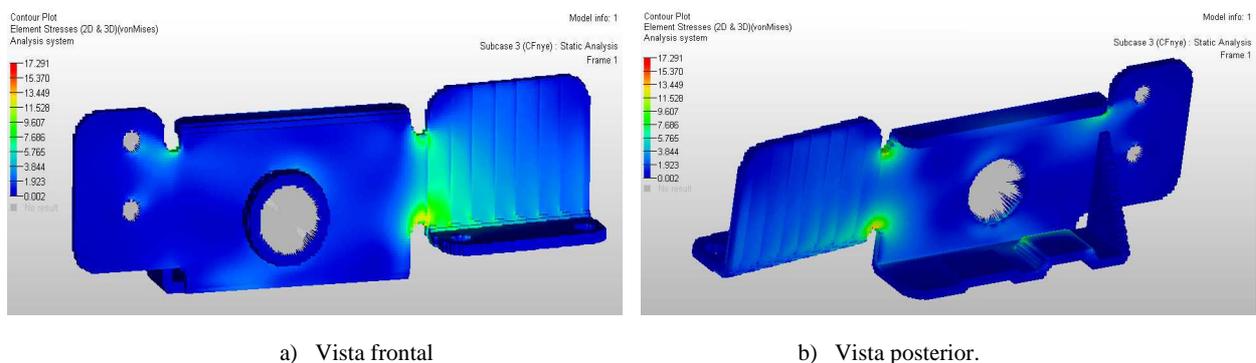


Fig. 2.16. Resultados del FEA para el soporte lateral.



## 2.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA.

Para mostrar la implementación de la metodología, y particularmente durante la optimización topológica y adecuación para manufactura de dicha estructura, se utilizó el material conocido como ABS. Debido a que es el material plástico de los conocidos como “estructurales”, más común utilizado en el proceso de inyección de plástico dentro de los tres que son propuestos en este trabajo.

### 2.4.1 MODELADO GEOMÉTRICO.

El modelado geométrico es una herramienta sumamente usada en muchos campos: ciencia e ingeniería, cinematografía, robótica, etc., con el fin de realizar simulaciones y visualizaciones de fenómenos de cualquier tipo para con ello ahorrar tiempo, además de reducir costos en pruebas de laboratorio, todo generado desde una computadora. De esta manera el modelado geométrico se define como:

“... una representación matemática de una geometría real, en un dominio bi o tridimensional, a través de curvas y superficies conocidas, tales como: líneas, parábolas, hipérbolas, splines, etc., mediante un algoritmo computacional.”

### MODELADO GEOMETRICO MEDIANTE UN CASCARÓN O SHELL.

Los elementos estructurales parecidos a curvas planas, que de igual manera que en el caso de las placas (plates), para un material isotrópico, homogéneo, elástico que tenga un espesor constante y que además es pequeño en relación a sus otras dimensiones, son conocidos como Shells o cascarones.

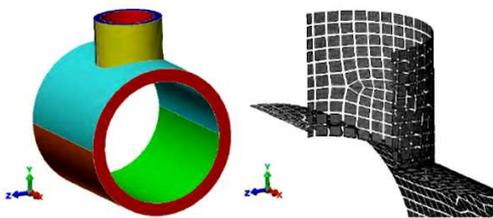


Fig. 2.17. Ejemplo de un Shell o cascarón.

Estas estructuras, pueden representar curvaturas a lo largo de toda su extensión, en cualquier dirección y con valores variables. Es preciso resaltar que la omisión de su espesor se aplica sólo en su representación gráfica y modelado geométrico; sin embargo, su magnitud debe ser incluida para realizar el cálculo de esfuerzos y deformaciones. Estas estructuras para hacer más práctico su estudio, pueden ser discretizadas en elementos planos que al ser ensamblados otorguen una forma aproximada a dichas superficies. Por lo tanto, entre mayor sea el número de elementos planos en los que discretiza la estructura, mejor será la aproximación a la forma original.

Su principal característica es que una de sus dimensiones es muy pequeña en comparación con las otras dos. Por lo tanto es posible calcular esfuerzos y deformaciones en una estructura tipo Shell como un ensamble de una cantidad finita de elementos planos. Puesto que cada elemento plano que conforma dicha estructura tiene una orientación diferente (tal como sucede con un vector normal a la superficie curva original en diferentes puntos de la misma), tanto los esfuerzos como los debidos a flexión están presentes en cada elemento.

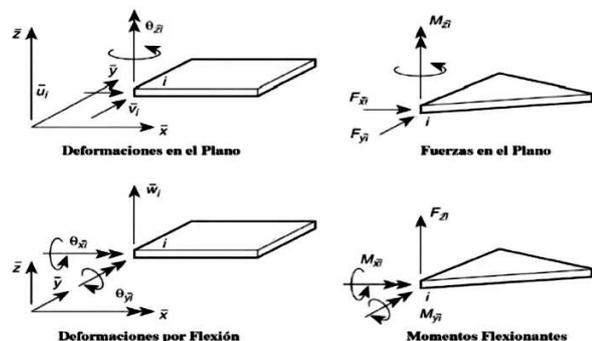


Fig. 2.18. Aplicación de fuerzas y momentos en un Shell o cascarón. [21]



---

Por ejemplo, si existe una carga en dirección paralela a uno de los elementos, esto no será transmitida de la misma forma a los que la rodean, pues dicha carga tendrá dos componentes paralelas y una perpendicular para cada una de ellos.

Es importante resaltar que, considerando deformaciones muy pequeñas en términos locales para un elemento, las deformaciones en el plano y las deformaciones por flexión son independientes, es decir que los efectos del esfuerzo plano no afectan las deformaciones por flexión y los efectos de flexión no influyen en las deformaciones por esfuerzo plano. La interacción entre estos dos fenómenos solo se lleva a cabo cuando dichos elementos se encuentran ensamblados con diferentes orientaciones formando así estructuras del tipo Shell.

## SUPOSICIONES BÁSICAS

La superficie que bisecta el espesor del cascaron es conocida como superficie media. Para especificar la geometría de un cascarón, se necesita solamente conocer la configuración de la superficie media y el espesor del Shell en cada punto [21]. Las siguientes suposiciones son generalmente hechas en un análisis de deformaciones pequeñas de un Shell delgado:

1. La proporción del espesor del Shell al radio de curvatura de la superficie media es pequeño en comparación con la unidad.
2. El desplazamiento es muy pequeño comparado con el espesor del Shell.
3. Las secciones rectas de un elemento, las cuales son perpendiculares a la superficie media, siguen siendo perpendiculares y retas a la superficie media deformada subsecuente a la flexión. La implicación de suponer esto es que las deformaciones  $\gamma_{xz}$  y  $\gamma_{yz}$  son insignificantes. La deformación normal,  $\epsilon_z$ , debido a la carga transversal debe ser omitida.
4. El esfuerzo en la dirección Z,  $\sigma_z$ , es insignificante.

Bajo este contexto en la metodología propuesta, se utilizan las superficies del tipo cascarón o Shell, como una simplificación del modelo sólido para calcular el FEA e iniciar el proceso de optimización topológica, debido a:

- 1) **Representación de todo el dominio de análisis.** Dada la característica de una pieza plástica de ser de pared delgada, existe entonces la posibilidad de representar dicha pieza mediante una superficie media o Shell, que representa a todo el dominio de análisis.
- 2) **Manejo de espesor.** El valor determinante en una simplificación de un modelo del tipo Shell, es el espesor, al igual que sucede en el diseño de una pieza plástica, ya que en ambos casos se debe tener un espesor constante para que sea susceptible de ser modificado según se requiera.
- 3) **Nivel de esfuerzo.** Las fuerzas aplicadas a este tipo de simplificaciones, en particular su dirección debe ser paralela a la de los ejes coordenados, para evitar problemas en las otras direcciones ya que sigue siendo una simplificación bidimensional y con esto tener una certeza en los resultados de esfuerzo obtenidos de la simulación FEM.
- 4) **Tiempo de cálculo.** Es un factor importante en comparación con un análisis realizado como un sólido (ver anexo 4), logrando con ello una búsqueda más amplia dentro del rango de posibles soluciones óptimas, en un menor tiempo, en general pasando de horas de procesamiento a minutos.



### 2. 4. 1. 1 SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO.

En el modelo sólido del soporte lateral, como se puede observar en la figura 2.19, existen zonas que son susceptibles de ser simplificadas (encerradas en color amarillo), es decir zonas que no son de gran utilidad en el soporte lateral de manera estructural, pero sí para el proceso de manufactura actual por medio del cual se fabrica.

Dado que esta pieza se piensa realizar por medio del proceso de inyección de plástico, reemplazando el proceso actual, dichas zonas detectadas pueden ser removidas del modelo, llegando entonces a un dominio simplificado tal y como se muestra en la figura 2.20.

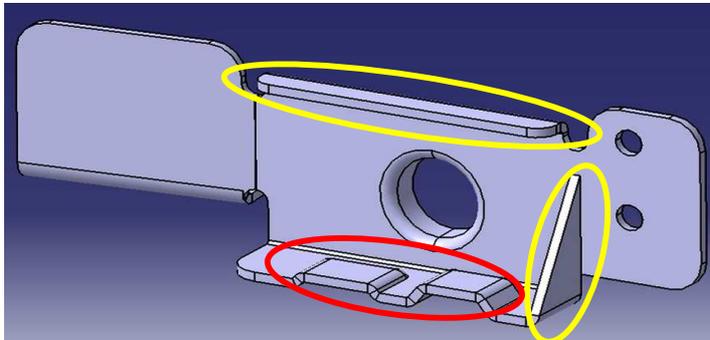


Fig. 2.19. Zonas susceptibles de simplificación.

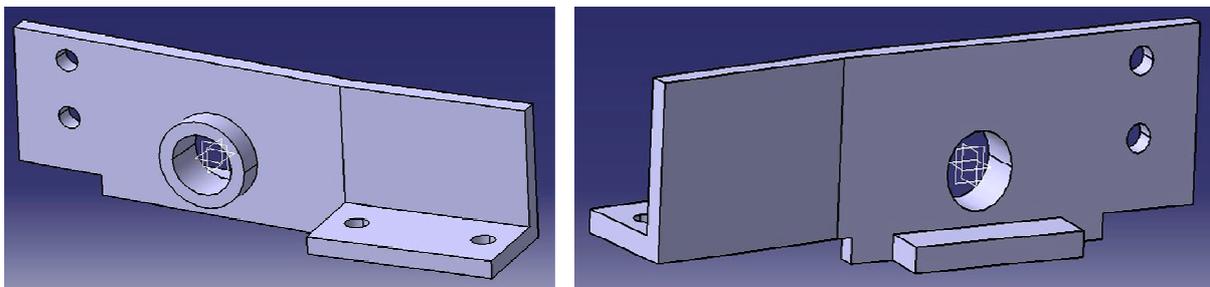


Fig. 2.20. Vista posterior y frontal del modelo ó dominio simplificado.

En la figura anterior se puede observar que en la parte posterior, en lugar de tener dos superficies dónde existe contacto con otro elemento del mecanismo (encerrado en color rojo figura 2.19), se decidió extender dicha zona, ya que las posiciones inicial y final o crítica se mantienen aún bajo esta extensión de material, además se logra una simplificación sin tantos cambios bruscos en la geometría que será el dominio topológico inicial.

Al tener el dominio simplificado, entonces se obtiene una superficie media que representa a todo el dominio, permitiendo manipular el espesor de dicha superficie ó Shell durante el análisis por elementos finitos, pero primordialmente para tener un espesor inicial de la pieza y comenzar el proceso de optimización topológica. Esto sucede debido a que la pieza en análisis, el soporte lateral, así lo permite.

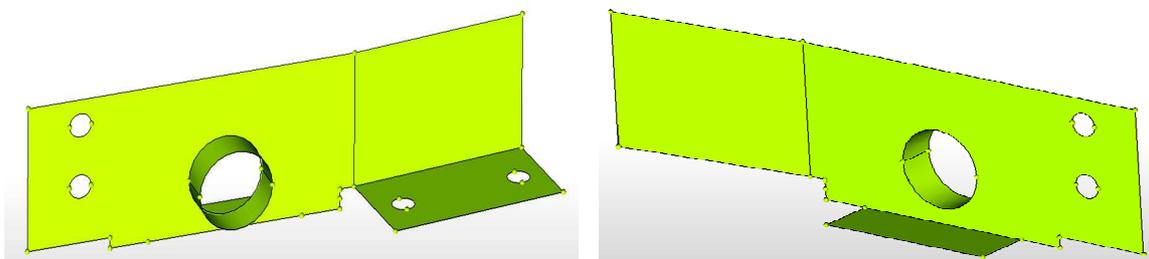


Fig. 2.21. Vista frontal y posterior del dominio simplificado como Shell (superficie media).



---

## 2. 4. 2 ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEA).

### 2. 4. 2. 1 DISCRETIZACIÓN DEL MODELO.

El tipo de elemento utilizado para llevar a cabo la discretización del modelo simplificado fue del tipo CQUAD o cuadrados, ya que este tipo de elementos está formado por de 4 nodos y por tanto 6 grados de libertad por nodo, con lo cual se guarda más información del modelo, permitiendo seguir con las ideas propias de la teoría de optimización. Se utilizó para la discretización del modelo Shell el software HIPERWORKS 11 versión estudiantil y en particular su módulo RADIOSS, específico para realizar análisis estructurales.

A pesar del inconveniente del tiempo de cálculo y generación de un mayor número de elementos durante la discretización con respecto a los elementos CTRIAS o triángulos, no es de gran impacto durante el análisis, ya que permite generar mallas más uniformes en comparación de los triángulos, reduciendo de esta manera posibles errores de convergencia en la solución.

El análisis estructural es uno de los principios básicos de la metodología presentada. En la siguiente figura 2.22 se muestran distintos tamaños de elemento de malla con los cuales se llega a la conclusión que el mejor para realizar la simulación de FEM es con un tamaño de elemento de 1, debido a que la convergencia entre los resultados de la simulación utilizando distintos tamaños de elemento, en cuanto al nivel de esfuerzo máximo, la variación entre tamaño de elemento 1 y 0.7, la diferencia en valor es de aproximadamente de 4.42%. De esta manera se tiene una buena solución con el tamaño de elemento de 1, el cual se utilizará tanto para realizar la simulación estructural, así como para realizar el proceso de optimización.

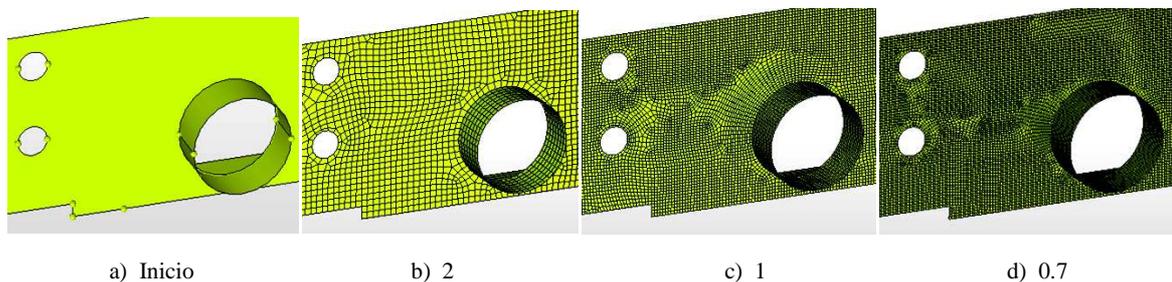


Fig. 2.22. Discretización o mallado generado según el tamaño de elemento.

En la figura 2.23 se observa el modelo de la superficie media discretizado, obteniendo con ello 27313 nodos, 26739 elementos con 163865 gdl, así como una malla estructurada.

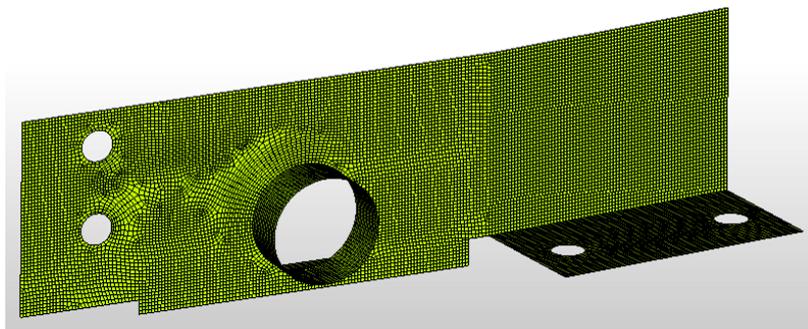


Fig. 2.23. Malla hexaédrica con elementos de tamaño 1.



#### 2. 4. 2. 2 ESCENARIO DE CARGA.

El escenario de carga aplicado al modelo simplificado es obtenido del estado inicial (apartado 2.3.2, de este capítulo). En las siguientes imágenes, se muestran: el sistema de cargas y las restricciones antes mencionadas, en color azul aparecen las fuerzas y en color rojo las restricciones o condiciones de frontera. Con esto se observa que no existe un cambio fuerte en cuanto a la forma de realizar la simulación tanto en un sólido así como en la simplificación hecha.

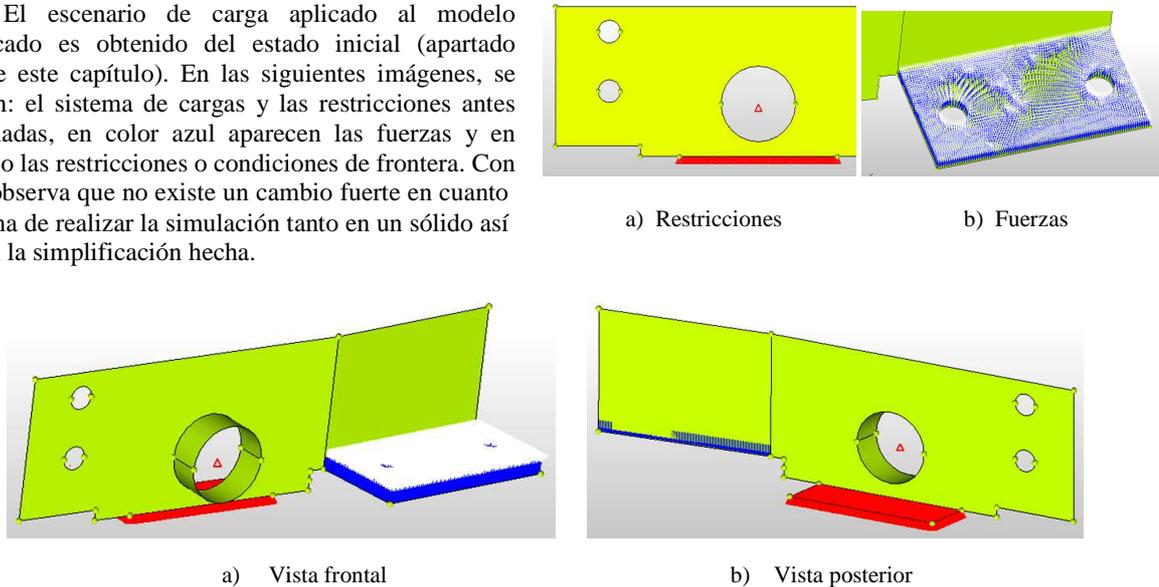


Fig. 2.25. Escenario de carga del modelo.

Para completar los requerimientos necesarios para realizar la simulación de FEM, se tiene que asignar un material al modelo simplificado. Dada la naturaleza de la simplificación hecha como una superficie media (Shell), que representa a todo el dominio de análisis, surge un factor sumamente importante a considerar: el espesor del Shell.

Dicho espesor puede compararse con el también llamado en el diseño de plásticos “espesor de pared mínimo”, recordando que esta pieza se pretende realizar de plástico, el cual varía con respecto a cada material a utilizar o del que se pretende sea fabricada la pieza final. Es por ello que se procede a realizar un breve análisis de espesor de pared, de una selección de tres de los materiales plásticos estructurales más comunes utilizados en el proceso de inyección como son: Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato y una poliamida 6,6, que serán usados a lo largo de este trabajo. Con esto se logra:

- ⊕ Realizar la simulación de FEA, para un material plástico específico.
- ⊕ Se obtiene un espesor llamado “espesor inicial”, el cual es el espesor del dominio de análisis, que será modificado durante el proceso de optimización estructural topológica.
- ⊕ Dicho espesor inicial, está relacionado fuertemente con el “espesor de pared mínimo” de cada material plástico que se utilice. Esto se identifica como el paso inicial del proceso denominado “adecuación para manufactura”, que sufrirá la pieza óptima y que es presentado más adelante en este capítulo.
- ⊕ Todo lo anterior se traduce como interacción entre optimización y manufactura, parte central de la metodología expuesta en este trabajo.



### 2. 4. 2. 3 ANÁLISIS DEL ESPESOR INICIAL.

Con este breve análisis se obtiene un “espesor inicial”, es decir un valor de espesor para asignarlo al modelo simplificado para realizar la simulación de FEM, y posteriormente dar inicio al proceso de optimización topológica. En la siguiente tabla se muestran algunas de las propiedades de tres materiales plásticos estructurales seleccionados, para ser utilizados durante el proceso de optimización:

MATERIAL	Densidad [Kg / m <sup>3</sup> ]	Módulo elasticidad (E) [MPa]	Coefficiente poisson (ν) [MPa]	Coef. exp. térmica (α) [W/m <sup>2</sup> c]	Esfuerzo cedencia [MPa]	Nombre comercial *	Espesor de pared mínimo [mm]
<b>ABS</b> <i>Acrilonitrilo butadieno estireno</i>	1150	2496	0.31	0.00007848	46.7	TERLURAN HI-4	1.9
<b>PC</b> <i>Policarbonato</i>	1314	2379	0.37	0.00007002	72.2	ULTRADUR B2550	1.8
<b>Nylon 6/6</b> <i>Poliamida 6/6</i>	1144	2758	0.35	0.000144	61.8	ULTRAMID A3UG5	1.5

\* Fuente: BASF Mexicana.

Tabla 2.2. Propiedades de materiales termoplásticos.

Con base en la tabla anterior, lo que se busca es involucrar el valor del espesor de pared mínimo del material plástico a utilizar en el proceso de optimización topológica. La manera de realizar esto es por medio de la simplificación realizada como Shell, donde el valor del espesor juega un valor muy importante durante el proceso de cálculo de la distribución de esfuerzo. Para dar comienzo con la búsqueda del espesor inicial, lo que se realizó fue comenzar con un material (en nuestro caso se inicio con el ABS), asignando el valor de espesor inicial al modelo Shell que se tiene. Dicho espesor inicial se obtiene multiplicando “n” veces el valor del espesor de pared mínimo, obteniendo entonces “n” casos de espesor inicial:

$$\text{Espesor inicial} = n * \text{Espesor de pared mínimo} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

Con esto se procede a calcular el esfuerzo máximo, así como otros datos de la simplificación durante el FEM, para cada caso de espesor inicial, tal y como se muestra en la tabla 2.3.

MATERIAL	Esfuerzo ced.	Múltiplo	Espesor inicial	Esfuerzo máx.	Volumen inicial
<b>ABS</b> <i>Acrilonitrilo butadieno estireno</i>	$\sigma_{ced}$ [MPa]	(n)	n * 1.9 [mm]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	1x10 <sup>+04</sup> [mm <sup>3</sup> ]
	46.7	3	5.7	97.274	9.103
		4	7.6	56.342	13.486
		5	9.5	37.000	16.858
		6	11.4	23.324	20.229
		7	13.3	20.000	23.601
		8	15.2	15.506	26.972
		10	19.0	10.921	33.716

Tabla 2.3. Espesor inicial para distintos casos, material ABS.



Para encontrar el valor de espesor inicial, se grafican los valores de esfuerzo vs volumen inicial, de la tabla 2.2, donde el volumen inicial está en función del espesor inicial que a su vez es función del múltiplo (n) utilizado según la Ec. (2.12), como se muestra en la figura 2.26.

Para delimitar y obtener una región de análisis de espesor inicial, en la cual se espera encontrar un valor del múltiplo (n) con el que se pretende obtener el espesor inicial de la pieza, para comenzar el análisis de FEM y posteriormente el proceso de optimización, en la gráfica se tienen dos límites: el límite superior es el esfuerzo de cedencia ( $\sigma_{cedencia}$ ) del material plástico utilizado (ABS). Con esto se limita a un cierto rango de valores del múltiplo (n) y por ende del espesor inicial, que cumplen con la particularidad de que el valor máximo de esfuerzo para cada caso de espesor inicial, se encuentre por debajo del valor de cedencia, con lo que se asegura que la pieza cumpla con el criterio de diseño dado. El límite inferior es el valor máximo de esfuerzo presentado por la pieza original hecha de acero ( $\sigma_{inicial}$ ). Con ello lo que se busca es que el valor de espesor inicial, cumpla un valor igual o muy cercano (por arriba) del valor de esfuerzo máximo que presenta la pieza original, con el fin de tener al final del proceso de optimización topológica, una pieza con un comportamiento por lo menos igual al actual.

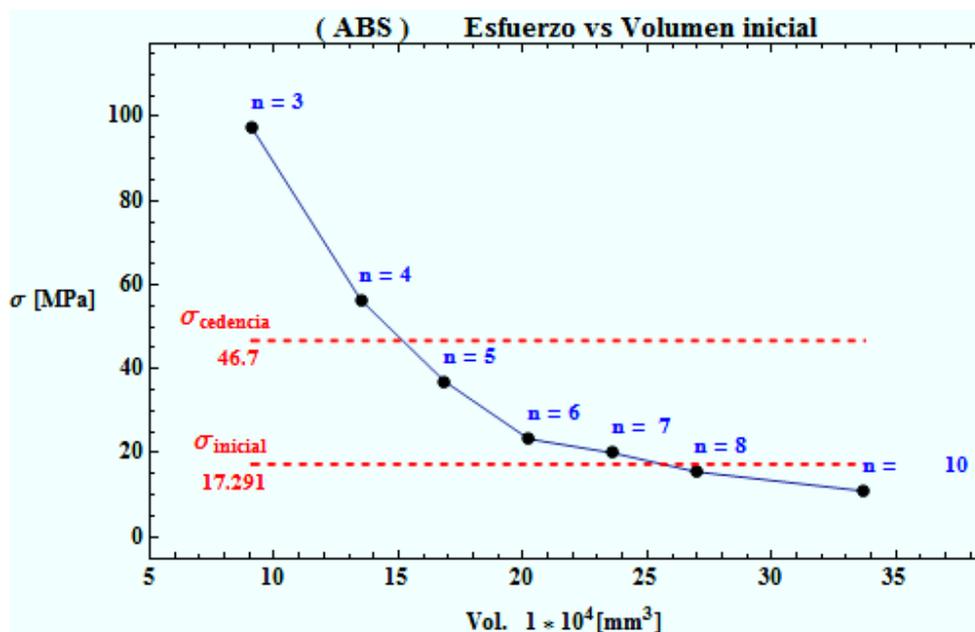


Fig. 2.26. Grafica de valores de espesor inicial vs esfuerzo, para el ABS.

También en el grafico anterior, se observa claramente una tendencia: a mayor valor de volumen del espesor inicial, el valor de esfuerzo máximo disminuye, lo cual se interpreta como una mayor rigidez de la pieza con el aumento del espesor inicial. Bajo esta idea, se tienen entonces tres valores de múltiplos que son candidatos a ser utilizados para obtener el espesor inicial más adecuado para el material utilizado, la forma de elegir uno de ellos, se basa tan sólo en elegir al más cercano al límite inferior (siempre por arriba de él). Con esto se logra obtener:

- ⊕ Un valor del múltiplo (n) del espesor de pared y con ello un espesor inicial para el material dado.
- ⊕ El espesor inicial genera un volumen inicial, el cual permitirá que durante la optimización topológica, el algoritmo del software utilizado tenga más posibilidad de remover material de la pieza y con esto no presentar problemas de convergencia abrupta en la solución.
- ⊕ Un valor de esfuerzo máximo que después del proceso de optimización, aumentará sin sobrepasar el límite de cedencia del material utilizado



De esta manera para el caso del material ABS, el valor del múltiplo (n) será de 7, con lo que el espesor inicial que cumple con las características mencionadas es el valor de siete veces el espesor de pared mínimo, es decir:

$$\text{Espesor inicial}_{ABS} = 7 * (1.9)[mm] = 13.3 [mm] \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

De igual manera se vuelve a realizar el procedimiento de búsqueda de espesor inicial, para los otros dos materiales plásticos propuestos. Para el Policarbonato (PC) se tiene un espesor de pared mínimo de 1.8 [mm], y con ello se tiene la siguiente tabla 2.4, y gráfica en la figura 2.27.

MATERIAL	Esfuerzo ced.	Múltiplo	Espesor inicial	Esfuerzo máx.	Volumen inicio
	$\sigma_{ced}$ [MPa]	(n)	$n * 1.8$ [mm]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$1 \times 10^{+04}$ [mm <sup>3</sup> ]
PC  Policarbonato	72.2	3	5.4	105.970	9.583
		4	7.2	61.731	12.776
		5	9	40.676	15.971
		6	10.8	28.997	19.165
		7	12.6	21.830	22.359
		8	14.4	17.108	25.553
		10	18	11.719	31.941

Tabla 2.4. Espesor inicial para distintos casos, material POLICARBONATO.

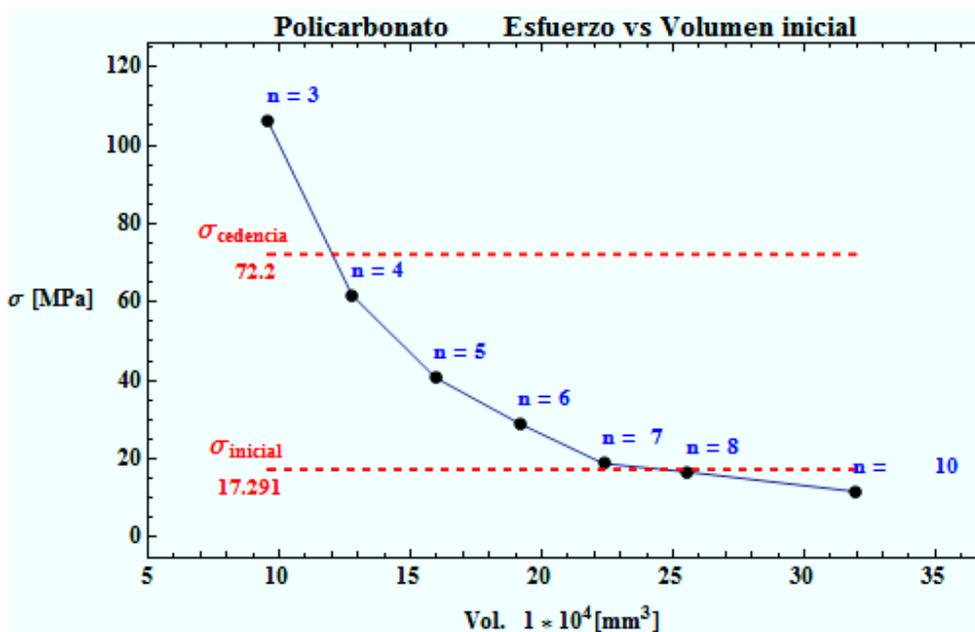


Fig. 2.27. Gráfica de valores de espesor inicial vs esfuerzo, para el POLICARBONATO.

En este caso para el material Policarbonato, el valor de espesor inicial que cumple con las características mencionadas es el valor de siete veces el espesor de pared mínimo, es decir:



$$\text{Espesor inicial}_{PC} = 7 * (1.8)[mm] = 12.6 [mm] \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

De igual manera se vuelve a realizar el procedimiento de búsqueda de espesor inicial, ahora para Poliamida 6,6 (PA 6,6), que tiene un espesor de pared mínimo de 1.5 [mm], con ello se tiene la siguiente tabla 2.5 y gráfica en la figura 2.28.

MATERIAL	Esfuerzo ced.	Múltiplo	Espesor inicial	Esfuerzo máx.	Volumen inicio
	$\sigma_{ced}$ [MPa]	(n)	n * 1.5 [mm]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$1 \times 10^{+04}$ [mm <sup>3</sup> ]
Nylon 6,6	61.8	3	4.5	150.463	7.985
		4	6	87.795	10.647
5		7.5	57.399	13.309	
6		9	40.780	15.971	
7		10.5	30.600	18.632	
8		12	23.901	21.294	
10		15	15.888	26.618	

Tabla 2.5. Espesor inicial para distintos casos, material POLIAMIDA 6,6.

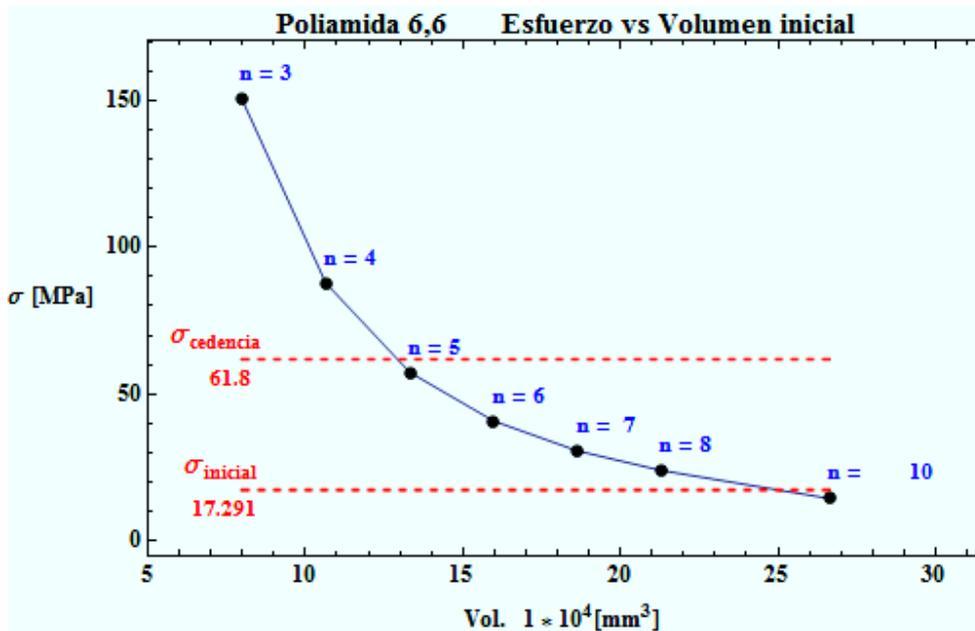


Fig. 2.28. Gráfica de valores de espesor inicial vs esfuerzo, para la POLIAMIDA 6,6.

En este caso para el material Poliamida 6,6, el valor de espesor inicial que cumple con las características mencionadas es el valor de ocho veces el espesor de pared mínimo, es decir:

$$\text{Espesor inicial}_{PA6,6} = 8 * (1.5)[mm] = 12 [mm] \quad \dots\dots\dots (2.15)$$



Tras realizar el análisis para cada material plástico propuesto, se puede decir que al utilizar materiales plásticos cuyos valores de espesor de pared mínimo sean cada vez más pequeños, el valor de espesor inicial para realizar el FEM y comenzar el proceso de optimización, será mayor. Con lo cual se puede inferir que el espesor inicial adecuado para un material plástico, debe ser de al menos 7 veces el espesor de pared mínimo requerido para dicho material:

$$\text{Espesor inicial} \geq (7 * e_{\min}) \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

Con esto se tiene que el valor de esfuerzo se encontrará en el rango comprendido entre:

$$\sigma_{\text{pieza original}} \geq \sigma_{\text{Espesor inicial}} \leq \sigma_{\text{cedencia del material}} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

#### 2.4.2.4 RESULTADO.

Los resultados presentados a continuación y siguiendo la idea de mostrar la implementación de la metodología de optimización, son los obtenidos al aplicar un espesor inicial al modelo Shell, de 7 veces el espesor mínimo de pared del material ABS, material que será el utilizado de aquí en adelante para seguir con la implementación de la metodología propuesta. Posteriormente en el siguiente capítulo (capítulo 3), se muestran los resultados para los otros dos materiales propuestos. Para dicho material, se tiene la distribución de esfuerzos que se presenta en el modelo Shell mostrado en la figura 2.29, donde se obtuvo un valor de esfuerzo máximo de 20 [MPa].

La distribución de esfuerzo en este tipo de simplificaciones se da con un porcentaje de error muy pequeño, debido a que se toma una superficie media para realizar la simulación de FEM, el valor máximo de esfuerzo en dicha superficie en comparación con la superficie externa, tiene una variación menor al 5%, ello debido a que el espesor considerado es constante y la distancia de la superficies externas a dicha superficie media es muy pequeña, con lo cual se puede decir que los resultados obtenidos son correctos.

En los resultados se puede ver claramente las zonas de alto y bajo nivel de esfuerzo. Esto quiere decir que las zonas de bajo nivel, serán las zonas en donde se comenzará la remoción de material durante el proceso de optimización. Esta distribución se convierte en el inicio del proceso de optimización topológica.

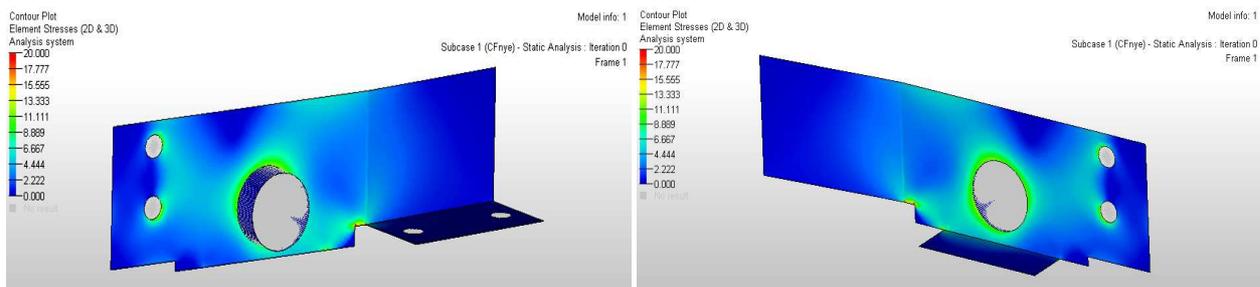


Fig. 2.29. Distribución de esfuerzos para el material ABS.



---

### 2. 4. 3 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA.

La optimización topológica es un proceso que se da de manera gradual, donde en cada iteración se debe cumplir con las restricciones impuestas al proceso. La estructura óptima se logra cuando se alcanza una convergencia en los resultados, es decir cuando ya no se pueda remover más material de la estructura y no viole las condiciones impuestas.

Al obtener la distribución de esfuerzo de la pieza en análisis, se procede entonces a iniciar con el proceso de optimización. Dicho proceso se realizó con el software HYPERWORKS v11 versión estudiantil, y en particular con su módulo específico para este tipo de soluciones topológicas llamado OPTISTRUCT, a través de un análisis de densidad de elementos. Siguiendo las condiciones del problema de diseño óptimo (mencionado en el capítulo 1), se sugiere entonces la variable de diseño, función objetivo y las restricciones necesarias para la optimización.

La VARIABLE DE DISEÑO, elegida para resolver el problema fue el volumen, debido a que se requiere obtener una pieza óptima que sea más ligera que la actual fabricada de metal, ya que se busca hacer un cambio tanto de proceso de manufactura, así como de material de la pieza.

La FUNCIÓN OBJETIVO, impuesta en este proceso de optimización topológica es la búsqueda del valor mínimo de la variable de diseño, es decir minimizar el volumen.

Las RESTRICCIONES, dadas para el proceso, están en función del material plástico a utilizar, ya que la restricción impuesta al proceso de optimización, consiste en no sobrepasar el valor del esfuerzo de cedencia del material ( $\sigma_{ced}$ ). Con esto aseguramos un buen desempeño sin que se presente la falla en la estructura óptima. Por otro lado el esfuerzo de cedencia es utilizado para indicar otra restricción, el valor del factor de seguridad (FS), el cual debe cumplir la estructura óptima. Dicho factor de seguridad se propone que debe ser  $FS \cong 1.2$ , cabe mencionar que dicho valor puede ser modificado según los requerimientos del diseñador, pero el tener valores cercanos a 1 implica que la estructura está siendo llevada al límite de sus condiciones de uso, y es calculado como el cociente del esfuerzo de cedencia del material plástico entre el esfuerzo máximo de la estructura, obtenido tras cada iteración:

$$FS = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{max}} \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

Estos tres parámetros de optimización permitirán obtener una estructura óptima para un material plástico utilizado, con ello se garantiza que soporte las mismas condiciones que la pieza actual, además de tener un menor volumen y contar con un bajo valor de factor de seguridad, llevando nuestra estructura al límite.

#### 2. 4. 3. 1 ANÁLISIS DE DENSIDAD.

El software utilizado en este trabajo, realiza el proceso de optimización topológica a través de la técnica denominada algoritmos genéticos (ver capítulo 1), y presenta los resultados tras cada iteración mediante una escala normalizada de densidades para definir los elementos.

La escala se encuentra definida en un rango comprendido entre 0.0 y 1.0. En el límite inferior 0.0 se encuentran los elementos que no tengan densidad ni rigidez, es decir elementos que serán removidos de la estructura y en el límite superior 1.0 se encontrarán los elementos que tengan densidad y rigidez normal, es decir los elementos que no serán removidos de la estructura. Dicha escala puede ser subdividida en un número de rangos que el diseñador necesite para tener una mejor visualización de los resultados.



El software en su rutina interna para la optimización, le asigna un valor de densidad a cada elemento, con base en la escala antes mencionada, obteniendo así tras cada iteración un gráfico de distribución de densidad de elementos. Dada la función objetivo, se mostrarán únicamente los elementos que se encuentren dentro del valor de dicha función, con lo cual aparecen entonces, a pesar del intento del software por encontrar el mejor acomodo de elementos entre las densidades de 1.0 y 0.0, elementos con densidad intermedia, como era de esperarse.

La optimización topológica del soporte lateral se realiza obteniendo el volumen mínimo, utilizando el material plástico ABS, así como algunos de sus parámetros tales como: el espesor de pared mínimo ( $e_{\min \text{ ABS}}$ ) de 1.9 [mm] y el esfuerzo de cedencia ( $\sigma_{\text{ced ABS}}$ ) de 46.7 [MPa], además de las condiciones del espesor inicial (sección 2.4.2 de este capítulo). Se pretende entonces que la estructura óptima de dicho material tenga un factor de seguridad de 1.2, de esta manera el esfuerzo que se indica como restricción será de:

$$\sigma_{\text{max ABS}} = \frac{\sigma_{\text{ced}}}{FS} = \frac{46.7 \text{ [MPa]}}{1.2} = 38.92 \text{ [MPa]} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

A continuación en la tabla 2.6, se muestran valores obtenidos durante el proceso topológico, con un espesor inicial de 7 veces el espesor de pared mínimo del ABS, según la Ec. (2.16), es decir 13.3 [mm]:

MATERIAL	OPTIMIZACIÓN							
	Espesor Inicial [mm]	Esfuerzo $\sigma_{\text{ced}}$ [MPa]	Iteración	Esfuerzo $\sigma_{\text{inicial}}$ [MPa]	Volumen Inicial e+04 [mm <sup>3</sup> ]	Esfuerzo $\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	Volumen Final e+04 [mm <sup>3</sup> ]	Factor de seguridad
ABS	13.3	46.7	0	20	23.601	20	23.601	2.335
			1	20	23.601	22.509	15.147	2.075
			2	20	23.601	23.153	10.285	2.017
			3	20	23.601	25.568	7.478	1.827
			4	20	23.601	31.565	5.629	1.479
			5	20	23.601	38.321	4.315	1.219

Tabla 2.6. Valores obtenidos del proceso de optimización para el ABS.

En esta tabla se puede observar que en la iteración 5, se da la convergencia, es decir que no puede remover más material de la estructura sin violar las restricciones impuestas al proceso. En dicha iteración se cumple con el criterio de diseño impuesto, no rebasar el esfuerzo de cedencia del material, además cumple con un factor de seguridad muy cercano a 1.2 y también se observa claramente la disminución de material en la estructura.

En la siguiente secuencia de imágenes (tabla 2.7), se muestra la evolución que sufre la estructura tras cada iteración realizada. Cada imagen mostrada es reconocida como resultado de topología. En ellas se observa que los elementos que cuentan con un valor de densidad de 1.0, mostrados en color rojo, lo que indica que dichos elementos cuentan con una densidad normal o igual a la que tenían originalmente y los elementos con valor de densidad 0.0, que se muestran en color azul oscuro, son los elementos que pueden ser removidos de la estructura.



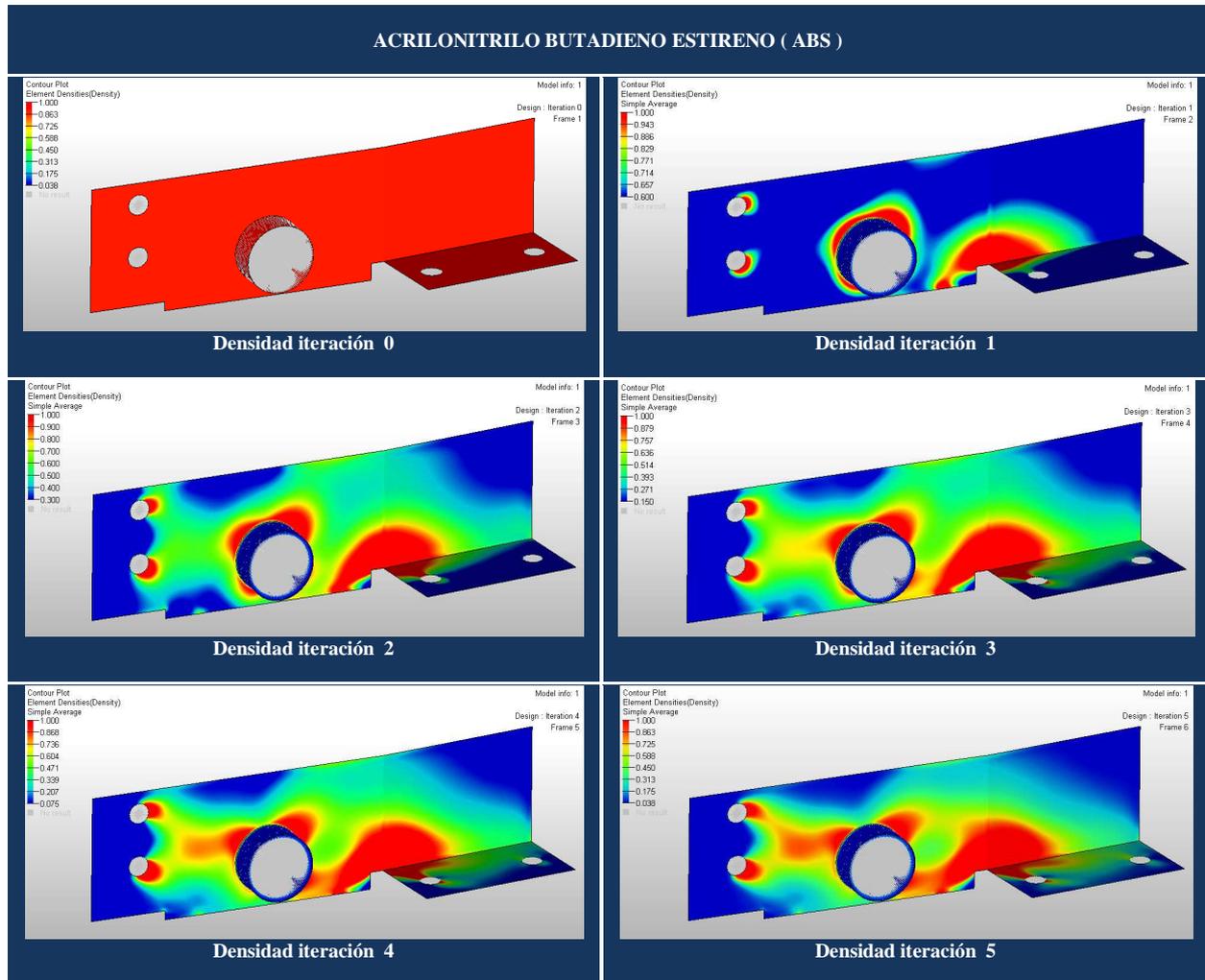


Tabla 2.7. Historial de evolución de densidad de elementos para el ABS.

En la figura 2.30 se muestran los valores obtenidos en la iteración 5, en donde se da la estructura óptima:

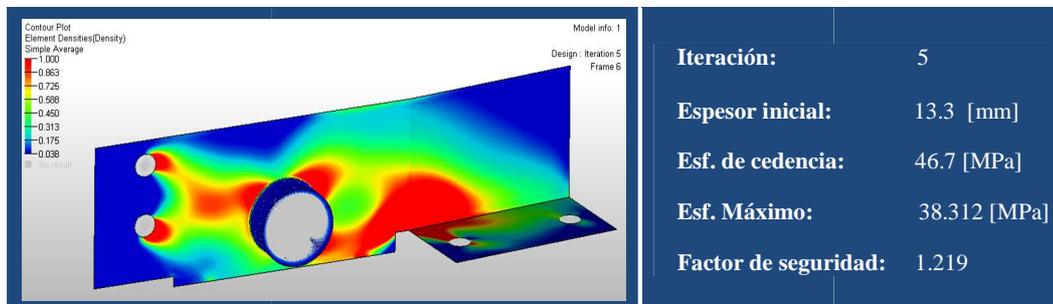


Fig. 2.30. Estructura óptima para ABS.



A continuación se muestra una breve comparación entre la distribución de esfuerzo inicial y la distribución de esfuerzo de la estructura óptima obtenida en la iteración 5.

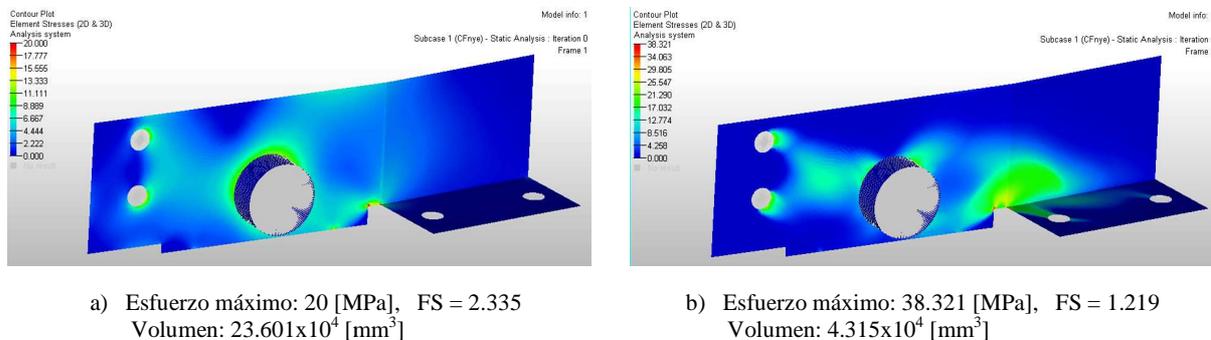


Fig. 2.31. Distribución de esfuerzo: a) inicial y b) final (iteración 5).

Es importante mencionar que los modelos obtenidos mediante este tipo de técnicas, carece siempre de una forma regular e incluso puede presentar discontinuidades en una o varias zonas de la estructura óptima, esta característica por si sola es muy importante y debe ser tomada en cuenta durante la interpretación de los resultados que posteriormente serán llevados de un estado 2D a un estado sólido 3D, y con ello obtener una estructura que además de ser óptima, pueda ser manufacturable.

#### 2. 4. 3. 2 CREACIÓN DEL MODELO SÓLIDO DE LA ESTRUCTURA ÓPTIMA.

A partir del modelo Shell optimizado se procede a realizar el modelado sólido de la estructura óptima. Para ello se utiliza el análisis de densidad obtenido como resultado topológico. Dado que se conoce el valor del espesor inicial, según la Ec. (2.16), el valor del múltiplo “n” del espesor de pared mínimo del material, se convierte en un parámetro muy importante en la construcción del modelo sólido. En el análisis de densidad, inicialmente la escala se divide en el mismo valor del múltiplo antes mencionado, para con ello tener una escala en este caso de siete intervalos de densidad, como se puede observar en la figura 2.32.

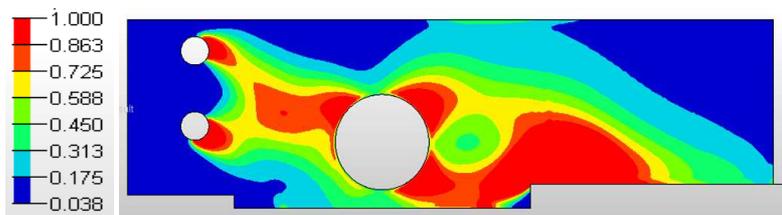


Fig. 2.32. Estructura óptima y escala de densidad de elementos para el ABS, vista frontal.

Con esta definición de la escala en la figura anterior se observan siete “contornos o capas”, donde se puede interpretar que cada contorno tiene un valor de densidad asociado al valor del espesor de pared mínimo del material, es decir que para el contorno o capa 1, los elementos que se encuentren en el primer intervalo de la escala, tienen un valor de espesor igual al espesor de pared mínimo del material. Para el contorno o capa 2, dichos elementos tendrán un valor de espesor de 2 veces el espesor de pared mínimo. Para el contorno o capa 3, los elementos tendrán un valor de espesor de 3 veces el espesor de pared mínimo del material y así sucesivamente, hasta llegar al último intervalo donde la densidad de los elementos es 1.0, es decir al contorno o capa 7.



Así mismo los elementos que se encuentran por debajo del valor del espesor de pared mínimo o densidad 0.0 (color azul oscuro), son interpretados como aquellos que no son necesarios en la estructura óptima y por tanto son removidos.

$$\text{Número de contornos o capas} = n; \quad n \geq 7 \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

$$\text{Espesor de contorno o capa} (n) = (n * e_{\text{mín}}) \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

Dependiendo del valor de espesor inicial que se asigne al Shell, durante el proceso de optimización, se tendrán entonces “n” intervalos en la escala de densidades y por lo tanto igual número de contornos o capas. En la tabla 2.8, se observa lo antes mencionado, la generación de cada una de los contornos o capas.

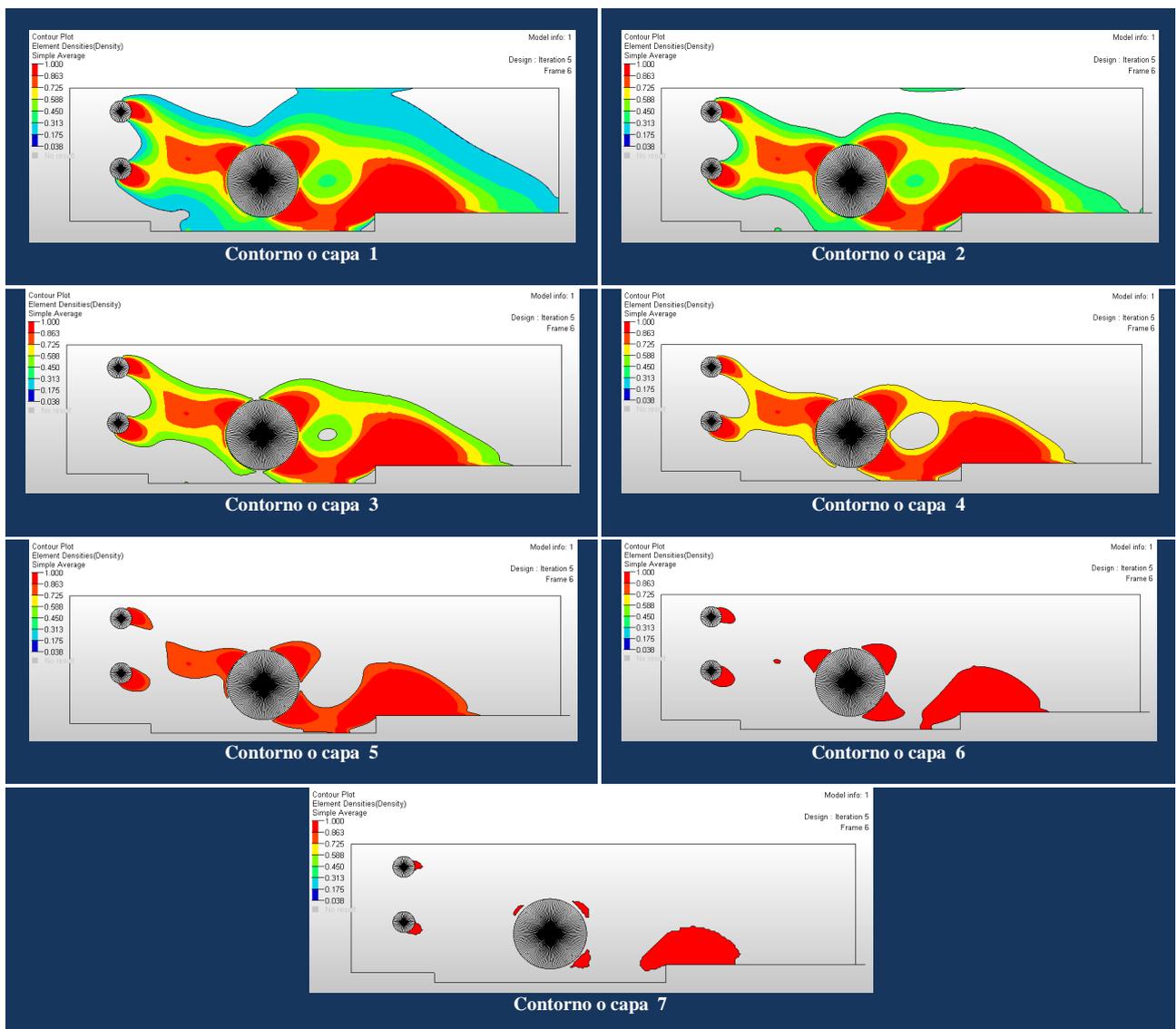


Tabla 2.8. Generación de contornos o capas con base en el análisis de densidad para el ABS.



El tener definidos los contornos o capas, ofrece la posibilidad de importar a un sistema CAD cada una de dichas capas, como un sketch o esbozo, lo cual es muy importante ya que cada capa se puede trabajar de manera individual (en este trabajo se utilizó CATIA V5 versión estudiantil).

Con el objetivo de interpretar el contorno de cada capa y poder tener una aproximación lo más cercano a dicho contorno, se utilizan puntos que se encuentran localizados sobre el contorno de cada capa y que pueden ser trazados en el CAD de una manera rápida y sencilla, ya que la precisión no es un factor determinante durante la creación de dichos puntos, para posteriormente generar con base en ellos una curva spline y lograr aproximarse lo más posible al contorno como se observa en la figura 2.33.

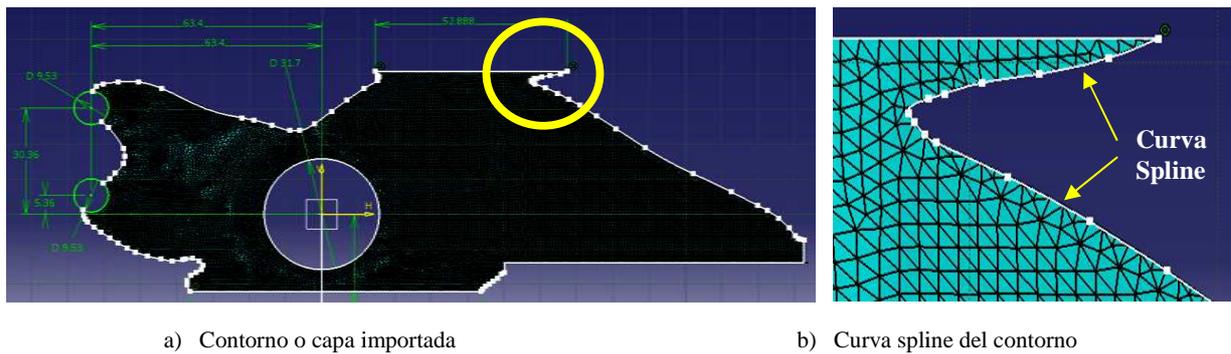


Fig. 2.33. Generación de contornos o capas.

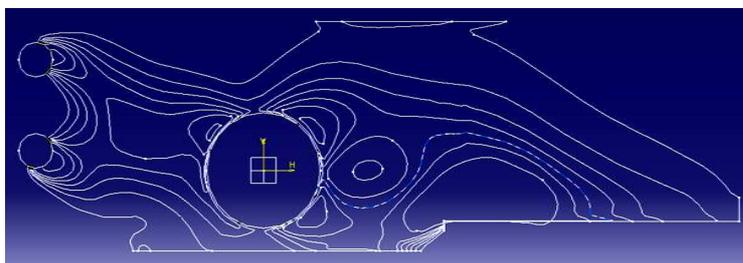


Fig. 2.34. Todos los contornos o capas que forman el sketch (en total 7), vista frontal.

Esto mismo se realiza para cada uno de las capas generadas a partir del proceso topológico y en las tres direcciones del plano cartesiano (Planos XY, XZ y YZ). En la imagen 2.34 se muestra el sketch logrado a partir de dicho procedimiento en un plano frontal (Plano YZ), para las 7 capas importadas y trabajadas en el sistema CAD. Con esto se obtienen las capas con las cuales se dará inicio a la creación del modelo de la estructura óptima de manera sencilla.

Para asignar el valor de espesor a cada capa generada con base en el análisis de densidad, antes mencionado, a continuación se muestra la siguiente tabla 2.9, donde se observa la relación entre las siete capas generadas y su valor de espesor dado.

MATERIAL	Número de capa	Porcentaje del espesor según el análisis de Densidad	Valor del espesor [mm]
ABS	1	0.143	1.9
	2	0.286	3.8
	3	0.429	5.7
	4	0.571	7.6
	5	0.714	9.5
	6	0.857	11.4
	7	1	13.3

Tabla 2.9. Relación de valor de espesor por capa.



---

Para comenzar a realizar el modelo sólido de la estructura óptima, se toma en cuenta tanto el valor de espesor asignado a cada capa, así como también los dos casos considerados y denominados de dirección de “crecimiento”, con los cuales se pretende abarcar un mayor espectro en la solución de creación del sólido. De esta manera se presentan entonces los dos casos:

1. Creación del modelo de manera bidireccional.
2. Creación del modelo tomando en cuenta las superficies de contacto.

### CREACIÓN DEL MODELO DE MANERA BIDIRECCIONAL.

El modelo sólido realizado de esta manera, implica un “crecimiento bidireccional”, es decir que partiendo del contorno o capa 1, la cual tiene el valor del espesor de pared mínimo del material, como un sketch central, con esto el crecimiento o también conocido en términos del CAD como extrusión, se da en las direcciones frontal y posterior, sin importar superficies que pudieran estar en contacto con otros elementos. En la figura siguiente se muestra como se da el crecimiento para las dos primeras capas (dirección en color amarillo), en ambas direcciones y por ende las demás capas crecen de manera semejante.

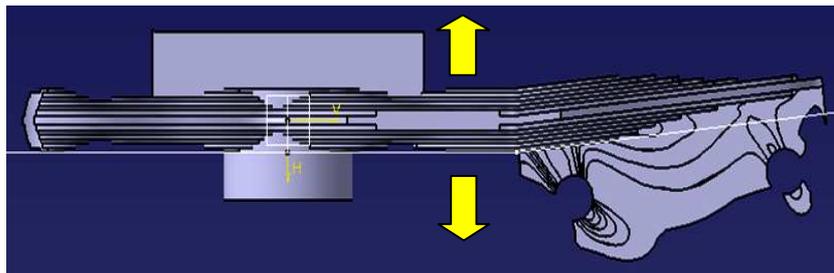
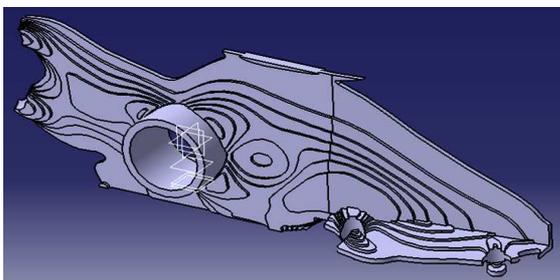
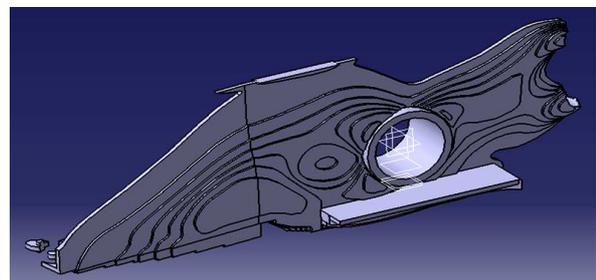


Fig. 2.35. Crecimiento bidireccional de las dos primeras capas.

El inconveniente de hacer el modelo sólido de la estructura óptima de esta manera, es que no se contemplan las zonas de contacto existentes entre la estructura y las demás piezas asociadas. Esto puede generar deformaciones en ciertas zonas donde se dé el contacto con otros elementos, lo que no es conveniente en general en el diseño de piezas plásticas. En las siguientes imágenes, se observa la estructura óptima generada mediante este proceso de creación bidireccional, en los tres planos donde se muestra perfectamente la idea del crecimiento en dos direcciones.



a) Vista frontal



b) Vista posterior

Fig. 2.36. Estructura óptima derivada del proceso bidireccional.



---

## CREACIÓN DEL MODELO TOMANDO EN CUENTA LAS SUPERFICIAS DE CONTACTO.

Para realizar el “crecimiento” de esta manera, se identifican y consideran las superficies que están en contacto con otros elementos, de esta forma dichas superficies se mantiene fijas, es decir son representadas como superficies de no diseño. Así el crecimiento se da a partir de dicha superficie en una sola dirección, comenzando con el contorno o capa 1 que tiene como valor de espesor el del espesor de pared mínimo del material.

Siguiendo esta idea, en el caso de estudio se detectaron tres zonas que están en contacto con otras, en particular con el chasis bastidor y con el contratope (ver sección 2.3.2 de este capítulo). En la siguiente figura se muestran las superficies que se encuentran en contacto y a partir de ahí comenzar el crecimiento, así como el modelo terminado.

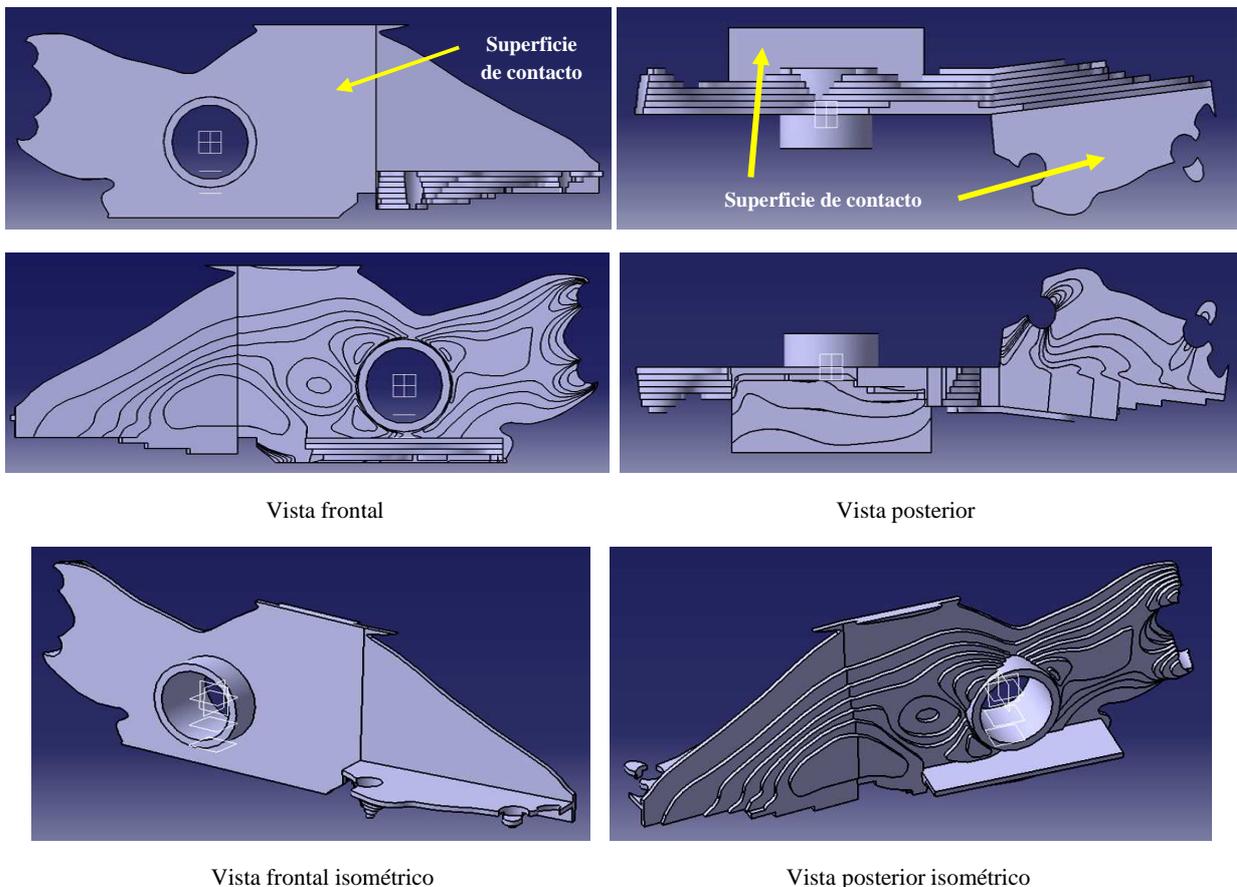
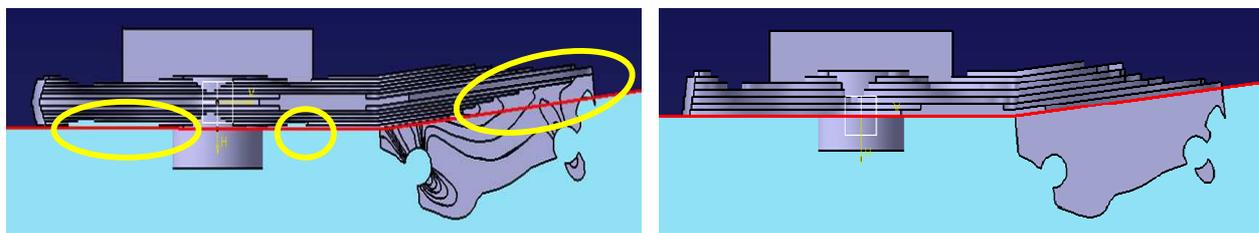


Fig. 2.37. Estructura óptima tomando en cuenta superficies de contacto.

## COMPARATIVO.

En la figura 2.38 se muestra un comparativo entre los dos modelos de crecimiento. Las zonas en color amarillo en la figura 2.38 a), se muestra que existen áreas de contacto muy pequeñas con el chasis bastidor, en la imagen la línea en color rojo, y en otras es casi nulo el contacto, mientras que en la figura 2.38 b), se observa que el contacto es mayor, lo que provoca un menor desplazamiento en la dirección de contacto.





a) Crecimiento bidireccional

b) Crecimiento tomando en cuenta superficies de contacto

Fig. 2.38. Comparativo entre las dos propuestas de creación del modelo sólido (vista superior).

Para nuestro caso de estudio o problema de diseño, se utiliza el modelo creado tomando en cuenta superficies de contacto debido a:

1. Se mantiene una mayor área de contacto entre superficies de elementos, lo que provocará un menor o casi nulo desplazamiento en la dirección de contacto, lo cual sucede en la pieza original metálica.
2. Pensando en un posible maquinado del molde para cada uno de los modelos, se puede observar claramente en la figura 2.35, que el crecimiento bidireccional necesitaría de un doble maquinado, tanto en la cavidad así como en su contraparte aumentando costos y el tiempo de fabricación, mientras que tomando en cuenta superficies de contacto, el maquinado se realiza solo en la cavidad, lo que podría reducir en proporción aproximada un 50 % los costos y el tiempo de fabricación del molde, en comparación con el crecimiento bidireccional.
3. El modelo óptimo obtenido tomando en cuenta las superficies de contacto, mantiene la esencia geométrica de la pieza original metálica, logrando con ello mantener proporción dimensional y de cierta manera forma. Puntos mencionados al inicio y considerados en la metodología presentada.

#### 2.4.4 ADECUACIÓN PARA MANUFACTURA.

El resultado de la optimización topológica es interpretado para crear un sólido a partir de un Shell, es decir una estructura óptima que satisface las solicitaciones así como las restricciones impuestas; sin embargo este modelo no es definitivo, ya que sigue siendo considerado como un concepto y es poco práctico llevar a cabo dicha estructura.

Debido a que cuenta con una forma que contiene zonas aún irregulares, lo que tiene grandes afectaciones, pensando en el proceso de inyección de plástico como proceso de manufactura para fabricar dicha estructura óptima. Es por ello que aunque llevar a cabo la optimización de una estructura es un proceso teórico “relativamente sencillo”, la fabricación de esta no lo es, dado que los resultados de la topología son tan sólo una guía de diseño, es decir un punto de partida para la elaboración de una nueva estructura que resulte capaz de soportar las condiciones de uso durante su vida útil.

Por tanto la manufactura en el proceso de diseño se convierte en un factor determinante durante el proceso de optimización estructural, y para cumplir con el objetivo de este trabajo se plantea una serie de pasos a seguir para llevar a cabo una adecuación de una estructura óptima, con la finalidad de que dicha estructura sea manufacturable mediante el proceso de inyección de plástico.

Logrando la adecuación para manufactura, se da un paso inicial de acercamiento e interacción entre la optimización estructural topológica y la manufactura, para sentar bases y programar una aplicación capaz de implementar estos criterios generados de una manera “manual”, y realizarlos de forma automática dentro de un mismo análisis (en un futuro no muy lejano).



#### 2. 4. 4. 1 CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO.

El diseño de una pieza plástica que posteriormente será inyectada, se realiza con la idea preconcebida de que la pieza se forma mediante el llenado de una cavidad. Esta cavidad forma parte de un molde de inyección, el cual dispone de colada, canales, punto de inyección, plano de partición, además de salidas de gases, partes móviles, etc.

Bajo esta idea se deben tomar en cuenta criterios o consideraciones geométricas que son más comunes a destacar durante el proceso de inyección de plástico, y que son considerados la base para lograr la adecuación de una estructura óptima para ser manufacturada mediante dicho proceso de inyección en este trabajo. Dichas consideraciones, con base en una búsqueda minuciosa en artículos, libros y manuales especializados en el proceso, se determinó que los factores geométricos más importantes durante el diseño de piezas plásticas y que serán utilizados a lo largo de este trabajo son los siguientes:

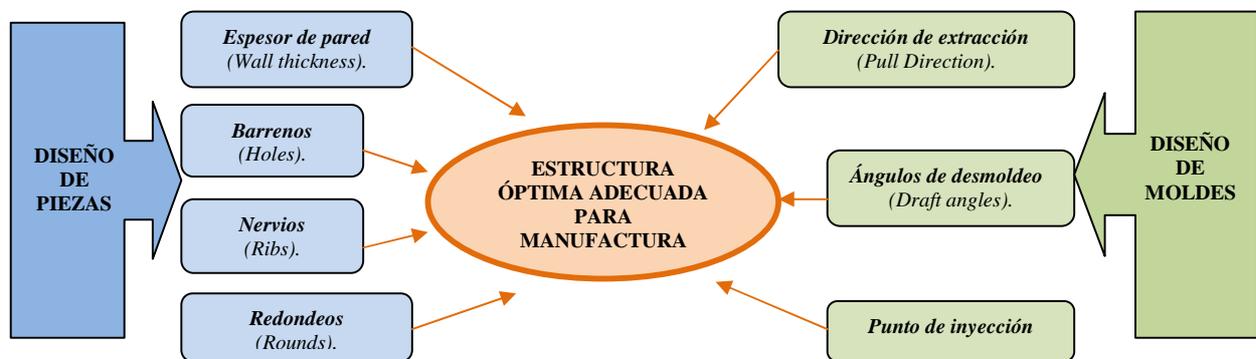


Fig. 2.39. Consideraciones geométricas para llevar a cabo la adecuación para manufactura.

Con esto se puede ver que el factor más importante durante el diseño de piezas plásticas es el espesor de pared que puede ofrecer cada uno de los materiales plásticos utilizados. De esta manera se generalizar que cuanto más regulares sean los espesores de la pieza, menos problemas tendremos en los procesos de inyección y post-inyección. En el caso de que existan espesores de pared muy diferentes, hay que realizar el cambio de una dimensión a otra de la forma más gradual posible. Esta regularidad en el diseño ayudará a evitar turbulencias de flujo importantes durante el llenado de la pieza.

Sin embargo no hay que olvidar que la pieza va a ser obtenida mediante un proceso de transformación por inyección. Este proceso obliga a pensar en definir una posible dirección de extracción y con ello un punto por donde va a penetrar el material en estado fundido, estableciendo y reforzando la idea de que no se puede desligar dos conceptos fundamentales como son: el diseño y fabricación de una pieza plástica.

#### 2. 4. 4. 2 ADECUACIÓN PARA MANUFACTURA DE UNA ESTRUCTURA ÓPTIMA.

Se presenta una descripción detallada del proceso de adecuación para manufactura de la estructura óptima que podrá ser manufacturada, con base en los puntos antes mencionados. No se debe desligar el concepto de diseño de una pieza de plástico, con el del diseño del molde, ya que este último es el que nos da la posibilidad de inyectar y por tanto fabricar dicha pieza óptima.



#### 2. 4. 4. 2. 1 ESPESOR DE PARED.

Se puede decir que el parámetro más importante o de los más importantes en el proceso de inyección de plástico es el espesor de pared, ya que de él dependen muchas otras consideraciones como la forma, el tiempo de llenado en el molde, el enfriamiento de la pieza, entre otras. Bajo este contexto en este trabajo el espesor de pared mínimo, por su importancia durante el diseño de piezas plásticas, es el que permitirá la interacción entre la optimización estructural y la manufactura.

Al inicio del proceso de optimización topológica, se indica un espesor inicial, el cual está en función del espesor de pared mínimo del material utilizado (ver sección 2.4.3.3 de este capítulo). El utilizar de esta manera el espesor de pared, implica que las piezas obtenidas mediante este proceso propuesto, serán piezas plásticas que tienen ventajas y desventajas como se muestra a continuación:

VENTAJA	DESVENTAJA
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Las piezas tendrán un espesor uniforme en su gran mayoría. Esto provoca que el flujo de material llegue a toda la pieza durante la inyección, tal como lo piden las restricciones de dicho proceso.</li><li>2. Las piezas en general no son de pared delgada, sino que son piezas gruesas (o sólidas), pero esto se suple con la reducción general de masa tras la optimización topológica, ya que el tener piezas de pared delgada es para reducir material en la pieza.</li><li>3. Dicho valor de espesor puede ser incorporado a un algoritmo computacional como un parámetro de manufactura de una manera fácil y sencilla.</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Se tienen piezas en su gran mayoría sólidas, no las típicas de pared delgada.</li><li>2. Se tienen que realizar pruebas con distintos materiales y lograr tener con ello el espesor inicial más pequeño, además del costo de dicho material.</li></ol>

Tabla 2.10. Ventajas y desventajas respecto del espesor de pared.

#### 2. 4. 4. 2. 2 AGUJEROS (HOLES).

El diseño de agujeros en una pieza plástica tiene implicaciones importantes al fabricar el molde. De modo general se puede diferenciar tres tipos de agujeros: no pasantes o ciegos, pasantes y con escalón. El siguiente paso de la adecuación, es localizar las zonas donde se alojan agujeros para tornillería en la estructura óptima.

- a) Se identifican las zonas donde se alojan agujeros o barrenos para tornillería existentes en la estructura óptima. Desde un inicio antes de llevar a cabo la optimización, se debe observar si la pieza contiene o no agujeros para tornillos, con lo cual se da la posibilidad en caso de no tener agujeros de omitir este paso. En nuestro caso de estudio se localizan dos zonas con agujeros para tornillos como se muestra en la figura 2.40, en color amarillo.

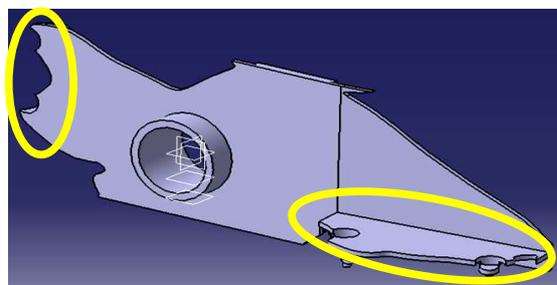


Fig. 2.40. Zonas de tornillería, en la estructura óptima.



- b) Dichos barrenos o agujeros, tendrán un espesor especificado entre el diámetro interno y el diámetro externo del agujero, de por lo menos dos veces el valor de diámetro de dicho agujero, siguiendo las recomendaciones de los manuales de inyección [5, 10, 19].

$$\varphi_{Esp} \geq 2 * \varphi_{Agujero} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

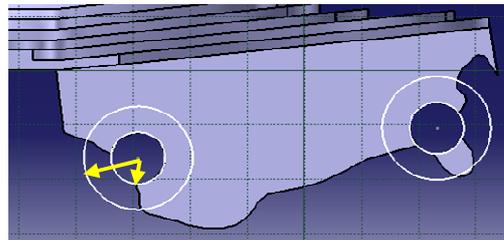


Fig. 2.41. Construcción de agujeros para tornillería.

- c) El valor de profundidad o altura que tienen los agujeros es igual al espesor inicial, el cual está en función del espesor de pared mínimo del material utilizado (ver sección 2.4.3.3 de este capítulo), generando entonces alojamiento para barrenos del tipo pasante como se observa en la siguiente figura en color amarillo:

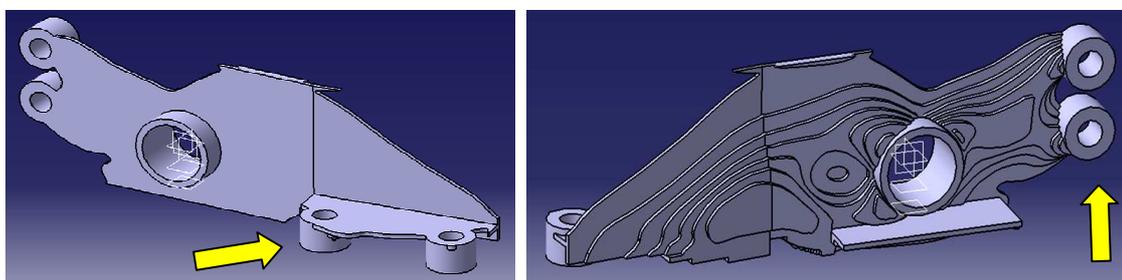


Fig. 2.42. Estructura óptima tras esta fase de adecuación: vistas frontal y posterior.

El realizar los agujeros de esta manera, implica que las estructuras óptimas obtenidas mediante el proceso propuesto serán estructuras que tienen ventajas y desventajas como se muestra a continuación:

VENTAJA	DESVENTAJA
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se pueden obtener estructuras óptimas en donde se puedan diferenciar los tres tipos de agujeros: no pasantes o ciegos, pasantes y con escalón.</li> <li>2. La estructura óptima tendrá agujeros del tipo pasante por facilidad de creación. Lo cual permite construir de manera más sencilla el molde para dicha pieza óptima, particularmente permitiendo una mayor resistencia de los corazones a las presiones internas durante el llenado del molde.</li> <li>3. La estructura óptima cumple con un valor estimado recomendado en la mayoría de los manuales de diseño de piezas plásticas, el espesor del diámetros externo del agujero será de mínimo dos veces el diámetro del agujero.</li> <li>4. Lo anterior se puede incorporar a un algoritmo computacional, utilizando como parámetro el diámetro del agujero.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La posibilidad de cambiar toda o la gran mayoría de la tornillería involucrada en la estructura óptima.</li> <li>2. El construir agujeros del tipo pasante, implica que las dimensiones generales de la estructura óptima y de los elementos durante su ensamblaje, no cambien.</li> <li>3. Se necesita realizar un reforzamiento posterior en dichos agujeros.</li> </ol>

Tabla 2.11. Ventajas y desventajas respecto de los agujeros o barrenos.



### 2. 4. 4. 2. 3 DIRECCIÓN DE DESMOLDEO O EXTRACCIÓN (PULL DIRECTION).

Posterior a obtener la estructura óptima, se debe indicar una posible dirección de extracción de dicha estructura, para con ello continuar con la adecuación para manufactura, ya que esto tiene una gran implicación en el diseño de piezas plásticas.

- a) Se detectan las posibles direcciones de extracción o desmoldeo, tomando en cuenta que la apertura del molde tiene que ser perpendicular a las superficies donde se encuentran localizados los agujeros para tornillería (barrenos). Para este caso particular se tienen 2 posibles direcciones de extracción:

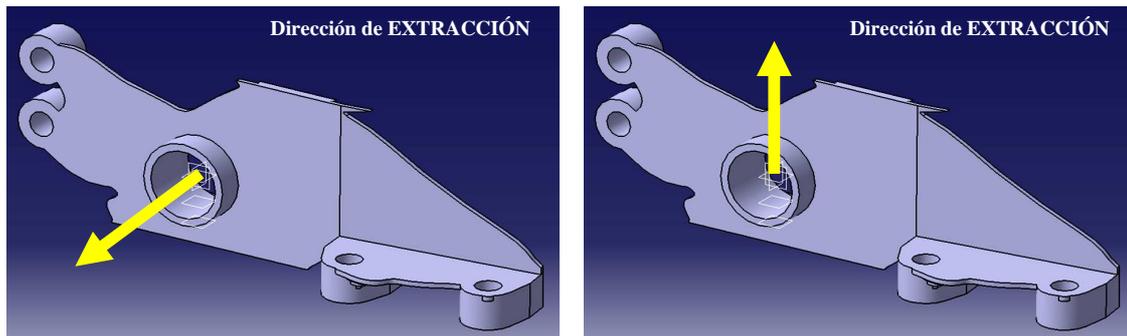


Fig. 2.43. Posibles direcciones de extracción para la estructura óptima.

- b) Para elegir la dirección de extracción se toma en cuenta el número de posibles corazones que debería llevar el molde, considerando una u otra dirección y el movimiento de los insertos en caso de tenerlos. De esta manera la dirección 1 en la figura 2.43, es la dirección de extracción que se considera en este trabajo, ya que el molde de la estructura óptima obtenida, tiene la consideración de llevar solo 3 corazones, y los agujeros perpendiculares a la dirección son considerados en un inserto, permitiendo obtener así una pieza única, sin la necesidad de procesos secundarios.

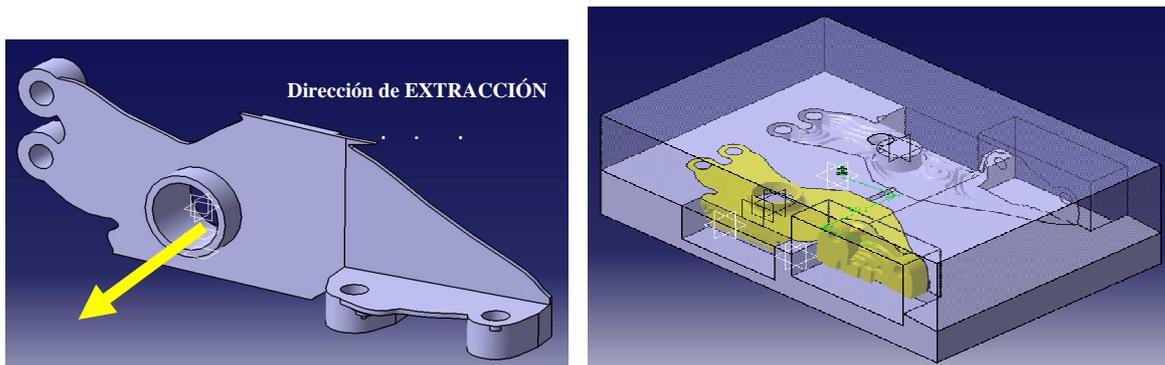


Fig. 2.44. Dirección de extracción seleccionada para desmoldeo de la estructura óptima.

En la figura 2.44 se muestra una imagen de la propuesta del molde generado para la estructura óptima adecuada para manufactura y que se observa en el anexo 6 de este trabajo. El tomar la decisión de esta dirección de extracción o desmoldeo, implica que las estructuras óptimas obtenidas serán estructuras que tienen ventajas y desventajas como se muestra a continuación:



VENTAJA	DESVENTAJA
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se refuerza la idea que el diseño de piezas plásticas y el diseño de moldes deben estar siempre ligados. Por lo tanto en este trabajo la optimización también se liga al diseño de moldes. Logrando una interacción más fuerte entre optimización e inyección de plástico.</li> <li>2. Al definir la dirección de desmoldeo de la estructura óptima, se obtiene una idea muy clara de la posible superficie de partición, así como una posible localización y número de corazones, insertos, botadores, etc., adelantándonos a contemplar tiempos y costos de fabricación en el diseño de moldes.</li> <li>3. El considerar a los agujeros con su eje paralelo al movimiento de apertura del molde, facilita de manera general la acción del movimiento de los pasantes, lo cual se recomienda durante el diseño del molde.</li> <li>4. Esta condición de la dirección de desmoldeo, puede ser integrada a un algoritmo computacional, desde la fase inicial de la optimización, como una restricción geométrica y permitir con ello el crecimiento del modelo sólido de la estructura óptima</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El tener agujeros con su eje perpendicular a la dirección del movimiento de apertura del molde, genera la posibilidad de crear dichos agujeros con procesos posteriores al moldeo de la estructura óptima, lo que se traduce como procesos secundarios de manufactura y en particular en tiempos de fabricación y costos extras.</li> <li>2. En el caso de tener una estructura óptima que no contenga agujeros para tornillería, el elegir su dirección de extracción, así como de otros factores para la generación de su molde, se vuelve una tarea más compleja.</li> </ol>

Tabla 2.12. Ventajas y desventajas respecto de la dirección de desmoldeo.

#### 2. 4. 4. 2. 4 MODIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA ÓPTIMA.

Lo que a continuación se presenta como parte de la adecuación para manufactura, es llevar a cabo una modificación de la estructura óptima, con el fin de prevenir ciertos aspectos durante el cierre y apertura del molde así como de la inyección de la pieza.

- a) Se identifican zonas que se consideren como problemáticas para desmoldar la pieza, en particular donde intervenga un inserto, tomando en cuenta la dirección de extracción y diseño del molde de la estructura óptima, según la sección anterior. Bajo esta idea, las zonas encerradas en color amarillo son las que necesitan ser modificadas para poder permitir el libre movimiento del inserto en esa zona y no dejar que se atasque el inserto durante la expulsión de la pieza.

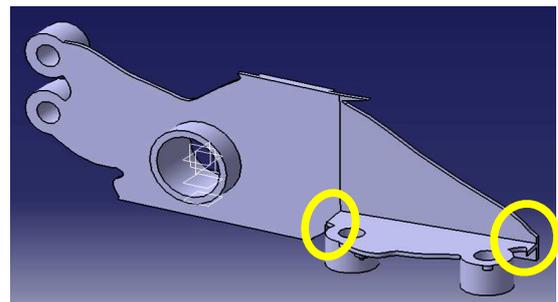
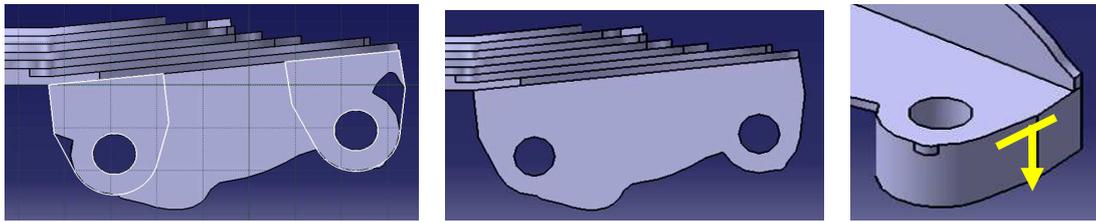


Fig. 2.45. Zonas susceptibles de modificación.

- b) Se propone entonces dibujar dos geometrías cerradas, las cuales en este caso abarcan a los barrenos alojados en dicha zona (figura 2.46 a) y que tendrán un crecimiento o altura de valor igual al espesor inicial. Con esto lo que se tiene es un cambio de geometría que permite un libre movimiento de entrada y salida del inserto en el molde, donde además se adquiere una mayor rigidez en los agujeros en dicha zona.





a) Zonas a modificar.

b) Estructura modificada.

c) Crecimiento de la modificación

Fig. 2.46. Modificación de la estructura óptima en la zona del inserto.

- c) Se vuelven a identificar zonas a simple vista que puedan generar problemas ahora de llenado de la pieza durante la inyección. Dichas zonas son aquellas que tengan sesgos muy pronunciados (o picos), lo cual provoca la generación de vorticidades del material en dicha zona (encerradas en color amarillo), debido a cambios abruptos de geometría, lo que provoca como consecuencia que no se llene correctamente la pieza durante la inyección y con ello una mayor posibilidad de falla, sobre todo si esto se da en zonas donde sea aplicada una solicitación o carga.

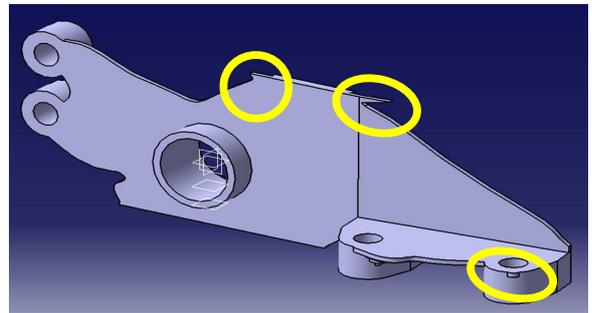


Fig. 2.47. Zonas que serán eliminadas.

- d) Al determinar las zonas de modificación, se procede a eliminar dichos sesgos como se muestra en a figura 2.48 lo que se intenta es mantener la línea sobre la cual se encuentra el sesgo, esto permite no tener cambios abruptos en la geometría óptima, además de generar un libre flujo del material en dicha zona, lo cual se traduce en una reducción del tiempo de llenado y disminución de posibles defectos.

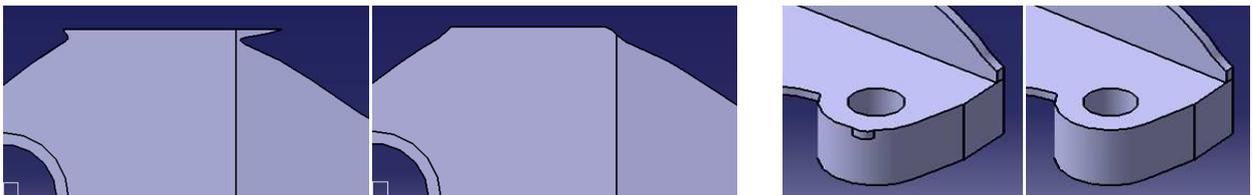


Fig. 2.48. Estructura óptima, antes y después de la modificación, al eliminar sesgos.

- e) En la imagen 2.49, se identifican más zonas en la parte posterior de la estructura óptima que en algún momento pueden llegar a generar también problemas de llenado. Zonas que tienen que ver con la formación de la estructura óptima, es decir los contornos o capas provenientes de la optimización topológica, mostradas en color amarillo.

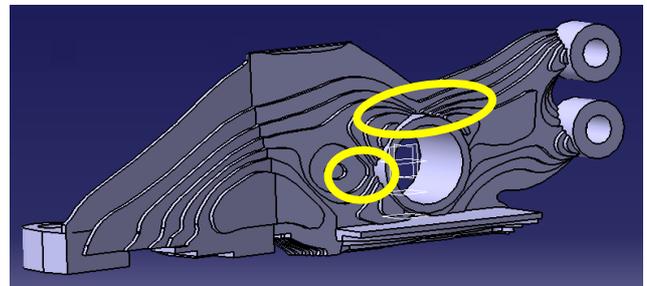


Fig. 2.49. Zonas susceptibles de modificación.



En la figura 2.50, se observa que en las zonas antes mencionadas, existen pequeños espacios donde se requiere una modificación de la geometría, ya que además de provocar vorticidad en el flujo, pensando en la fabricación del molde, dichas zonas son muy difíciles de maquinar, lo que se traduce en un costo muy alto de fabricación del molde.

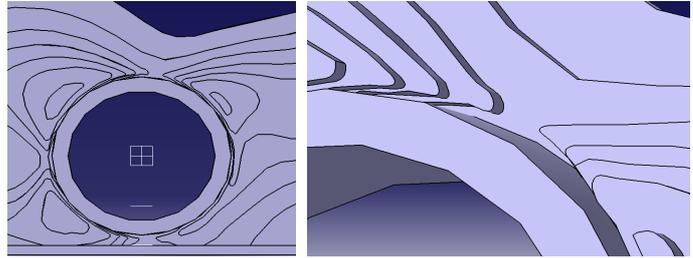


Fig. 2.50. Zonas derivadas del proceso de optimización topológico.

- f) Se procede entonces a realizar una modificación más, dado que se tienen los contornos o capas con las cuales se formó el sólido de la estructura óptima, se unen las zonas que de alguna manera se encuentren “desconectadas”, esto mediante la unión de curvas de contorno, a través de curvas spline y tratando con ello de mantener una forma de dicho contorno para no perder la esencia de la geometría óptima.

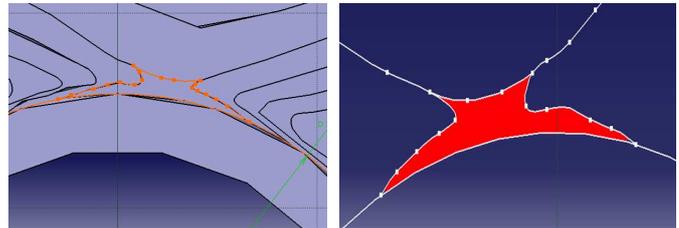


Fig. 2.51. Modificación de la estructura mediante conexión geométrica de contornos (color rojo).

Como se observa en la figura anterior, las zonas en color rojo son aquellas que proporcionan la unión para cada uno de los contornos o capas detectadas. Esto al final proporciona que el flujo sea más uniforme en dichas regiones y se asegure un buen llenado de la pieza. En la figura 2.52, se muestra un breve comparativo entre las regiones antes y después de llevar a cabo la modificación de los contornos o capas.

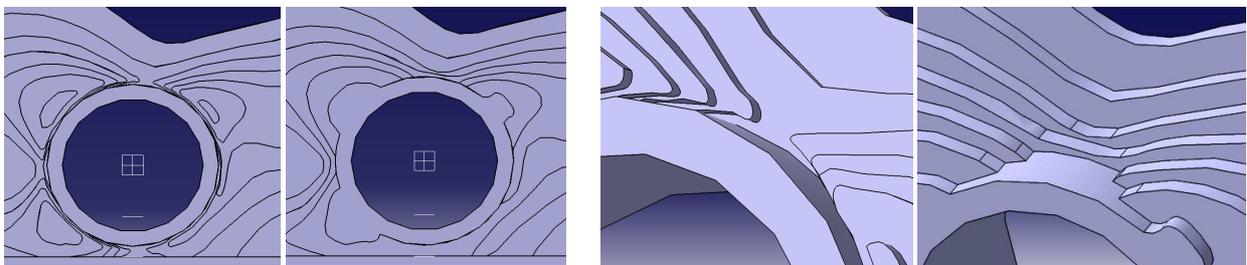


Fig. 2.52. Zonas antes y después de la modificación de las capas.

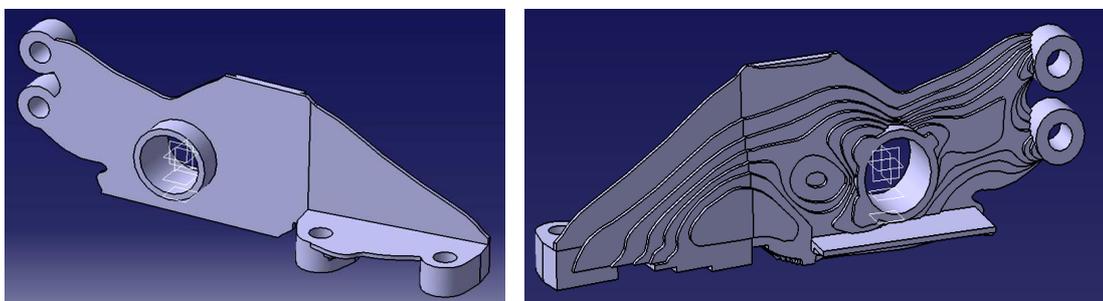


Fig. 2.53. Estructura óptima tras la modificación sufrida.



El realizar estas modificaciones tomando en cuenta tanto el diseño del molde, así como el llenado de la estructura, implica que las estructuras óptimas obtenidas tienen ciertas ventajas y desventajas como se muestra a continuación:

VENTAJA	DESVENTAJA
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La modificación de la geometría para mejorar el movimiento de los insertos, provoca por un lado reducir el problema de extracción durante la apertura del molde y por otro se gana rigidez en dichas zonas modificadas.</li> <li>2. La eliminación de aristas pronunciadas o sesgos, reduce la generación de vorticidades del flujo y tiempos durante el llenado de la pieza.</li> <li>3. La modificación de los contornos o capas, con las cuales se crea la estructura óptima, provoca una disminución de costos de fabricación al eliminar zonas de espacios reducidos, donde es complejo maquinar el molde.</li> <li>4. En general con todas las modificaciones realizadas se logra que el flujo sea uniforme, reduciendo regiones donde se generaría un vórtice y líneas de soldadura durante el llenado (lo que provocaría un debilitamiento de la pieza), reducción de costos de maquinado del molde, etc.</li> <li>5. La unión de zonas en los contornos, puede ser introducida en un algoritmo computacional, mediante la detección de un valor de distancia específico entre un contorno y otro generado tras la optimización topológica.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se tiene que conocer el posible número de insertos que llevaría el molde, para llevar a cabo la modificación.</li> <li>2. Las modificaciones realizadas generan un aumento de material en la estructura óptima final.</li> <li>3. Se necesita realizar un posible análisis de flujo, para revisar las modificaciones hechas.</li> </ol>

Tabla 2.13. Ventajas y desventajas respecto de las modificaciones geométricas sufridas.

#### 2.4.4.2.5 COSTILLAS O NERVIOS (RIBS).

En la mayoría de las piezas plásticas, se busca que tengan un bajo valor de volumen, por ello se realiza una reducción de volumen en zonas denominadas como “gruesas” en la pieza, a través de los denominados nervios. Estos nervios se colocan generalmente en lugares de la pieza donde la estética de las mismas no es relevante y se sitúan de manera general en zonas donde la estructura recibe solicitaciones. Bajo este contexto, se procede entonces a continuar con la adecuación de la estructura óptima considerando ahora los nervios o mejor conocidos como ribs.

- a) Se identifican zonas que tienen el espesor máximo, es decir el espesor inicial, y que por tanto son consideradas como zonas sólidas o gruesas y son susceptibles de ser sustituidas por nervios. En la figura 2.54, en color amarillo se muestran dichas zonas. En este caso particular coincide dicha zona, tanto con una región donde existe una solicitación del sistema (carga), y además con una región donde existen agujeros para barrenos. Lo cual se convierte en zonas aptas para incluir nervios [5, 10, 19].

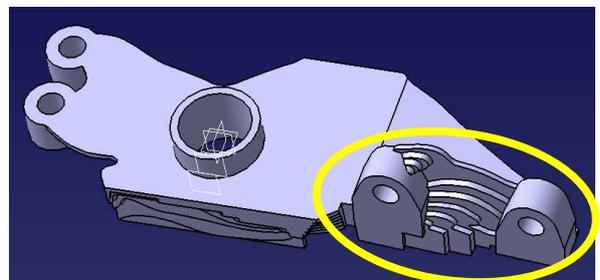


Fig. 2.54. Zonas susceptibles de modificación



- b) Una vez encontradas las regiones sólidas, se procede a realizar un entramado o arreglo de pequeños segmentos (nervios), que serán integrados a la estructura óptima permitiendo una reducción de volumen, así como un aumento de rigidez en la zona dicha, en particular en los agujeros localizados en esa región, como se observa en la figura 2.55. Todo ello con base en los manuales para inyección consultados. Dichos nervios deben cumplir con las siguientes características:

- ⊕ El espesor o ancho de los nervios, debe ser igual o mayor al espesor de pared mínimo del material utilizado.

$$e_{\text{NERVIO}} \geq e_{\text{pared minimo del material}} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

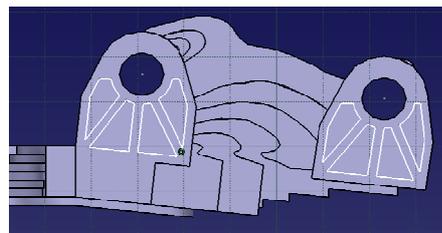
- ⊕ La altura o profundidad de los nervios debe ser de por lo menos 3 veces el valor del espesor de pared mínimo del material utilizado.

$$h_{\text{NERVIO}} \geq 3 * e_{\text{pared minimo del material}} \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

- ⊕ El entramado o arreglo, de manera general debe realizarse aproximadamente con un ángulo de entre 30° y 45°, dado que son ángulos comunes y fáciles de utilizar en un arreglo.



a) Región sólida o gruesa



b) Creación de los nervios

Fig. 2.55. Creación de nervios en la región sólida encontrada.

En la figura 2.56 se muestra una imagen de la adecuación de la estructura óptima, bajo la idea de los nervios. En éste caso particular el ángulo tomado para llevar a cabo el arreglo de nervios como se muestra en la figura 2.55 b), fue de 35°, tomando como referencia el centro del agujero, debido a que es el valor adecuado según las dimensiones de la región encontrada y con ello tener un arreglo lo más semejante a los recomendados en los manuales de inyección [5, 10, 19].

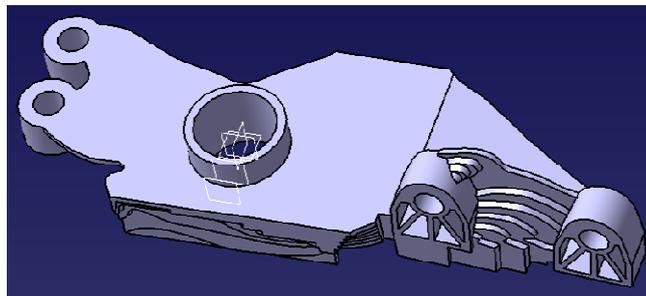


Fig. 2.56. Estructura óptima tras la adecuación sufrida.

El tomar en cuenta a los nervios como parte de la adecuación para manufactura de la estructura óptima, es muy importante, ya que es un factor determinante durante el diseño de pizas plásticas que no puede pasar desapercibido. Sin embargo esto nos lleva a obtener ciertas ventajas y desventajas como se muestra a continuación:



VENTAJA	DESVENTAJA
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El incluir nervios en la estructura óptima, permite disminuir volumen en ciertas zonas, donde la estructura era sólida, además de rigidizar ciertos elementos como son las zonas de los agujeros y en donde se localicen cargas en la estructura.</li> <li>2. El tener un espesor constante en todos los nervios permite tener arreglos de estos y además se tiene un llenado más rápido y uniforme de la pieza.</li> <li>3. Los nervios pueden ser añadidos a un algoritmo computacional, dando como parámetros los valores tanto de espesor así como de altura de dichos nervios y el ángulo entre ellos.</li> <li>4. Las regiones donde se puedan incluir nervios, pueden ser localizadas mediante la utilización del valor de espesor inicial de la pieza, ya que siempre existirán zonas con dicho valor en una pieza optimizada y pueden ser controladas en un algoritmo computacional.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Las regiones sólidas de una estructura, susceptibles de incluir nervios, por dimensión de dicha zona y en general de la pieza, deben permitir un tamaño de espesor y altura de cada nervio incluido, y formar el arreglo de nervios en caso de ser necesario.</li> <li>2. Solo se deben utilizar en zonas donde se puedan integrar, es decir en regiones en donde se localicen agujeros, regiones de carga, etc.</li> <li>3. Los arreglos son sólo para un rango de valores de ángulo, esto reduce en gran medida la forma de un arreglo de los nervios.</li> </ol>

Tabla 2.14. Ventajas y desventajas respecto de los nervios en la estructura óptima.

#### 2. 4. 4. 2. 6 REDONDEOS (ROUNDED).

El uso adecuado de radios durante el diseño de piezas plásticas, reduce de un modo importante la concentración de esfuerzos en la pieza. Por tanto siempre que lo permita la funcionalidad de la pieza, para realizar la transición de una pared a otra se deben utilizar curvas lo más abiertas posibles. Esta idea es utilizada para continuar con la adecuación para manufactura.

- a) La optimización topológica en este trabajo y de manera general, produce estructuras o geometrías “escalonadas”, es decir estructuras en donde existen cambios bruscos de geometría, generando filos en donde la transición debe ser gradual según lo especifican los manuales de inyección de piezas plásticas. En la figura 2.57, se muestran las paredes o superficies que son escalonadas en la estructura óptima en color naranja.

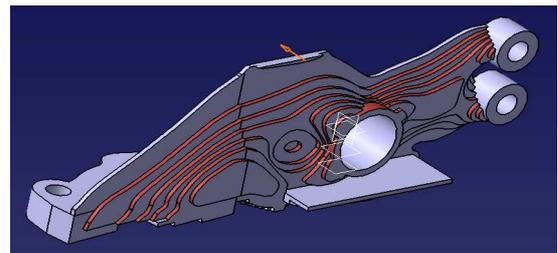


Fig. 2.57. Zonas “escalonadas” en la estructura óptima.

- b) Tras localizar dichos escalones, para realizar una transición suave de material entre pared y pared, lo cual provocará un flujo uniforme y por ende un mejor llenado de la pieza, se utilizan los denominados filetes (fillets), ya que estos proveen radios de gran longitud (o curvas grandes) y permiten suavizar la pieza mediante una transición del material de manera gradual. Los redondeos (fillets) utilizados, dependen del valor del espesor inicial (ver sección 2.4.3.3 de este capítulo), ya que estos proporcionan la longitud del radio apropiada, con base en la distancia entre paredes o alturas de cada escalón existente en la estructura óptima.

$$r_{Escalon} = Espesor\ inicial \dots\dots\dots (2.25)$$



De esta manera en la figura 2.58, se muestra claramente el cambio o transición gradual de material logrado en la estructura óptima tras esta parte de la adecuación, además de una reducción en la concentración de esfuerzo en dichas zonas escalonadas.

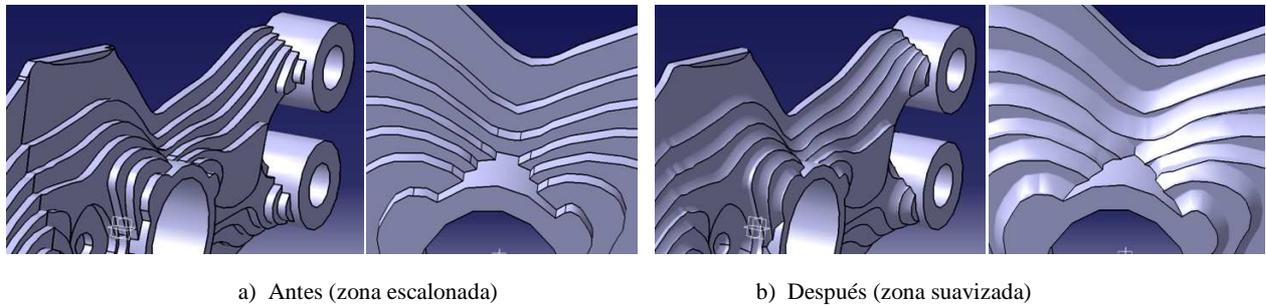


Fig. 2.58. Creación de fillets en la estructura óptima.

- c) Después de lo anterior, se redondea la estructura óptima en las esquinas donde las aristas pueden generar problemas de flujo de material durante la inyección y con ello puedan debilitar la estructura. Dichos redondeos tiene que ver directamente con el espesor de pared de mínimo del material, de esta manera dado que la estructura obtenida es sólida y no de pared delgada, dicha estructura óptima debe cumplir con base en lo recomiendo en los manuales de inyección [5, 10, 19] y como se muestra en la figura 2.59:

$$\left(\frac{1}{3} * e_{\text{pared mínimo}}\right) \leq r_{\text{Aristas}} \geq \left(\frac{1}{3} * e_{\text{pared mínimo}} + e_{\text{pared mínimo}}\right) \dots\dots\dots (2.26)$$

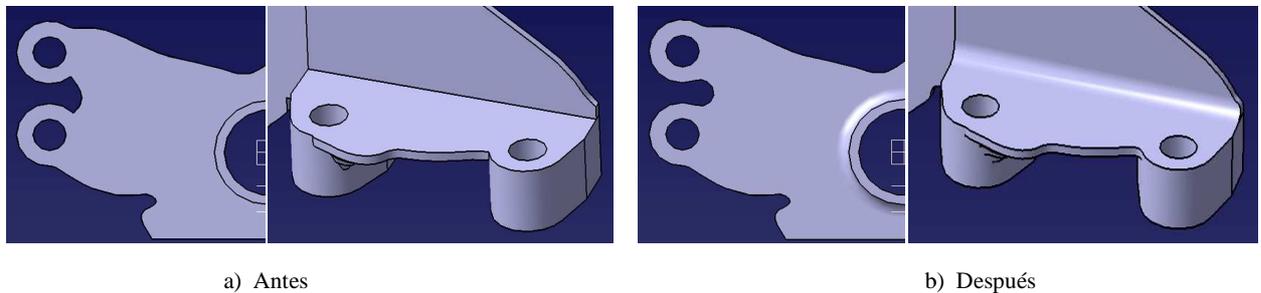


Fig. 2.59. Creación de redondeos en la estructura óptima.

Como se observa en la figura 2.59 y en la Ec. (2.26), el rango de valores que puede tomar el redondeo es muy amplio por lo que, para este caso particular se ha optado por tomar dos valores base, el límite superior e inferior de la Ec. (2.26), como valor de redondeo (radio) según lo requiera y permitan las dimensiones de la estructura óptima. En la figura 2.60, se observan las aristas que han sido redondeadas en la estructura tras esta parte de la adecuación.

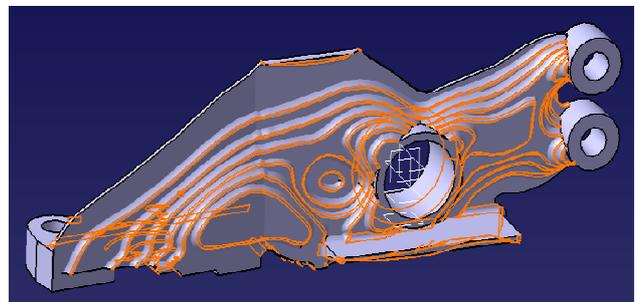


Fig. 2.60. Aristas redondeadas bajo esta idea.



d) Posteriormente, la estructura óptima, tiene que ser sometida nuevamente a un redondeo general de todas las aristas faltantes, es decir lo que los expertos llaman “matar filos”, ya que las aristas no redondeadas hasta este momento, provocan problemas no solo de concentración de esfuerzo, sino también problemas durante la extracción de la pieza del molde. De esta manera se recomienda utilizar un valor de redondeo (radio), muy pequeño, en este caso se utiliza el valor de por lo menos 0.3 [mm] para llevar a cabo esta parte de la adecuación, ello debido a que durante la fabricación del molde es más sencillo utilizar este valor que otros más pequeños donde aumenta tanto el tiempo así como el costo del molde. En la figura 2.61 se muestran en color naranja todas las aristas que deben ser sometidas a este redondeo para quitar lo filos de la estructura óptima.

$$r_{FILOS} \geq 0.3 [mm] \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

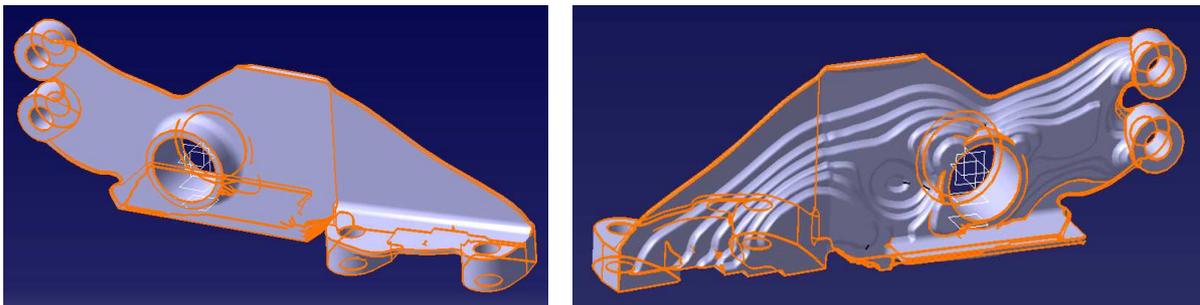


Fig. 2.61. Eliminación de filos de la estructura óptima.

En la figura 2.62 se muestra una imagen de la adecuación de la estructura óptima, bajo la idea del redondeo de la pieza.

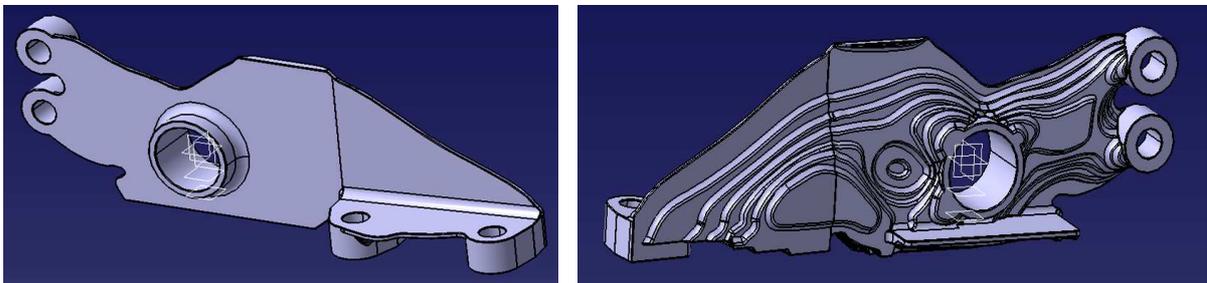


Fig. 2.62. Estructura óptima obtenida tras esta adecuación.

El tomar la decisión de redondear la pieza de la manera presentada, implica que las estructuras óptimas obtenidas serán estructuras que tienen ventajas y desventajas como se muestra en la tabla 2.15.

VENTAJA	DESVENTAJA
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El utilizar radios para redondear la estructura óptima, reduce de manera importante la concentración de esfuerzos en la pieza permitiendo una mayor vida útil de la misma.</li> <li>2. Permite el libre paso del flujo de manera uniforme al reducir aristas con ángulos agudos en la estructura y reduce zonas de estancamiento de material, durante la inyección.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Existe una complejidad importante pensando en una posible programación, al especificar las aristas en las cuales se debe incluir un redondeo con un valor específico.</li> <li>2. En la actualidad el trabajo de redondear una pieza durante el diseño, es prácticamente artesanal. Invirtiendo demasiado tiempo en el proceso que depende directamente de la complejidad de la geometría.</li> </ol>



<p>3. El matar filos de una estructura óptima, implica una reducción de problemas durante la extracción de la pieza del molde y al utilizar valores pequeños aumenta la posibilidad de redondear toda la pieza, de manera sencilla y en dado caso también automática.</p> <p>4. Los redondeos pueden ser introducidos y controlados en un algoritmo computacional, al indicar parámetros tales como el valor del radio, indicado en la zona que se requiera o incluso en toda la estructura en análisis.</p>	
--	--

Tabla 2.15. Ventajas y desventajas respecto de los redondeos en la estructura óptima.

#### 2. 4. 4. 2. 7    **ÁNGULOS DE SALIDA O DESMOLDEO.**

Los ángulos de salida son aplicados a una pieza plástica con el objetivo de facilitar su extracción del molde. El diseñar una pieza sin ángulos de desmoldeo puede además de no permitir la correcta extracción de la pieza, causar problemas en la superficie como: la formación de desgarros de material causados por la fricción entre el metal de la cavidad y el plástico durante el proceso de extracción, entre otros. Es por ello que durante la adecuación para manufactura de la estructura óptima se contemple la posibilidad de anexar dichos ángulos de desmoldeo o extracción, como se muestra a continuación:

- a) Se identifican y seleccionan las superficies de las paredes de la estructura óptima que deben llevar un ángulo de salida, tomando en cuenta la dirección de extracción de la pieza, así como del movimiento de los insertos del molde, que permiten también dicha extracción. Como se observa en la figura 2.63, las superficies en color verde son aquellas paredes que se encuentran en contacto con la cavidad del molde y las superficies en color rojo son las que se relacionan con el inserto del molde. Dichas superficies tienen un ángulo mínimo de  $0.5^\circ$ , según lo recomiendan los manuales de inyección [5, 10, 19].

$$0.5^\circ \leq \alpha_{salida} \leq 5^\circ \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

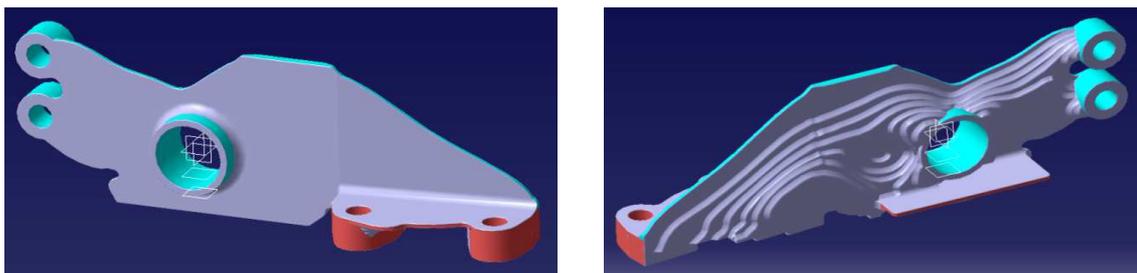


Fig. 2.63. Superficies que deben llevar ángulos de desmoldeo.

En nuestro caso particular se tomo la decisión de asignar un valor de ángulo de salida de 1 grado. Sin embargo en tablas (ver anexo 3) el valor puede ser mayor, dependiendo de la profundidad de la pieza dentro del molde, con lo que aún el valor dado esta dentro de dichos valor en tablas. El tomar la decisión de dar un ángulo de salida a la estructura óptima durante la adecuación, implica que dichas estructuras tienen ventajas y desventajas como se muestra a continuación:



VENTAJA	DESVENTAJA
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Los ángulos de salida permiten una correcta extracción de la pieza del molde.</li> <li>2. El valor del ángulo de 1°, es uno de los más utilizados y recomendados en los manuales de inyección de piezas plásticas, aunque pueden utilizarse otros sin sobrepasar los 5°.</li> <li>3. Los ángulos de desmoldeo pueden ser introducidos en un algoritmo computacional, mediante la asignación directa del valor del ángulo como parámetro.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Existe una complejidad importante pensando en una posible programación, al especificar las superficies o paredes que deben llevar los ángulos de desmoldeo.</li> <li>2. Se debe estimar o conocer la posible dirección de extracción, e incluso la dirección del movimiento de los insertos en caso de existir, para conocer entonces las paredes susceptibles de llevar un ángulo de desmoldeo.</li> </ol>

Tabla 2.16. Ventajas y desventajas respecto de los ángulos de desmoldeo.

#### 2. 4. 4. 2. 8 PUNTO DE INYECCIÓN.

Ubicar un punto por donde el fluido ingresará en la cavidad del molde es de gran importancia no sólo para obtener una buena calidad de la pieza inyectada y posibilitar un llenado adecuado de la misma, sino también para conseguir mejores tiempos de llenado y de este modo reducir los tiempos de fabricación.

Bajo este contexto, se realizó una simulación de análisis de flujo plástico de la estructura óptima, no como una consideración para la adecuación, sino para presentar una posible localización del punto de inyección, de la pieza ya adecuada, y con ello reforzar la metodología de diseño óptimo aquí presentada, ya que este análisis completo está fuera del alcance de este trabajo. Para esto se utilizó el software MOLDFLOW 2011 versión estudiantil, con lo cual se obtuvieron los resultados aquí presentados.

En la siguiente imagen se muestran las regiones donde el programa calcula, se puede ubicar el punto de inyección más factible para lograr el llenado total de la pieza.

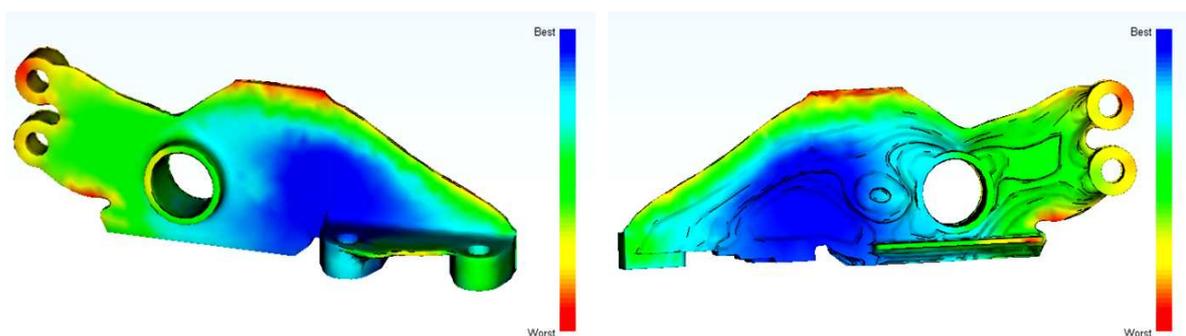


Fig. 2.64. Estimación de zona del mejor punto de inyección según el programa MOLDFLOW 2011.

Con base en lo anterior se decidió aplicar tres puntos de inyección en distintos lugares, para realizar la simulación, logrando obtener los resultados mostrados en la siguiente tabla 2.17:



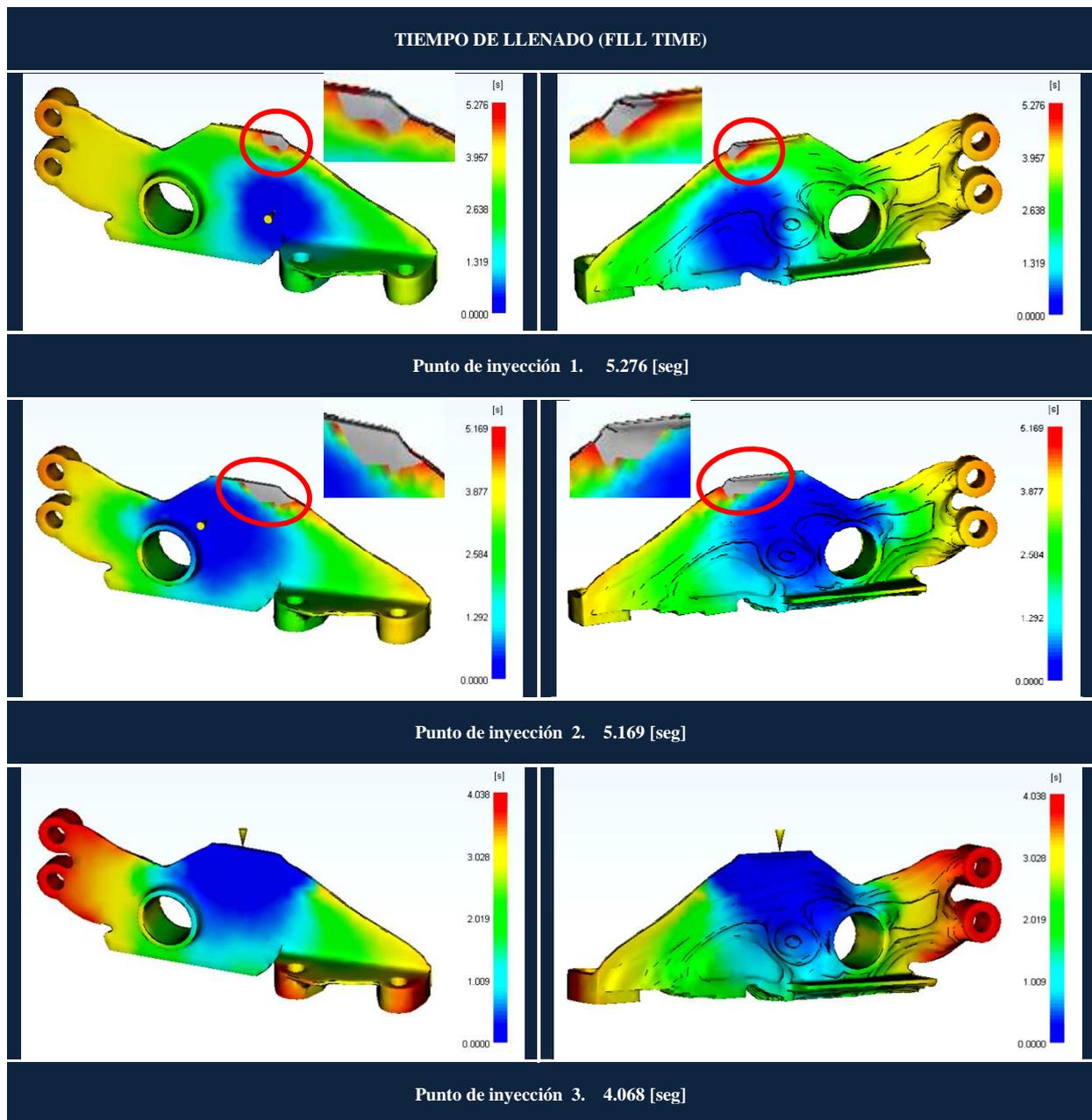


Tabla 2.17. Tiempos de llenado para distintos puntos de inyección en la estructura óptima adecuada. ABS.

Se puede observar que el mejor punto para inyectar es el punto número 3, en el cual se logra además de un llenado total de la pieza, se tiene un reducción del tiempo estimado de llenado, que aunque a simple vista no es mucho, en una posible producción en masa este se vuelve un factor sumamente importante. También este punto permite un autorebabeo durante el proceso de apertura y extracción de la pieza. En el anexo 7, se muestra más a detalle los resultados de la simulación de inyección, obtenidos para el material ABS.



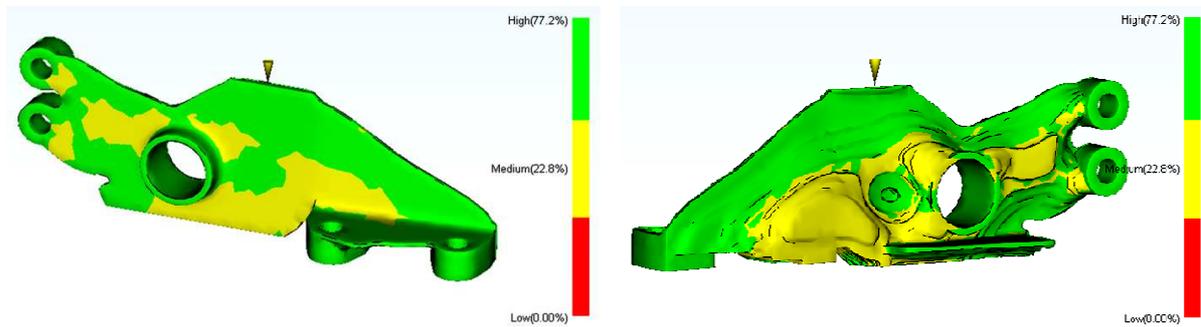


Fig. 2.65. Estimación calidad de la inyección.

Como se puede observar en la figura anterior, con la localización de este punto de inyección se logra tener una estimación de calidad media (22.8 %) y buena (72.2 %), lo cual es requerido durante una simulación de inyección. En la figura 2.66, se muestra que la temperatura es uniforme en toda la pieza, con un valor aproximado de 250 [°c].

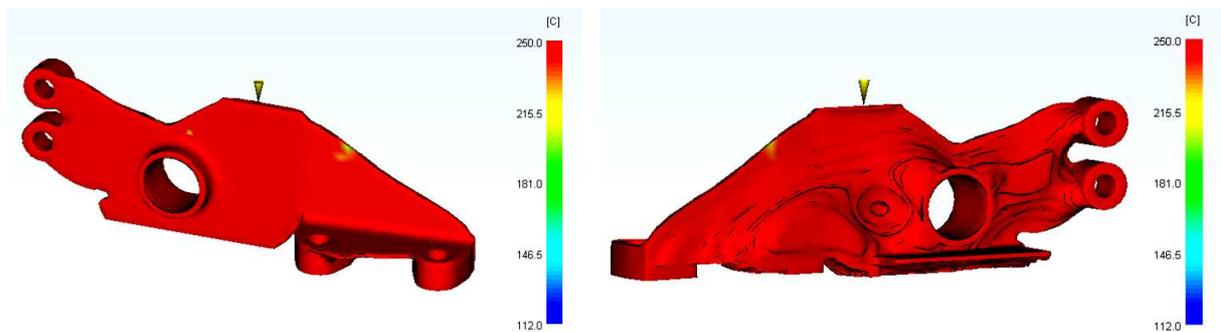


Fig. 2.66. Estimación de temperatura de la estructura óptima.

En la tabla 2.18, se observan algunas ventajas y desventajas del punto propuesto para llevar a cabo la inyección:

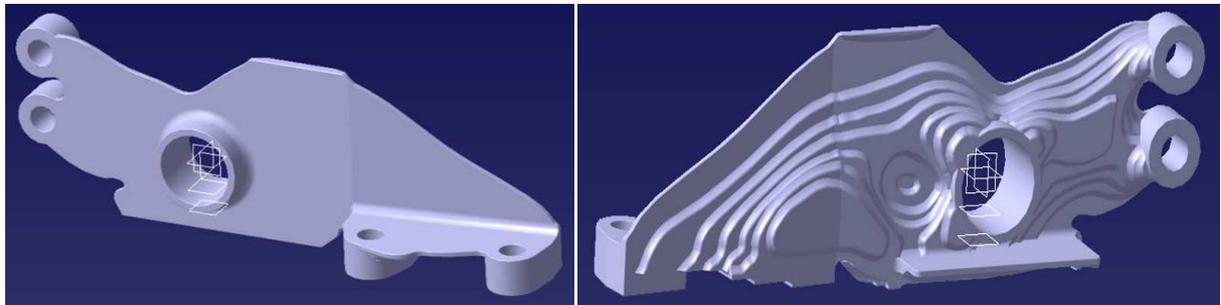
VENTAJA	DESVENTAJA
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Con la selección de este punto, se asegura el llenado de la estructura óptima, en el molde, permitiendo un equilibrio en temperatura, presión y tiempo de llenado de la pieza.</li> <li>2. Con este punto se logra disimular la entrada de flujo, haciendo no tan visible dicha entrada, al extraer la pieza.</li> <li>3. El punto se localiza en una zona donde no se tienen elementos geométricos que obstaculicen el flujo del material permitiendo uniformidad de este.</li> <li>4. Permite obtener una adecuada calidad según la simulación de inyección.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Existe la posibilidad que exista más de un punto de inyección.</li> <li>2. La localización de uno o varios puntos de inyección, se ve afectado en gran medida por la experiencia del diseñador y la geometría de la pieza.</li> <li>3. La integración de la localización de un punto de inyección en un algoritmo de optimización, es compleja, debido a los distintos parámetros de afectación que no solo son geométricos, sino dependen también de la maquinaria a utilizar, y que no se considera en este trabajo.</li> </ol>

Tabla 2.18. Ventajas y desventajas respecto de los ángulos de desmoldeo.



---

A continuación en la figura 2.67 se muestran los resultados obtenidos tras la adecuación para manufactura de una estructura óptima para el material ABS.



a) Isométrico (vista frontal)

b) Isométrico (vista posterior)

Fig. 2.67. Estructura óptima adecuada para manufactura (material ABS).

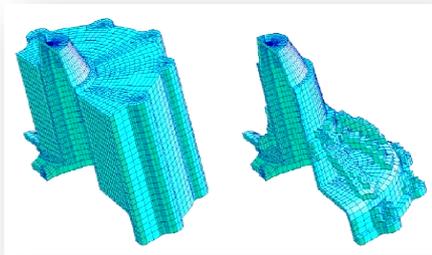
En el capítulo siguiente se muestran los resultados obtenidos mediante el proceso propuesto aplicado a distintos materiales plásticos.



---

## CAPÍTULO 3

# *Resultados del Método de Optimización Estructural para distintos Materiales Plásticos.*



*Tim era tan erudito que podía decir caballo en nueve idiomas,  
y tan ignorante que para cabalgar se compró una vaca.*

Benjamín Franklin.

### 3.1 INTRODUCCIÓN.

En la práctica en el diseño de componentes mecánicos se analizan los aspectos funcionales, se dimensiona y se calculan los esfuerzos debidos a las cargas que soportarán. Además de los aspectos del proceso de manufactura que influyen directamente con la forma última del producto. Debido al requerimiento de respuesta rápida que los mercados exigen, el ingeniero de diseño hoy en día utiliza sistemas computacionales que le permiten analizar eficaz y rápidamente las posibles zonas críticas que presenten las piezas antes que estas sean producidas. Resulta deseable entonces que las piezas sean mejoradas bajo criterios de minimización de esfuerzos y poder así garantizar la vida útil del componente.



Fig. 3.1. Hormigón pre-tensado,  
Placas Alveolares.

Problemas en los que se ha introducido técnicas evolutivas, se dan en el área médica. Las placas de sujeción para injertos, como puede ser: en la columna vertebral, en el fémur, en la cadera, etc., donde se busca que estén bajo un estado mecánico íntimo al hueso, ya que esto promueve una estabilidad más grande y durabilidad de la placa y se reduce entonces el número de cirugías necesarias durante la vida del paciente.

Otro ejemplo es el hormigón. Las placas alveolares pre-tensadas están entre los productos más avanzados en la industria del hormigón prefabricado, en especial en lo que se refiere a su alta calidad y bajo consumo de materiales. Son generalmente, el tipo de forjados prefabricados más utilizados, como se observa en la figura 3.1. Esto se debe a la selección de la altura y capacidad, a su superficie inferior lisa y a su rendimiento estructural.



Estas se utilizan sobre todo en edificios de grandes luces, como edificios de oficinas, hospitales, colegios, centros comerciales, edificios de apartamentos y en las casas por su conveniente precio y su rápida construcción.

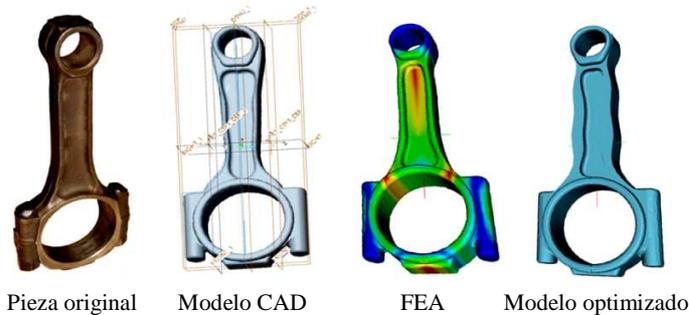


Fig. 3.2. Optimización estructural de una biela [9].

En la industria automotriz desde de los años 90, se dio un aumento en la tendencia hacia resolver problemas mediante técnicas y métodos de optimización en elementos estructurales automotrices. Ya que el reducir peso en la mayoría de los componentes utilizados en automóvil, reducen considerablemente el consumo de energía del mismo. En las siguientes figuras, se muestran ejemplos de elementos automotrices optimizados.

En la figura 3.3, se observan dos ejemplos de elementos optimizados utilizados en la industria automotriz, particularmente por Volkswagen, llegando aun reducción de aproximadamente un 25 % del valor de peso inicial.

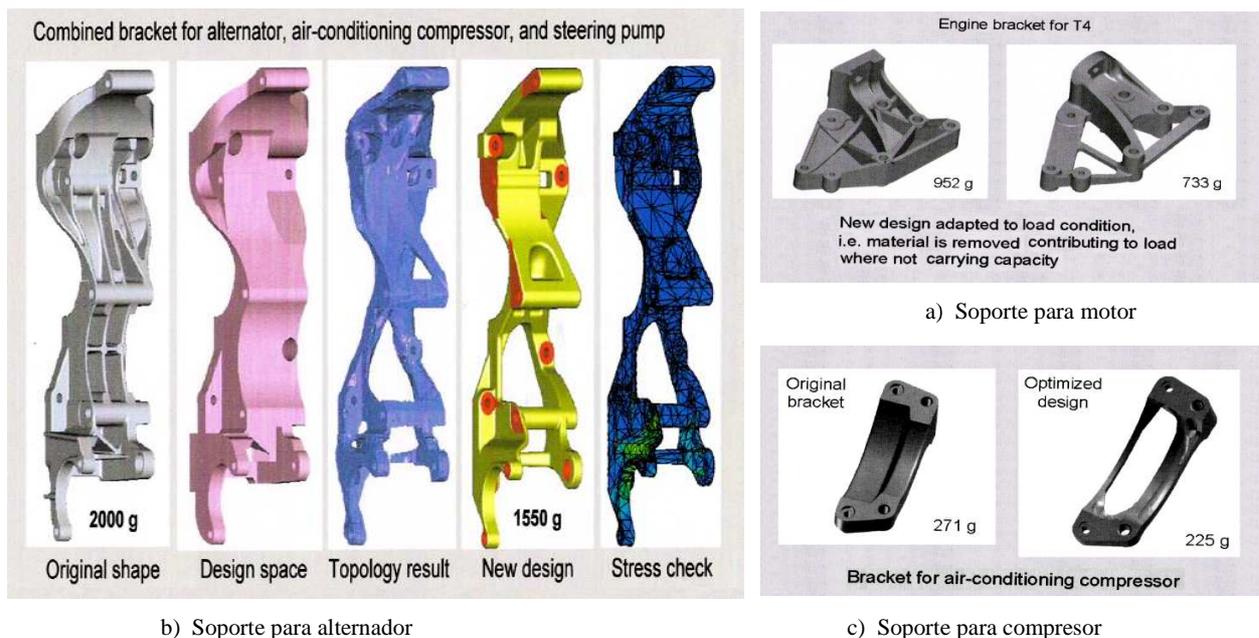


Fig. 3.3. Optimización estructural de un soporte para un compresor de aire acondicionado, Volkswagen 1997 [9].

Este trabajo presenta un método de optimización topológica, para adecuar componentes plásticos ampliamente utilizados en el diseño de maquinas y sistemas mecánicos. Se analiza una geometría bajo condiciones de tensión y/o compresión, por medio de FEA y se encuentra la topología óptima de la estructura, utilizando criterios evolutivos, basados en el rechazo de material, donde la geometría óptima se hace pasar por un tamiz de consideraciones geométricas obtenidas del proceso de inyección de plástico, obteniendo una estructura óptima manufacturable, mejorando la concentración de esfuerzos, así como la disminución de material para su fabricación.



---

## 3.2 RESUMEN DE LAS CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS PARA LA ADECUACIÓN PARA MANUFACTURA.

A continuación se presentan las consideraciones obtenidas en este trabajo para llevar a cabo la adecuación para manufactura de estructuras óptimas, que son realizadas de manera manual, pero pensando en que podrán ser integradas a un algoritmo computacional de manera relativamente sencilla, dando comienzo a una posible construcción de sistema experto y detalladas en el capítulo 2 de este trabajo. Esto se realiza de manera secuencial dentro de la metodología, estableciendo así un flujo de trabajo que puede ser interpretado, en algún momento, dentro de un algoritmo computacional, de la siguiente forma:

### A. MODELADO GEOMÉTRICO.

- a) Se modela la geometría mediante un sistema CAD.
- b) Se simplifica la geometría, para establecer un dominio de diseño.
- c) Se simplifica el dominio de diseño como un Shell (casarón), mediante una superficie media.

### B. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS.

- Se realiza un análisis para encontrar el estado inicial de la pieza original, es decir el sistema de cargas.
- Se aplica el escenario de carga, características del material plástico, etc., al dominio de diseño (superficie media).
- Se especifica durante el pre-proceso de FEM, que el espesor de la superficie media (o espesor inicial), será igual a “n” veces el valor del espesor de pared mínimo del material plástico utilizado (ver D. I. a)).

$$\text{Espesor inicial} = n * \text{Espesor de pared mínimo} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

- Se obtiene la distribución de esfuerzo del dominio inicial para iniciar el proceso de optimización.

### C. OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.

- a) Se establecen los parámetros de optimización, necesarios para iniciar el proceso.
  - i. Variable de diseño, Función objetivo y Restricciones.
- b) Se obtiene una estructura óptima topológica del dominio de diseño, con base en un análisis de densidad de elementos.
- c) Se lleva a cabo la creación de la geometría óptima sólida (3d), exportando los “n” contornos o capas a un sistema CAD, obtenidas con base en el análisis de densidad de elementos (ver D. I. a)).

$$\text{Número de contornos o capas} = n; \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

- d) Se debe tomar en cuenta las superficies que se encuentren en contacto con otros elementos, que sirven como referencia para iniciar un crecimiento direccionado, mediante la asignación de un valor de espesor de cada capa o contorno.



- e) El valor de espesor del n-ésimo contorno será igual a “n” veces el valor del espesor de pared mínimo del material plástico utilizado (ver D. I. a)).

$$\text{Espesor de contorno o capa } (n) = n * \text{Espesor de pared mínimo} \dots\dots\dots (3.3)$$

**D. ADECUACIÓN PARA MANUFACTURA DE LA ESTRUCTURA ÓPTIMA.**

**I. ESPESOR DE PARED.**

- a) Se especifica el espesor de pared mínimo del material plástico ( $e_{\text{mín.}}$ ), y se emplea durante el análisis por elementos finitos del dominio de diseño, la creación de la geometría óptima y como valor de espesor inicial (ver B. c) y C. c), d)).

$$\text{Espesor inicial} \geq (n * e_{\text{mín.}}); \quad n \geq 7 \dots\dots\dots (3.4)$$

**II. AGUJEROS.**

- a) Se identifican zonas donde se localicen agujeros, con base en la pieza original si esta contiene o no tornillería.  
 b) Se genera un cilindro que albergara a cada tornillo en la pieza. El valor del diámetro externo o espesor del cilindro, será por lo menos dos veces el diámetro del tornillo que utiliza la pieza original.

$$\varphi_{\text{Esp}} \geq 2 * \varphi_{\text{Agujero}} \dots\dots\dots (3.5)$$

- c) El valor de altura del cilindro donde se ubica el tornillo, será igual al espesor inicial (ver D. I. a)).

**III. DIRECCIÓN DE DESMOLDEO.**

- a) Se propone una dirección de desmoldeo con base en la dirección de los agujeros, de los posibles insertos y corazones que puede llevar el molde.

**IV. MODIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA ÓPTIMA.**

- a) Se identifican zonas donde puedan existir problemas de llenado, es decir sesgos o puntas en la geometría y se procede a eliminarlas.  
 b) Se lleva a cabo un cambio en cada uno de los contornos obtenidos tras la optimización, uniendo zonas de los contornos que se encuentren desconectadas entre sí, mediante curvas spline y permitiendo cerrar dichos contornos o capas.

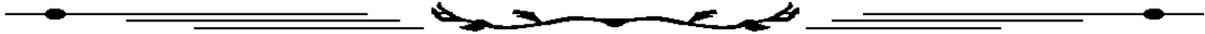
**V. NERVIOS O COSTILLAS.**

- a) Se identifican posibles zonas susceptibles de llevar nervios. Creación del entramado en zonas solidad de la estructura óptima.  
 b) Cada nervio tendrá un espesor o ancho y una altura, que está en función del espesor de pared mínimo del material utilizado.

$$e_{\text{NERVIO}} = e_{\text{pared minimo del material}} \dots\dots\dots (3.6)$$

$$h_{\text{NERVIO}} \geq 3 * e_{\text{pared minimo del material}} \dots\dots\dots (3.7)$$





- c) Partiendo de un punto central localizado en la zona donde se encontraran lo nervios, cada nervio tendrá un ángulo entre uno y otro, comprendido dentro del intervalo siguiente, formando así un entramado de nervios.

$$30^\circ \geq \alpha_{\text{NERVIO}} \geq 45^\circ \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

**VI. REDONDEOS.**

- a) Se identifican las zonas donde las paredes sean del tipo escalonadas. Dichas paredes, sus aristas deberán llevar un radio igual al espesor inicial (ver D. I. a)), provocando un cambio gradual de espesor en la estructura y la desaparición de dichos escalones.

$$r_{\text{Escalon}} = \text{Espesor inicial} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

- b) Se aplican radios o redondeos en aristas donde sea necesario evitar un concentrador de esfuerzo, cuyo valor de radio se encontrará entre el siguiente intervalo y según lo permita la estructura.

$$(1/3 * e_{\text{mín}}) \leq r_{\text{Aristas}} \geq [(1/3 * e_{\text{mín}}) + e_{\text{mín}}] \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

- c) Se aplican radios pequeños para redondear o “matar filos” en la estructura final, tomando como valor mínimo:

$$r_{\text{FILOS}} \geq 0.3 [\text{mm}] \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

**VII. ANGULOS DE DESMOLDEO.**

- a) Se identifican las paredes que son susceptibles de llevar un ángulo de salida o desmoldeo, con base en la dirección de desmoldeo asignada y que se encuentran en contacto con el molde.  
b) Se les asigna un valor de ángulo de salida comprendido entre el intervalo:

$$0.5^\circ \leq \alpha_{\text{salida}} \leq 5^\circ \quad \dots\dots\dots (3.12)$$



### 3.3 RESULTADOS DE OPTIMIZACIÓN Y ADECUACIÓN PARA DISTINTOS MATERIALES.

#### 3.3.1 ACRILONITRILO BUTAIENO ESTIRENO (ABS).

A continuación se muestran los resultados de la adecuación para manufactura, de una estructura óptima topológica, obtenidos al aplicar el material plástico mejor conocido como ABS. Para este caso, la variable de diseño es el volumen de la pieza, como función objetivo es la reducción máxima de volumen, y la restricción es no sobrepasar el valor de esfuerzo de cedencia del material plástico; así como no sobrepasar un factor de seguridad de 1.2, es decir no exceder 38.917 [MPa]. El espesor de pared mínimo del material ABS ( $e_{\min}$ ) es de 1.9 [mm] y su esfuerzo de cedencia ( $\sigma_{ced}$ ) es de 46.7 [MPa]. Como valor de espesor inicial según la Ec. (3.4), se tomó el valor mínimo, es decir  $n = 7$ , lo cual, quiere decir que el espesor inicial será de:

$$\text{Espesor inicial}_{ABS} = (n * e_{\min}) = (7 * 1.9) [mm] = \mathbf{13.3 [mm]} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

En la tabla 3.1, se muestran valores de volumen y esfuerzo obtenidos durante el proceso de optimización, para el ABS, donde se puede observar que en la iteración 5, se llega a una convergencia en el programa utilizado, al ya no poder quitar más material de las estructura, y cumpliendo con el criterio de diseño impuesto además de un factor de seguridad aproximado a 1.2.

MATERIAL		OPTIMIZACIÓN						
	Espesor Inicial	Esfuerzo $\sigma_{ced}$	Iteración	Esfuerzo $\sigma_{inicial}$	Volumen Inicial	Esfuerzo $\sigma_{m\acute{a}x}$	Volumen Final	Factor de seguridad
	[mm]	[MPa]		[MPa]	e+05 [mm <sup>3</sup> ]	[MPa]	e+05 [mm <sup>3</sup> ]	
ABS	13.3	46.7	0	20	2.3601	20	2.3601	2.335
			1	20	2.3601	22.509	1.5147	2.075
			2	20	2.3601	23.153	1.0285	2.017
			3	20	2.3601	25.568	0.7478	1.827
			4	20	2.3601	31.565	0.5629	1.479
			5	20	2.3601	38.321	0.4315	1.219

Tabla 3.1. Datos obtenidos del proceso de optimización topológica para el ABS.

En la siguiente figura, se muestra el análisis de densidad de elementos y la distribución de esfuerzo de la estructura, obtenido en dicha iteración, donde el valor máximo fue de 38.321 [MPa].

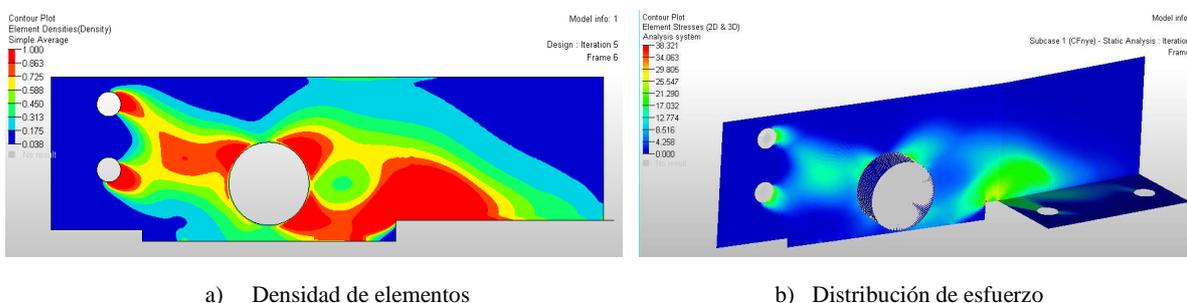


Fig. 3.4. Datos obtenidos del proceso de optimización topológica para el ABS.



Con base en el resultado de esfuerzo y sobretodo del análisis de densidad, se realiza el proceso de creación de la estructura óptima para posteriormente adecuar dicha estructura para manufactura. Con el fin de presentar a detalle el proceso de implementación de la metodología presentada en este trabajo, se utilizó este material (ABS), es por ello que para ver más detalle del proceso de adecuación para este material, ver capítulo 2 sección. 2.4.4.

Con lo que, en la tabla 3.2 se pueden observar distintas imágenes de la estructura optima lograda, después ser sometida al proceso de adecuación para manufactura.

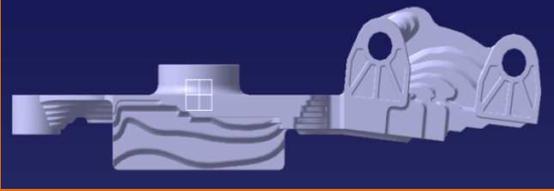
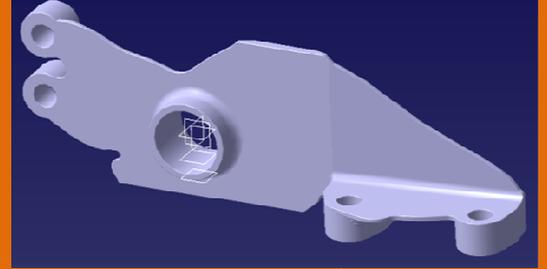
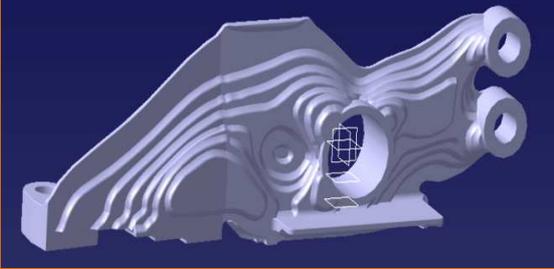
ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO ( ABS )	
VISTA FRONTAL	VISTA POSTERIOR
	
	
	

Tabla 3.2. Estructura óptima adecuada para manufactura, material: ABS.

### 3. 3. 1. 1 GRÁFICOS DE VOLUMEN Y ESFUERZO VS ITERACIÓN.

Con base en el proceso de optimización, aquí se presentan gráficos tanto de volumen, así como de esfuerzo, además de valores numéricos obtenidos después de llevar a cabo la adecuación para manufactura. En la figura 3.5, se muestra el historial de volumen, donde se observa claramente la reducción gradual de volumen, logrado durante el proceso de optimización topológica.



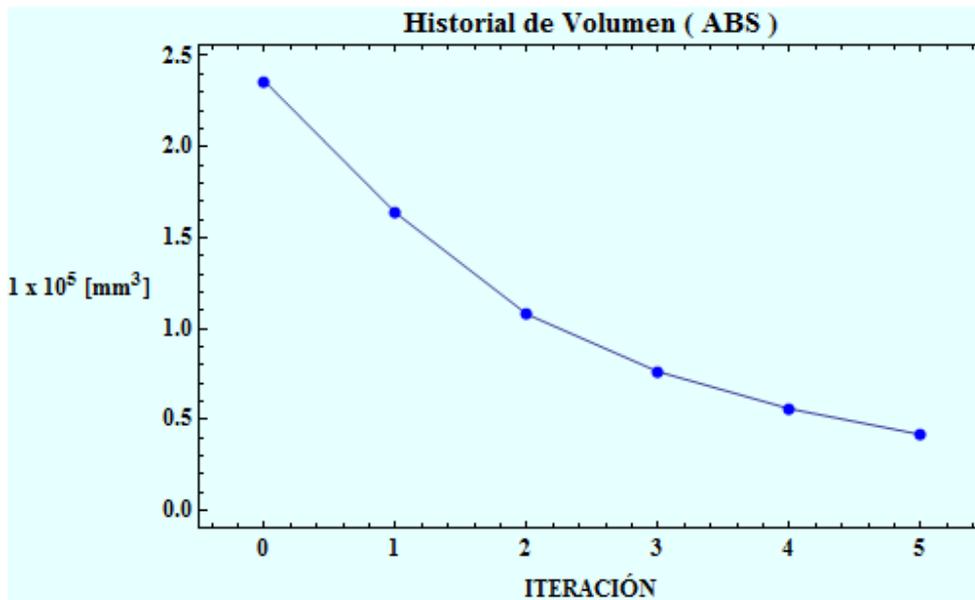


Fig. 3.5. Historial de volumen, material ABS.

De la figura anterior, la tabla 3.1, y de la creación de la estructura óptima (ver capítulo 2), así como también del espesor inicial, se obtiene un valor de volumen inicial de  $2.3601 \times 10^5 \text{ [mm}^3\text{]}$  y un valor final de volumen de  $0.7388985 \times 10^5 \text{ [mm}^3\text{]}$ . Con dichos valores se puede obtener el porcentaje de reducción de volumen de la estructura óptima antes del proceso de adecuación para manufactura, el cual es calculado como:

$$\% \text{ Red. VOLUMEN} = \left( \frac{VOL_{INICIAL} - VOL_{FINAL}}{VOL_{INICIAL}} \right) * 100 \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

$$= \left( \frac{236010.00 \text{ [mm}^3\text{]} - 73889.85 \text{ [mm}^3\text{]}}{236010.00 \text{ [mm}^3\text{]}} \right) * 100 = \mathbf{68.69 \%} \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

Después de sufrir la adecuación, se obtuvo una estructura cuyo valor de volumen final fue de  $0.85258 \times 10^5 \text{ [mm}^3\text{]}$ . Al utilizar la Ec. (3.14), se obtiene el siguiente valor de reducción de volumen, el cual será el valor total de reducción de la estructura óptima manufacturable.

$$\% \text{ Red. VOL}_{TOTAL} = \left( \frac{236010.00 \text{ [mm}^3\text{]} - 85258.02 \text{ [mm}^3\text{]}}{236010.00 \text{ [mm}^3\text{]}} \right) * 100 = \mathbf{63.88 \%} \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

Como se puede ver, la diferencia entre el porcentaje de volumen reducido antes y después del proceso de adecuación para manufactura es de aproximadamente **4.82 %**. Este resultado tiene que ver que, durante la adecuación, se realiza un aumento de volumen en ciertas zonas de la estructura, sin embargo este pequeño aumento no tiene un gran impacto en la disminución total de volumen de la estructura óptima, dado que, lo que se pretende es quitar la mayor cantidad de material posible y que además se pueda manufacturar.

Por otra parte, en la figura 3.6 se muestra el historial de esfuerzo, donde se observa claramente el aumento del nivel en la estructura, calculado en cada iteración por el software durante el proceso de optimización topológica. Así mismo en dicha imagen se puede ver, en un color verde, un pequeño espacio, el cual es indicativo del factor de seguridad impuesto para este material.



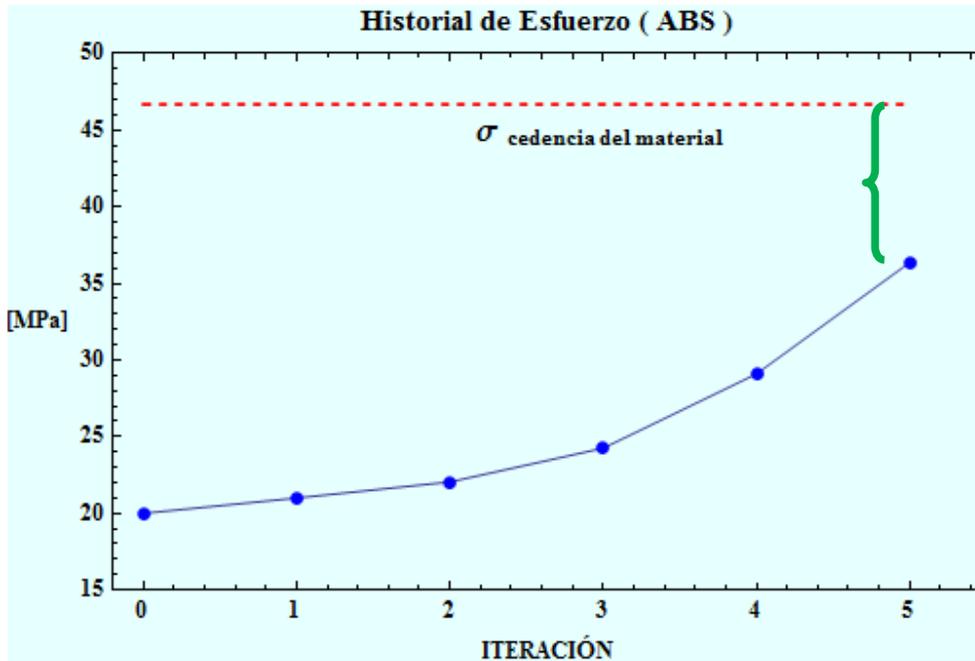


Fig. 3.6. Historial de esfuerzo, material ABS.

Así mismo, al igual que el volumen, se obtiene un valor de esfuerzo inicial de 20 [MPa] y un valor final de 38.321 [MPa]. Con dichos valores se puede obtener el porcentaje de aumento de esfuerzo de la estructura óptima antes del proceso de adecuación para manufactura, el cual es calculado como:

$$\% \text{ Aum. de ESFUERZO} = \left( \frac{\sigma_{FINAL} - \sigma_{INICIAL}}{\sigma_{INICIAL}} \right) * 100 \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

$$= \left( \frac{38.321 \text{ [MPa]} - 20.00 \text{ [MPa]}}{20.00 \text{ [MPa]}} \right) * 100 = \mathbf{91.61 \%} \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

Este aumento es lógico debido a que, se está removiendo o eliminando material de la estructura, durante la optimización topológica. En la tabla 3.3, se muestra la distribución de esfuerzo lograda en la estructura óptima tras el proceso de adecuación para manufactura.

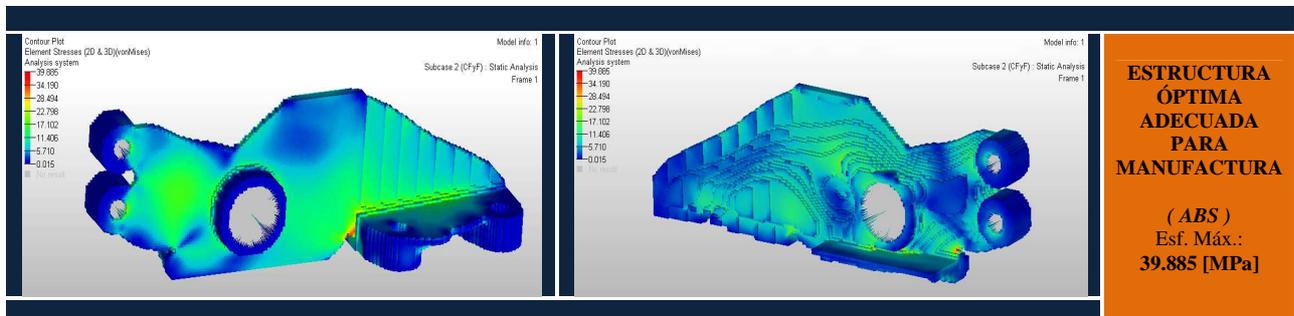


Tabla 3.3. Distribución de esfuerzo en la pieza original y la adecuada para manufactura, ABS.



Al someter la estructura óptima al proceso de adecuación para manufactura, se obtiene una estructura cuyo valor de esfuerzo máximo final fue de 39.885 [MPa], como se ve en la tabla anterior. Siguiendo la Ec. 2.18, sobre el factor de seguridad, y aplicándola para el resultado adecuado para manufactura de este material, se tiene:

$$FS_{ABS} = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{max\ ABS}} = \frac{46.7 [MPa]}{39.885 [MPa]} = 1.1709 \approx 1.17 \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

Como se puede observar el valor del factor de seguridad final obtenido fue de 1.17, aunque el obtenido para la estructura óptima topológica fue de 1.219, dicho factor después del proceso de adecuación, sigue estando cercano a la restricción establecida desde un inicio, 1.2, con lo cual se establece que el proceso de adecuación no tiene un gran impacto en la estructura final, si se tiene en cuenta que se por un lado se añade material y por otro se lleva a cabo una modificación de la forma, llevando la estructura al límite.

### 3.3.2 POLICARBONATO (PC).

Se muestran resultados de adecuación para manufactura, de una estructura óptima topológica, obtenidos al aplicar el material plástico llamado Policarbonato. Para este caso la variable de diseño es el volumen de la pieza, como función objetivo es la reducción máxima de volumen, y la restricción es no sobrepasar el valor de esfuerzo de cedencia del material plástico, así como no sobrepasar un factor de seguridad de 1.2, es decir no exceder el valor de 60.167 [MPa]. El espesor mínimo del material PC ( $e_{min}$ ) es de 1.8 [mm] y su esfuerzo de cedencia ( $\sigma_{ced}$ ) es de 72.2 [MPa]. Como valor de espesor inicial según la Ec. (3.4), se tomó el valor mínimo, es decir  $n = 7$ , lo cual quiere decir que el espesor inicial será de:

$$Espesor\ inicial_{PC} = (n * e_{min}) = (7 * 1.8) [mm] = 12.6 [mm] \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

A continuación en la tabla 3.4, se muestran valores de volumen y esfuerzo obtenidos durante el proceso de optimización, para el policarbonato, en la cual se puede observar que en la iteración 6, se cumple con el criterio de diseño impuesto, y las restricciones impuestas, llegando así a una convergencia numérica por parte del software utilizado.

MATERIAL	OPTIMIZACIÓN							
	Espesor Inicial [mm]	Esfuerzo $\sigma_{ced}$ [MPa]	Iteración	Esfuerzo $\sigma_{inicial}$ [MPa]	Volumen Inicial e+04 [mm <sup>3</sup> ]	Esfuerzo $\sigma_{máx}$ [MPa]	Volumen Final e+04 [mm <sup>3</sup> ]	Factor de seguridad
PC	12.6	72.2	0	22.481	22.359	22.481	22.359	3.212
			1	22.481	22.359	24.487	14.362	2.949
			2	22.481	22.359	26.520	9.762	2.723
			3	22.481	22.359	28.377	7.098	2.544
			4	22.481	22.359	34.052	5.338	2.120
			5	22.481	22.359	43.587	4.088	1.657
			6	22.481	22.359	60.126	3.159	1.201

Tabla 3.4. Datos obtenidos del proceso de optimización topológica para el Policarbonato.

En la siguiente tabla 3.5, se muestra el historial de evolución de la estructura óptima, mediante análisis de densidad de elementos, para este material, donde la escala de densidades, se encuentra en el intervalo entre 1 y 0.



Así el valor de densidad 1 es tener el espesor inicial y 0 es no tener densidad, por tanto dicho elemento con ese valor se elimina de la estructura.

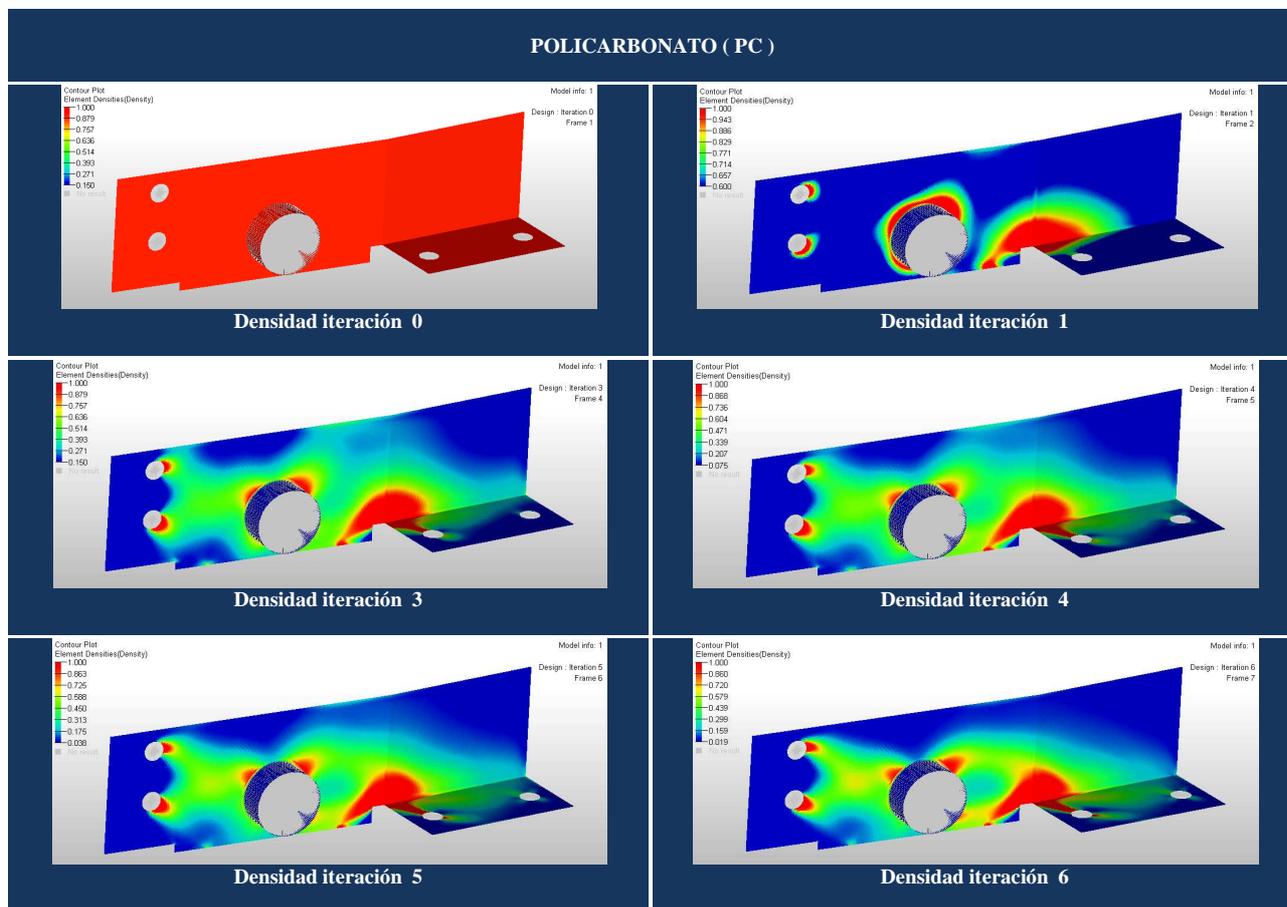


Tabla 3.5. Historial de evolución de densidad de elementos para el Policarbonato.

A continuación se muestra una breve comparación entre la distribución de esfuerzo inicial y la distribución de esfuerzo de la estructura óptima obtenida en la iteración 6.

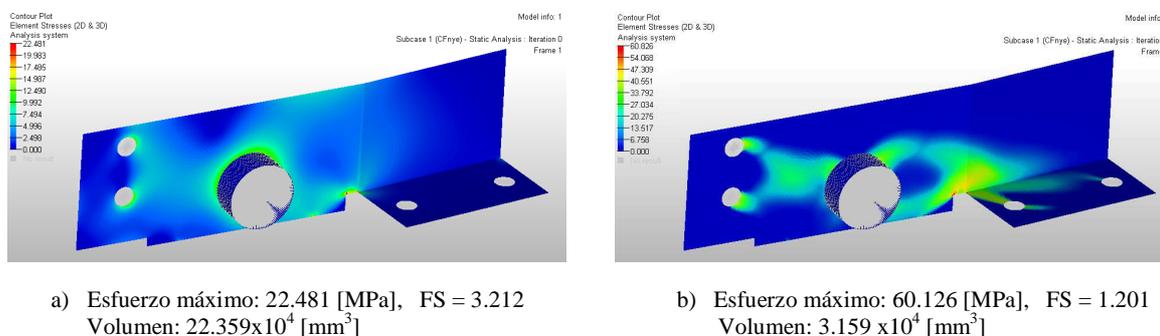


Fig. 3.7. Distribución de esfuerzo: a) inicial y b) final (iteración 6).



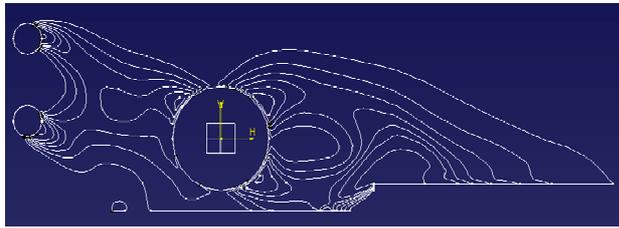


Fig. 3.8. Contornos o capas generadas.

Con base en lo anterior, y en el análisis de densidad de elementos para la iteración 6, en la figura 3.8 se muestran las capas o contornos generados para este material (PC), que sirven para construir la geometría óptima. Al proceder con dicha construcción tomando en cuenta las superficies que están en contacto con otros elementos (ver el capítulo 2, sección 2.4.3.2). En la figura 3.9 se muestra la estructura óptima creada al final del proceso de optimización topológica y con base en los contornos.

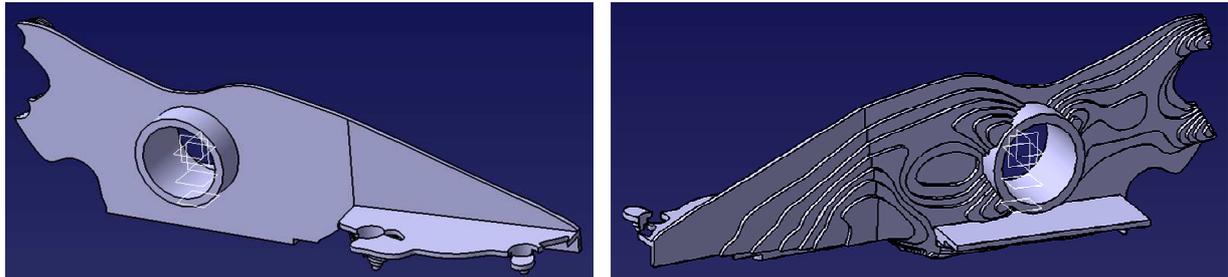


Fig. 3.9. Estructura óptima no adecuada, de Policarbonato.

Al tener la estructura óptima, esta se pasa por un tamiz de consideraciones geométricas para lograr la adecuación para manufactura de dicha estructura (sección. 3.2 de este capítulo). Con lo que, en la tabla 3.6 se puede observar distintas imágenes de la estructura óptima después ser sometida al proceso de adecuación.

POLICARBONATO ( PC )	
VISTA FRONTAL	VISTA POSTERIOR
	
	



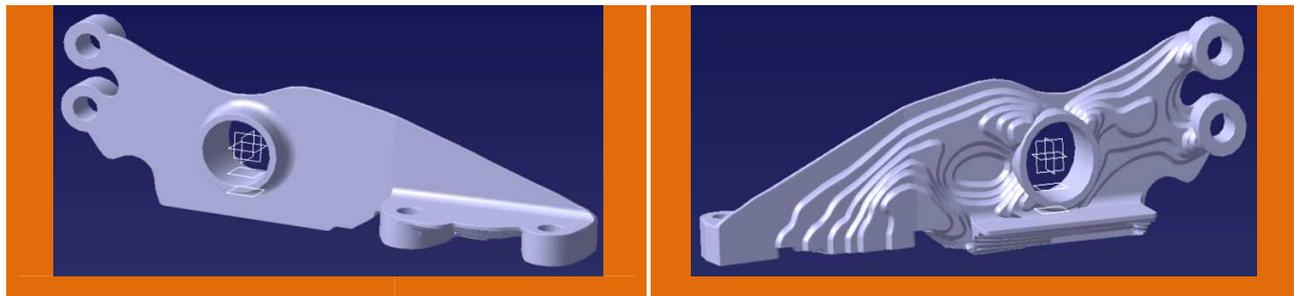


Tabla 3.6. Historial de evolución de densidad de elementos para el Policarbonato.

### 3.3.2.1 GRÁFICOS DE VOLUMEN Y ESFUERZO VS ITERACIÓN.

Con base en el proceso de optimización, aquí se presentan gráficos tanto de volumen, así como de esfuerzo, además de valores numéricos obtenidos después de llevar a cabo la adecuación para manufactura. En la figura 3.10, se muestra el historial de volumen, para el material policarbonato, donde se observa claramente la reducción gradual de volumen, logrado durante el proceso de optimización topológica.

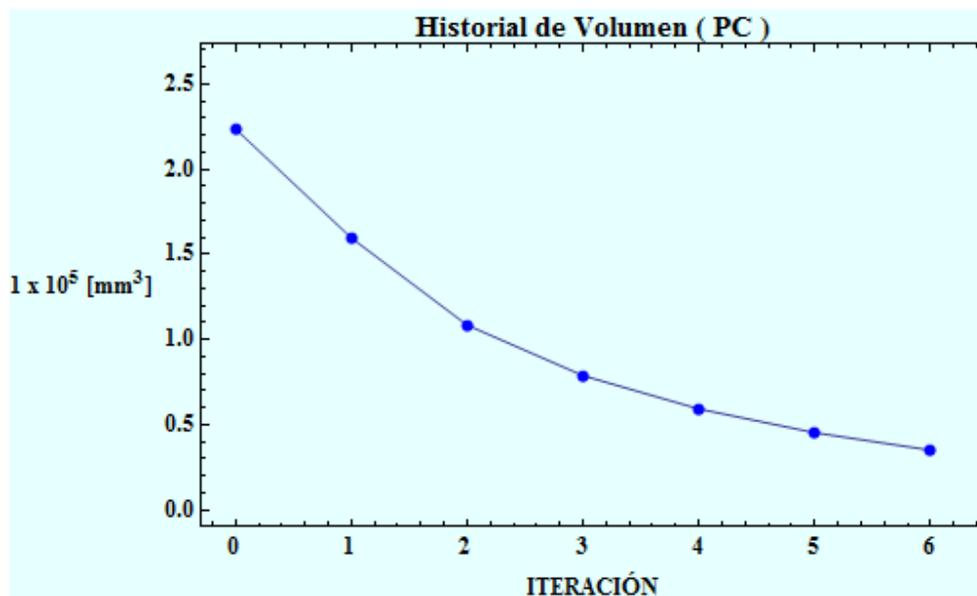


Fig. 3.10. Historial de volumen, material Policarbonato.

Después de llevar a cabo la creación de la estructura óptima, y con base en el espesor inicial para este material, se obtiene un valor de volumen inicial de  $22.3359 \times 10^4$  [mm<sup>3</sup>] y un valor final de  $5.36585 \times 10^4$  [mm<sup>3</sup>]. Con dichos valores se puede obtener el porcentaje de reducción de volumen de la estructura óptima antes del proceso de adecuación para manufactura, el cual es calculado según la Ec. (3.14):

$$\% \text{ Red. VOL} = \left( \frac{223359.00 \text{ [mm}^3\text{]} - 53658.55 \text{ [mm}^3\text{]}}{223359.00 \text{ [mm}^3\text{]}} \right) * 100 = 76.002 \% \quad \dots\dots (3.21)$$



Después de llevar a cabo la adecuación para manufactura, se obtuvo una estructura cuyo valor de volumen final fue de  $8.5258 \times 10^4$  [mm<sup>3</sup>]. Al utilizar la Ec. (3.14), se obtiene el siguiente valor de reducción de volumen, el cual será el valor total de reducción de la estructura óptima manufacturable.

$$\% \text{ Red. } VOL_{TOTAL} = \left( \frac{223359.00 \text{ [mm}^3\text{]} - 65699.33 \text{ [mm}^3\text{]}}{223359.00 \text{ [mm}^3\text{]}} \right) * 100 = \mathbf{70.62 \%} \quad \dots\dots\dots (3.22)$$

Como se puede ver, la diferencia entre el porcentaje de volumen reducido antes y después del proceso de adecuación para manufactura es de aproximadamente **5.39 %**. Este resultado tiene que ver que, durante la adecuación, se realiza un aumento de volumen en ciertas zonas de la estructura, sin embargo este pequeño aumento no tiene un gran impacto en la disminución total de volumen de la estructura óptima, dado que, lo que se pretende es quitar la mayor cantidad de material posible.

Por otra parte, en la figura 3.11 se muestra el historial de esfuerzo, donde se observa claramente el aumento del nivel de esfuerzo en la estructura óptima, durante el proceso de optimización topológica. Así mismo en dicha imagen se puede ver, en un color verde, un pequeño espacio, el cual es indicativo del factor de seguridad impuesto para este material.

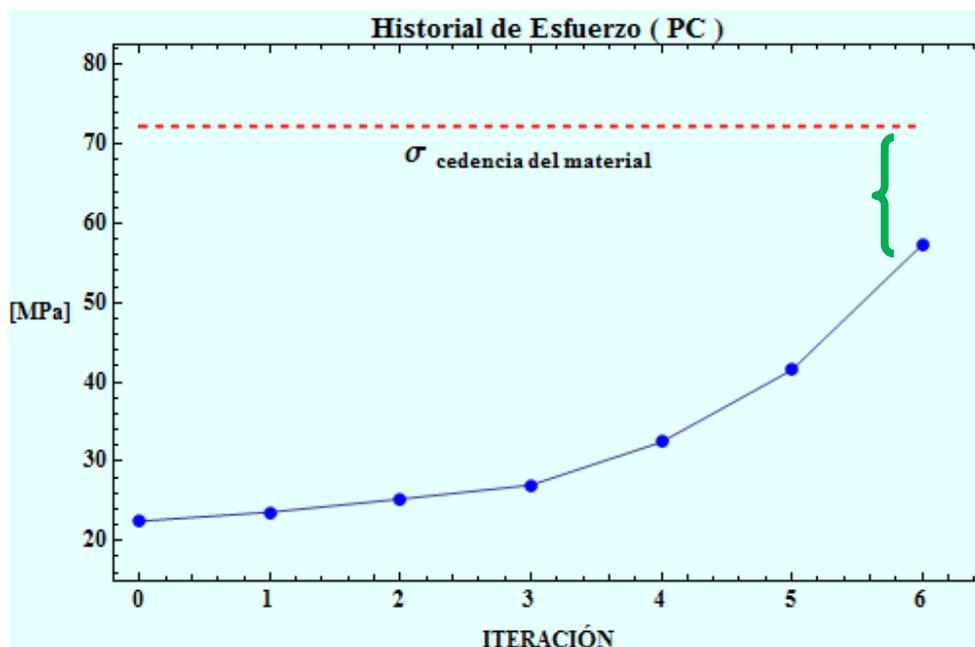


Fig. 3.11. Historial de esfuerzo, material Policarbonato.

Así mismo, al igual que el volumen, se obtiene un valor de esfuerzo inicial de 22.481 [MPa] y un valor final de 60.126 [MPa]. Con dichos valores se puede obtener el porcentaje de aumento de esfuerzo de la estructura óptima antes del proceso de adecuación para manufactura, el cual es calculado según la Ec. (3.17):

$$\% \text{ Aum. } ESF. = \left( \frac{60.126 \text{ [MPa]} - 22.481 \text{ [MPa]}}{22.481 \text{ [MPa]}} \right) * 100 = \mathbf{160.74\%} \quad \dots\dots\dots (3.23)$$



Este aumento es lógico debido a que se está haciendo un proceso de remoción o eliminación de material de la estructura, durante el proceso de optimización topológica. En la tabla 3.7, se muestra la distribución de esfuerzo lograda en la estructura óptima tras el proceso de adecuación para manufactura.

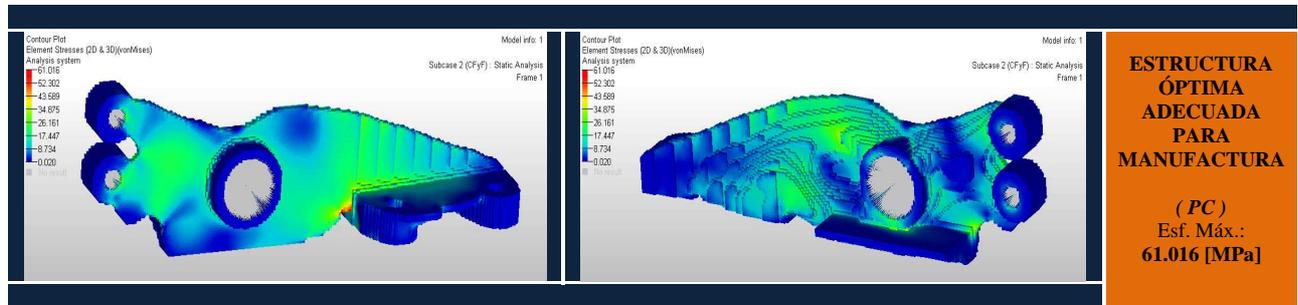


Tabla 3.7. Distribución de esfuerzo en la pieza original y la adecuada para manufactura, Policarbonato.

Al someter la estructura óptima al proceso de adecuación para manufactura, se obtiene una estructura cuyo valor de esfuerzo máximo final fue de 61.016 [MPa], como se ve en la tabla anterior. Siguiendo la Ec. 2.18, sobre el factor de seguridad, y aplicándola para el resultado adecuado para manufactura de este material, se tiene:

$$FS_{PC} = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{max PC}} = \frac{72.2 [MPa]}{61.016 [MPa]} = 1.1833 \approx 1.18 \quad \dots\dots\dots (3.24)$$

Como se puede observar el valor del factor de seguridad obtenido fue de 1.18, aunque el obtenido para la estructura óptima fue de 1.201, dicho factor después del proceso de adecuación, sigue estando cercano a la restricción establecida desde un inicio, 1.2, con lo cual se establece que el proceso de adecuación no tiene un gran impacto en la estructura final, si se tiene en cuenta que se por un lado se añade material y por otro se lleva a cabo una modificación de la forma que lleva la estructura al límite.

### 3.3.3 POLIAMIDA 6,6 (PA 6,6 o NYLON 6,6).

A continuación se muestran los resultados de la adecuación para manufactura, de la estructura óptima topológica, obtenidos con la aplicación del material plástico llamado Poliamida 6,6 y mejor conocido como NYLON 6,6. Para este caso la variable de diseño es el volumen de la pieza, como función objetivo es la reducción máxima de volumen, y la restricción es no sobrepasar el valor de esfuerzo de cedencia del material plástico, así como no sobrepasar un factor de seguridad de 1.2, es decir que no exceda un valor de 51.5 [MPa]. El espesor mínimo del material PA 6,6 ( $e_{\min}$ ) es de 1.5 [mm] y su esfuerzo de cedencia ( $\sigma_{ced}$ ) es de 61.8 [MPa]. Como valor de espesor inicial según la Ec. (3.4), se tomó  $n = 8$ , es decir que el espesor inicial será de:

$$Espesor\ inicial_{PA66} = (n * e_{\min}) = (8 * 1.5) [mm] = 12 [mm] \quad \dots\dots\dots (3.25)$$

A continuación en la tabla 3.8, se muestran valores de volumen y esfuerzo obtenidos durante el proceso de optimización, para el policarbonato, en la cual se puede observar que en la iteración 5, se cumple con el criterio de diseño impuesto, y las restricciones impuestas, llegando así a una convergencia numérica por parte del software utilizado.



**MATERIAL**

**OPTIMIZACIÓN**

	Espesor Inicial [mm]	Esfuerzo $\sigma_{ced}$ [MPa]	Iteración	Esfuerzo $\sigma_{inicial}$ [MPa]	Volumen Inicial e+04 [mm <sup>3</sup> ]	Esfuerzo $\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	Volumen Final e+04 [mm <sup>3</sup> ]	Factor de seguridad
<b>PA 6,6</b>	12.0	61.8	0	23.901	21.294	23.901	21.294	2.586
			1	23.901	21.294	26.351	13.700	2.345
			2	23.901	21.294	28.986	9.331	2.132
			3	23.901	21.294	31.885	6.786	1.938
			4	23.901	21.294	38.261	5.098	1.615
			5	<b>23.901</b>	<b>21.294</b>	<b>47.648</b>	<b>4.054</b>	<b>1.297</b>

Tabla 3.8. Datos obtenidos del proceso de optimización topológica para la Poliamida.

En la siguiente tabla, se muestra el historial de evolución de la estructura óptima, mediante análisis de densidad de elementos, para este material, donde la escala de densidades, se encuentra en el intervalo entre 1 y 0. Así el valor de densidad 1 es tener el espesor inicial y 0 es no tener densidad, por tanto dicho elemento con ese valor se elimina de la estructura.

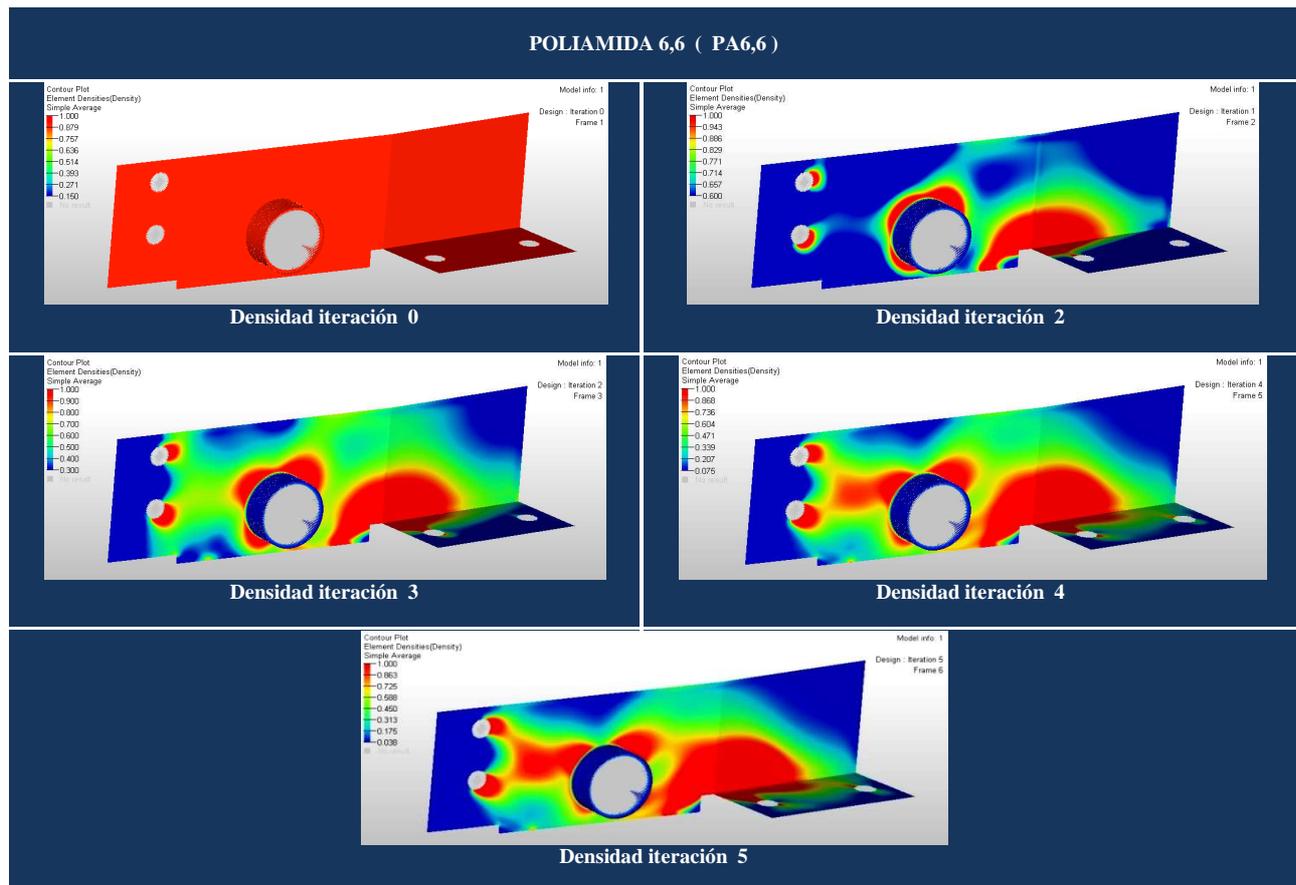
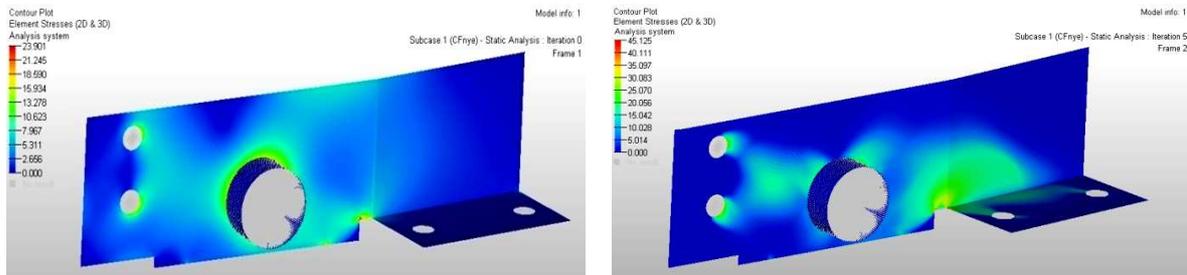


Tabla 3.9. Historial de evolución de densidad de elementos para Poliamida 6,6.



A continuación se muestra una breve comparación entre la distribución de esfuerzo inicial y la distribución de esfuerzo de la estructura óptima obtenida en la iteración 5.



a) Esfuerzo máximo: 23.901 [MPa], FS = 2.586  
Volumen:  $21.294 \times 10^4$  [mm<sup>3</sup>]

b) Esfuerzo máximo: 47.648 [MPa], FS = 1.297  
Volumen:  $4.054 \times 10^4$  [mm<sup>3</sup>]

Fig. 3.12. Distribución de esfuerzo: a) inicial y b) final (iteración 5).

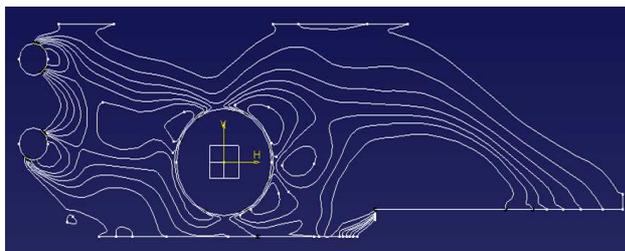


Fig. 3.13. Contornos o capas generadas.

Con base en lo anterior, y en el análisis de densidad de elementos para la iteración 6, en la figura 3.13 se muestran los contornos generados para este material (PA6,6), que sirven para construir la geometría óptima. Al proceder con dicha construcción tomando en cuenta las superficies que están en contacto con otros elementos (ver el capítulo 2, sección 2.4.3.2). En la figura 3.14 se muestra la estructura óptima creada al final del proceso de optimización topológica y con base en los contornos.

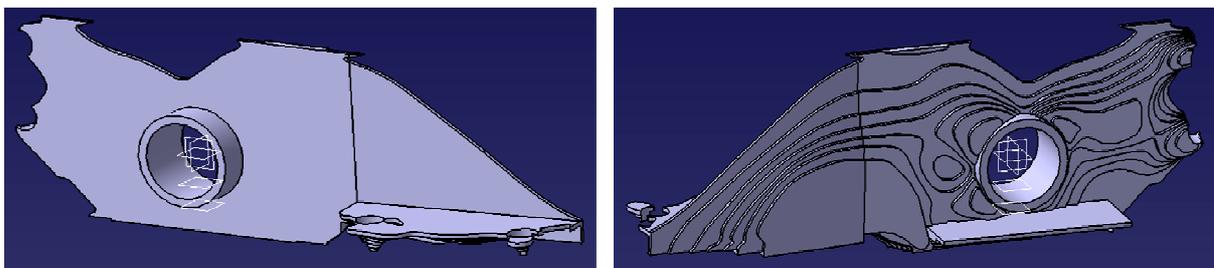


Fig. 3.14. Estructura óptima no adecuada, de Poliamida 6,6.

Al tener la estructura óptima, esta se pasa por un tamiz de consideraciones geométricas para lograr la adecuación para manufactura de dicha estructura (ver capítulo 2 sección. 2.4.4). Con lo que, en la tabla 3.10 se puede observar distintas imágenes de la estructura óptima después ser sometida al proceso de adecuación.





Tabla 3.10. Historial de evolución de densidad de elementos para el Poliamida 6,6.

### 3.3.3.1 GRÁFICOS DE VOLUMEN Y ESFUERZO VS ITERACIÓN.

Con base en el proceso de optimización, aquí se presentan gráficos de volumen y esfuerzo, además de valores numéricos obtenidos después de llevar a cabo la adecuación para manufactura de la estructura óptima. En la figura 3.15, se muestra el historial de volumen para una poliamida 6,6, donde se observa claramente la reducción gradual de volumen, durante la optimización topológica.

Con base en la figura 3.15, la tabla 3.8, la creación de la estructura óptima y el espesor inicial para este material, se obtiene un valor de volumen inicial de  $21.294 \times 10^4$  [mm<sup>3</sup>] y un valor final de volumen de  $6.938263 \times 10^4$  [mm<sup>3</sup>]. Con dichos valores se puede obtener el porcentaje de reducción de volumen en la estructura óptima antes del proceso de adecuación para manufactura, el cual es calculado según la Ec. (3.14):

$$\% \text{ Red. VOL} = \left( \frac{212940.00 \text{ [mm}^3\text{]} - 69382.63 \text{ [mm}^3\text{]}}{212940.00 \text{ [mm}^3\text{]}} \right) * 100 = \mathbf{67.42 \%} \quad \dots\dots\dots (3.26)$$



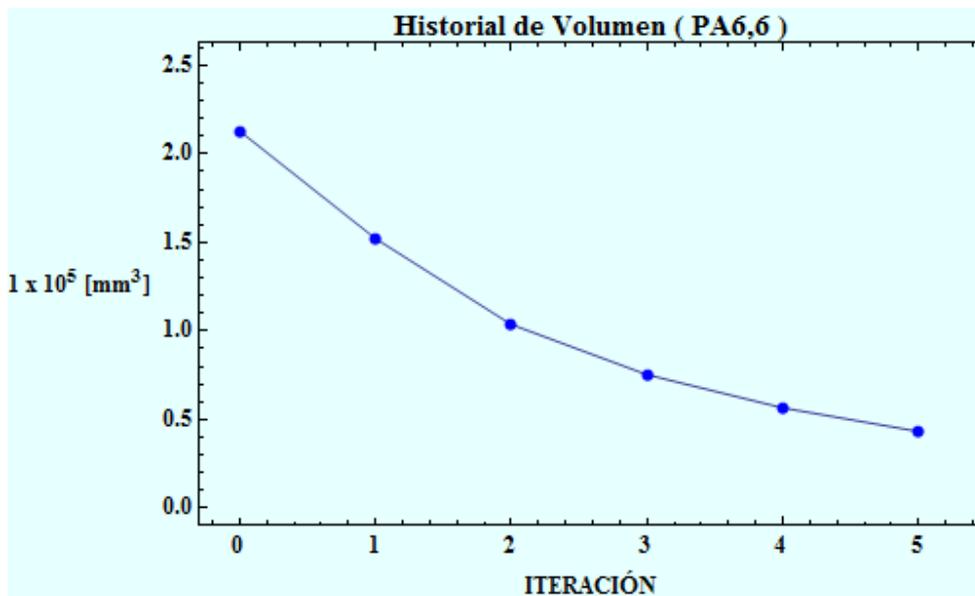


Fig. 3.15. Historial de volumen, material Poliamida 6,6.

Después de sufrir la adecuación para manufactura, se obtuvo una estructura cuyo valor de volumen final fue de  $7.7260 \times 10^4 \text{ [mm}^3\text{]}$ . Al utilizar la Ec. (3.15), se obtiene el siguiente valor de reducción de volumen, el cual será el valor total de reducción de la estructura óptimo-manufacturable.

$$\% \text{ Red. } VOL_{TOTAL} = \left( \frac{212940 \text{ [mm}^3\text{]} - 77260 \text{ [mm}^3\text{]}}{212940 \text{ [mm}^3\text{]}} \right) * 100 = \mathbf{63.72 \%} \quad \dots\dots\dots (3.27)$$

Como se puede ver, la diferencia entre el porcentaje de volumen reducido antes y después del proceso de adecuación para manufactura es de aproximadamente **3.69 %**. Este resultado tiene que ver que durante la adecuación, se realiza un aumento de volumen en ciertas zonas de la estructura, que no tiene gran impacto en la disminución total de volumen de la estructura óptima.

Por otra parte, en la figura 3.16 se muestra el historial de esfuerzo, donde se observa claramente el aumento del nivel de esfuerzo en la estructura óptima, durante el proceso de optimización topológica. Así mismo en dicha imagen se puede ver, un pequeño espacio entre el último valor de esfuerzo y la línea del esfuerzo de cedencia del material, el cual es indicativo del factor de seguridad impuesto para este material.

Así mismo, al igual que el volumen, se obtiene un valor de esfuerzo inicial de  $23.901 \text{ [MPa]}$  y un valor final de  $47.648 \text{ [MPa]}$ . Con dichos valores se puede obtener el porcentaje de aumento de esfuerzo de la estructura óptima antes del proceso de adecuación para manufactura, el cual es calculado según la Ec. (3.17):

$$\% \text{ Aum. } ESF. = \left( \frac{47.648 \text{ [MPa]} - 23.901 \text{ [MPa]}}{23.901 \text{ [MPa]}} \right) * 100 = \mathbf{99.36 \%} \quad \dots\dots\dots (3.28)$$



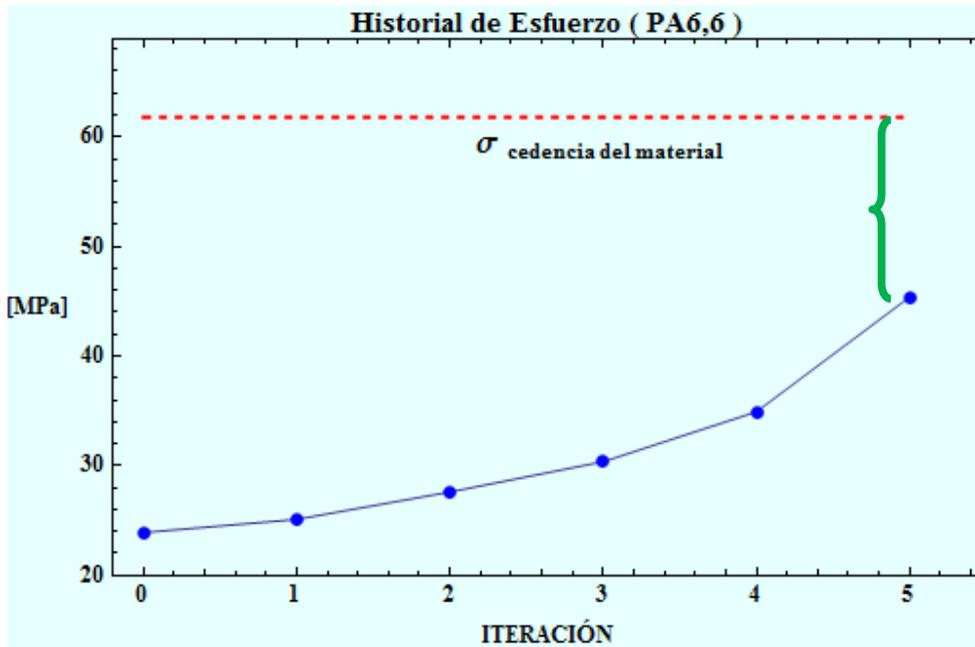


Fig. 3.16. Historial de esfuerzo, material Poliamida 6,6.

Este aumento es lógico debido a que lo que se está haciendo es remover o eliminar material de la estructura, durante el proceso de optimización. En la tabla 3.11, se muestra un comparativo de la distribución de esfuerzo entre la pieza original metálica (soporte lateral) hecha de un acero comercial y la distribución lograda en la estructura óptima tras el proceso de adecuación para manufactura.

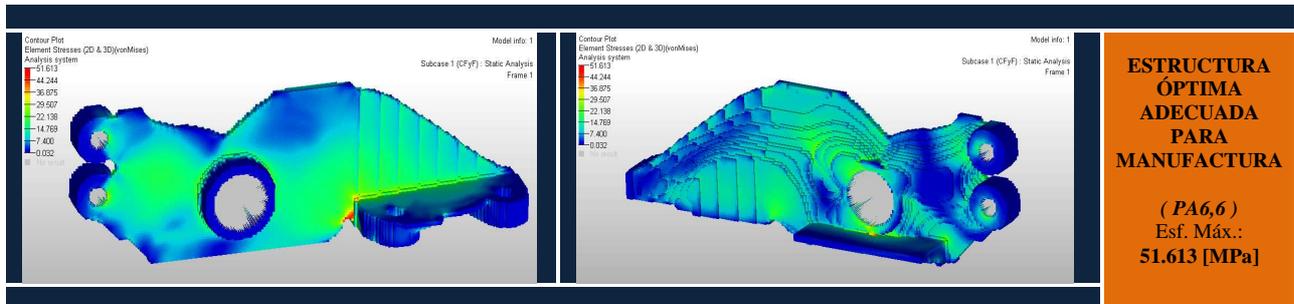


Tabla 3.11. Distribución de esfuerzo en la pieza original y la adecuada para manufactura, Poliamida 6,6.

Al someter la estructura óptima al proceso de adecuación para manufactura, se obtiene una estructura cuyo valor de esfuerzo máximo final fue de 51.613 [MPa], como se ve en la tabla anterior. Siguiendo la Ec. 2.18, sobre el factor de seguridad, y aplicándola para el resultado adecuado para manufactura de este material, se tiene:

$$FS_{PA6,6} = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{max\ PA6,6}} = \frac{61.8 [MPa]}{51.613 [MPa]} = 1.1974 \approx 1.2 \quad \dots\dots (3.29)$$



Como se puede observar el valor del factor de seguridad obtenido fue de 1.2, aunque el obtenido para la estructura óptima fue de 1.297, dicho factor después del proceso de adecuación, es el mismo de la restricción establecida desde un inicio, con lo que se establece que el proceso de adecuación no tiene un gran impacto en la estructura final, si se tiene en cuenta que se por un lado se añade material y por otro se lleva a cabo una modificación de la forma que lleva la estructura al límite.

### 3.4 COMPARATIVO DE RESULTADOS ENTRE MATERIALES.

Aquí se presenta una comparación breve entre las estructuras óptimas obtenidas en este trabajo tras llevar a cabo la adecuación para manufactura de cada una de ellas, con el fin de poder elegir entre los resultados dados, la mejor solución al problema de diseño planteado (ver capítulo 2 sección 2.2), estructuralmente hablando.

En la tabla 3.12 se muestra un comparativo del análisis de densidad de elementos, obtenido al final del proceso de optimización topológica, para posteriormente con base en ellos, crear la geometría óptima que es utilizada para llevar a cabo el proceso de adecuación para manufactura de cada uno de los materiales propuestos. Dichas estructuras mostradas, son logradas mediante un proceso gradual de remoción de material, con base en las restricciones impuestas, hasta llegar a una convergencia dentro del software utilizado para este fin, OPTISTRUCT v11.

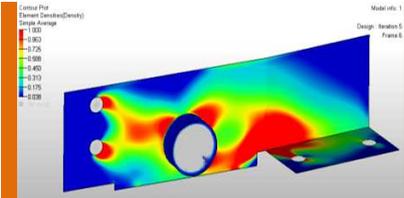
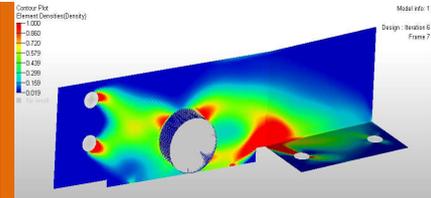
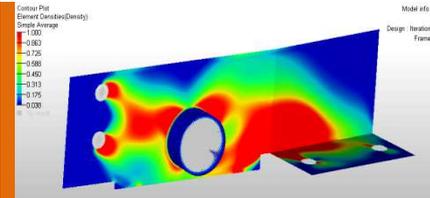
ANÁLISIS DE DENSIDAD DE ELEMENTOS PARA LOS MATERIALES PROPUESTOS		
ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO (ABS)	POLICARBONATO (PC)	POLIAMIDA (PA 6,6)
		
<b>Iteración:</b> 5 <b>Espesor inicial:</b> 13.3 [mm] <b>Esf. de cedencia:</b> 46.7 [MPa] <b>Esf. Máximo:</b> 38.312 [MPa] <b>Factor de seguridad:</b> 1.219	<b>Iteración:</b> 6 <b>Espesor inicial:</b> 12.6 [mm] <b>Esf. de cedencia:</b> 72.2 [MPa] <b>Esf. Máximo:</b> 60.826 [MPa] <b>Factor de seguridad:</b> 1.201	<b>Iteración:</b> 5 <b>Espesor inicial:</b> 12 [mm] <b>Esf. de cedencia:</b> 61.8 [MPa] <b>Esf. Máximo:</b> 45.125 [MPa] <b>Factor de seguridad:</b> 1.297

Tabla 3.12. Comparativo del análisis de densidad de elementos para los materiales propuestos.

En la siguiente tabla 3.13, se observa un comparativo geométrico entre las distintas estructuras óptimas obtenidas. En dicha tabla se muestran las estructuras antes de la adecuación, logradas tomando en cuenta: el análisis de densidad de elementos, los contornos generados de estos y las superficies que se encuentran en contacto con otros elementos (ver capítulo 2).

Además de las mismas estructuras óptimas obtenidas después de pasar por el proceso de adecuación para manufactura propuesto en este trabajo (en el anexo 5, se muestran distintas vistas de las estructuras mostradas en la tabla 3.13).



En dichas figuras mostradas se puede ver la modificación de la forma final de la estructura óptima que se lleva a cabo durante el proceso de adecuación, donde se observa claramente un aumento de material en zonas específicas, con el único fin de que ésta pueda ser llevada a producción.

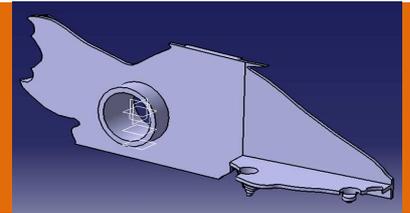
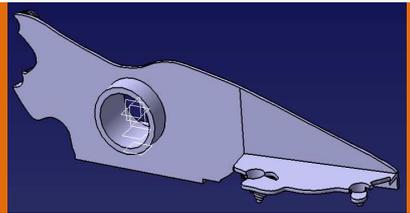
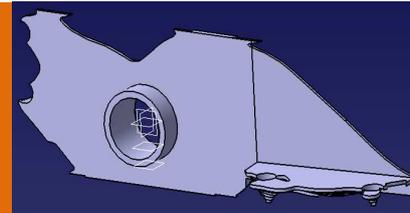
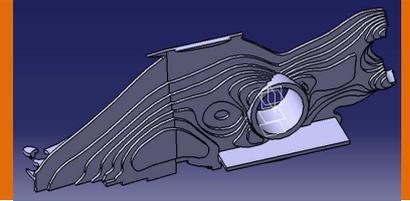
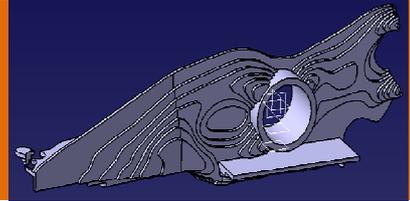
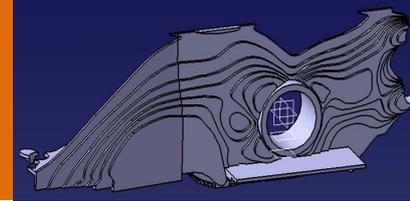
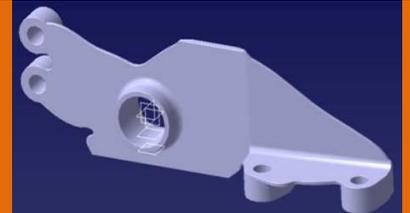
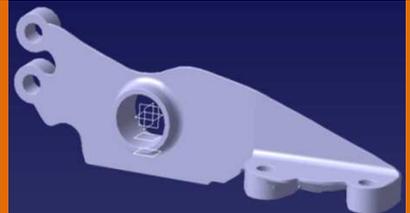
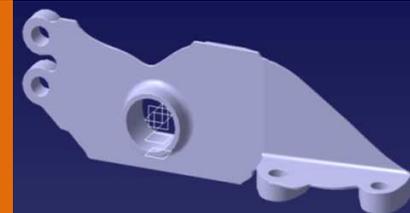
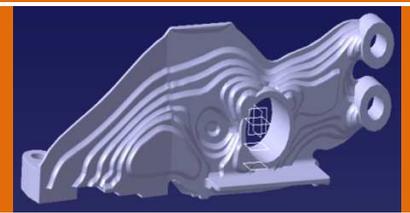
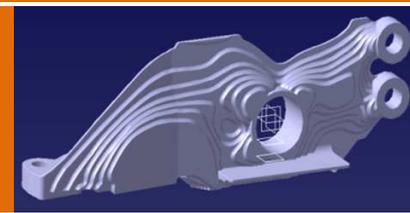
ESTRUCTURA ÓPTIMA TOPOLÓGICA ( No Adecuada )		
ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO (ABS)	POLICARBONATO (PC)	POLIAMIDA (PA 6,6)
		
		
ESTRUCTURA ÓPTIMA ADECUADA PARA MANUFACTURA ( EOAM ) ( propuesta en este trabajo )		
		
		

Tabla 3.13. Comparativo de geometría entre la estructura óptima antes y después del proceso de adecuación para manufactura para los materiales propuestos.

En la siguiente tabla 3.14, se observa un comparativo de la distribución de esfuerzo, así como del valor máximo que se obtuvo entre las distintas estructuras óptimas de los materiales propuestos, en comparación con la pieza original metálica (soporte lateral).



En dicha tabla los valores mostrados de esfuerzo máximo, indican que cada estructura optimo-manufacturable obtenida, presenta un valor de esfuerzo mayor que el de la pieza original, pero siempre por debajo del esfuerzo de fluencia del material plástico utilizado, con lo cual se puede inferir que la estructura original metálica, esta sobre diseñada para cumplir su función.

También se puede ver claramente que en las estructuras óptimas, después del proceso de adecuación, la distribución del nivel de esfuerzo en cada una de ellas es más homogénea tras la remoción de material, dando lugar al aumento en el valor de esfuerzo máximo, el cual refleja las bases de la teoría de optimización dentro de la propuesta en este trabajo.

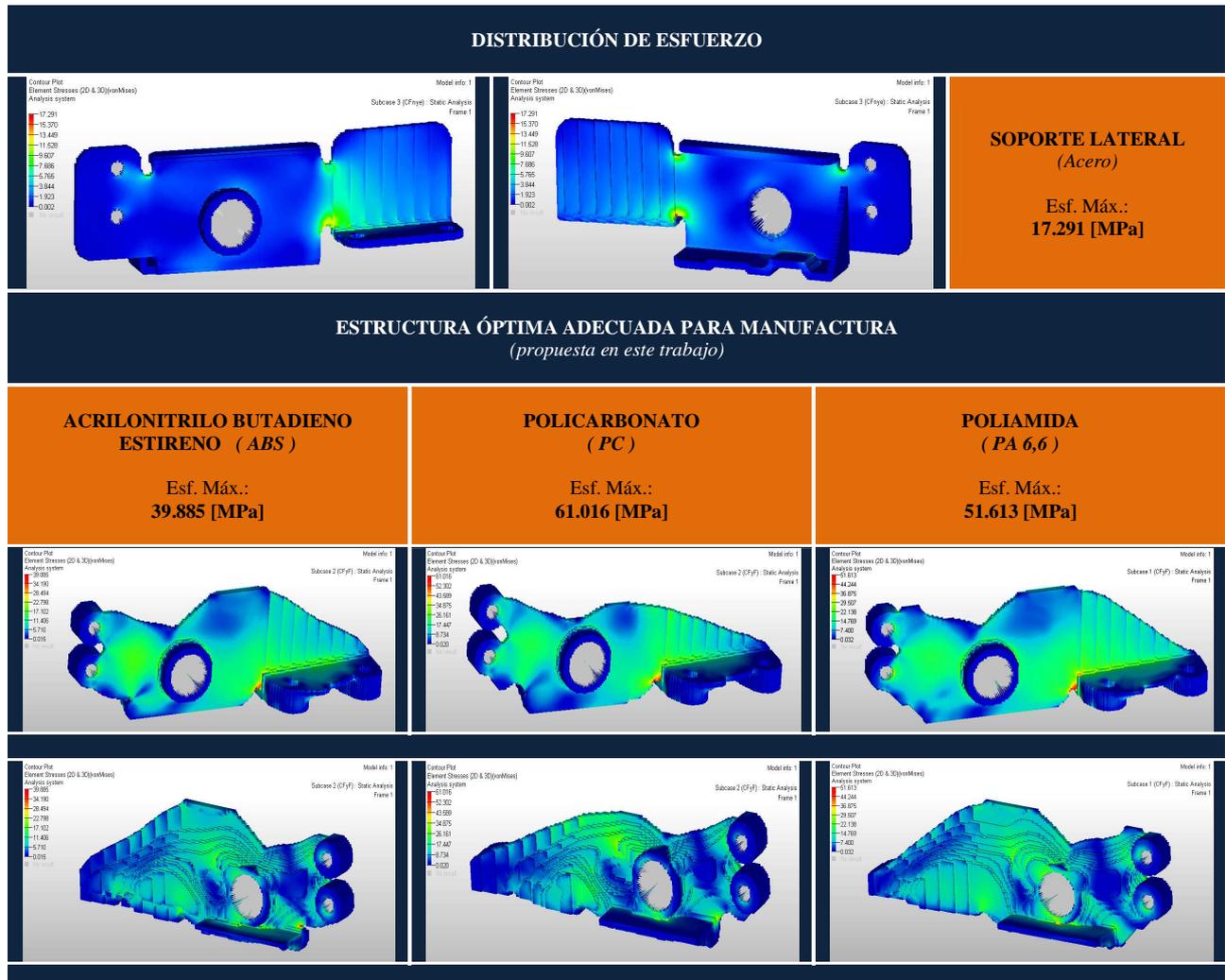


Tabla 3.14. Comparativo de la distribución de esfuerzo obtenida para los materiales propuestos.

En la siguiente tabla 3.15, se muestra un resumen de los datos obtenidos para cada estructura óptima, lograda tras el proceso de adecuación para manufactura, para los materiales propuestos. En dicha tabla se observan valores de volumen logrado, antes y después del proceso de adecuación, en cada estructura óptima y su respectivo valor de reducción total de volumen. Esta reducción es un valor total, lo cual implica que a pesar de tener un aumento de material tras el proceso de adecuación, que no es excesivo ni limitante ya que lo que se pretende es tener una estructura óptima que pueda ser manufacturable.

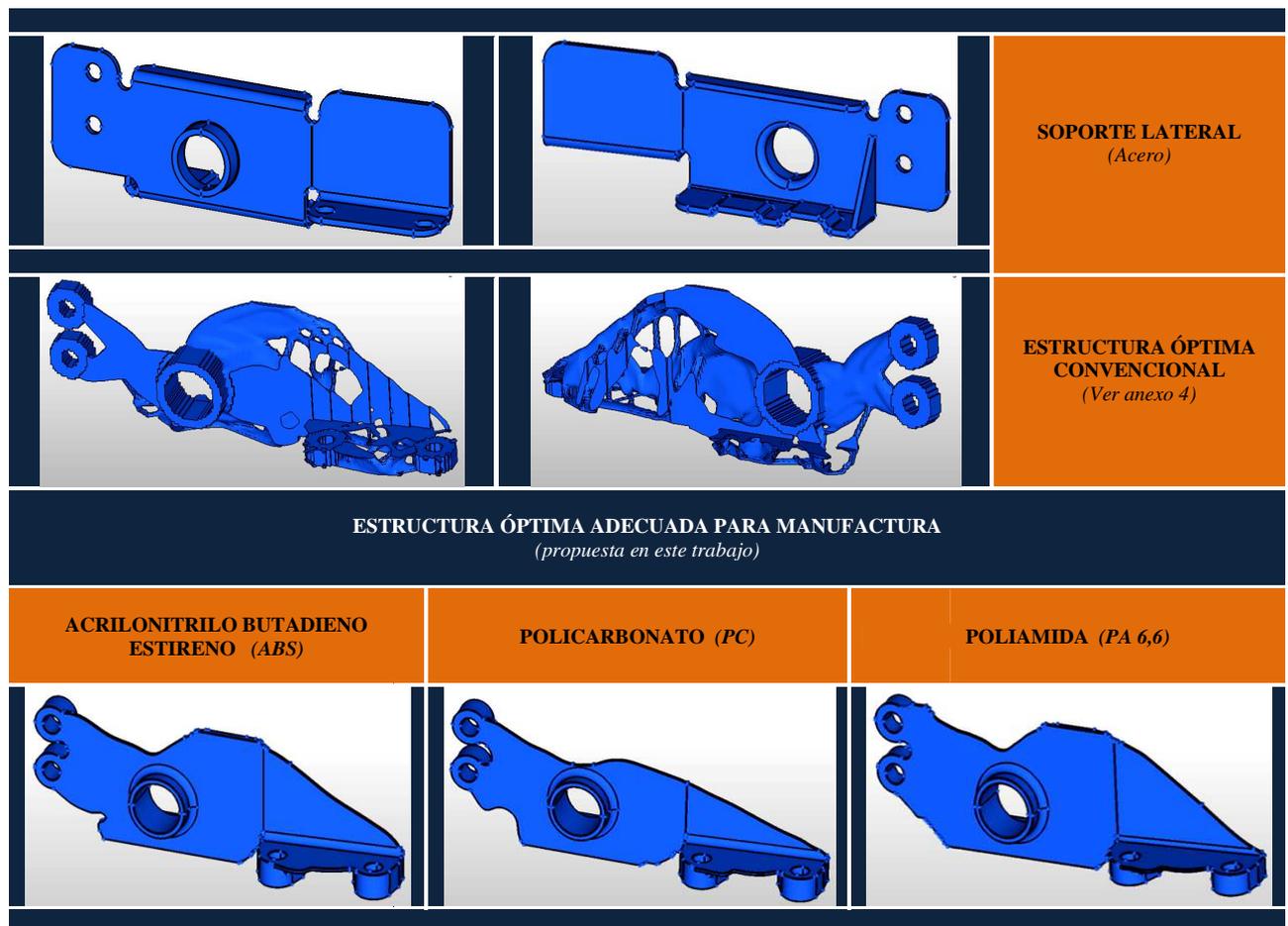


MATERIAL	ESPESOR Inicial	VOLUMEN Inicial	VOLUMEN Estructura óptima	VOLUMEN Estructura óptima Adecuada	Reducción total de volumen	ESFUERZO Estructura óptima	ESFUERZO Estructura óptima Adecuada
	[mm]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	%	[MPa]	[MPa]
ACERO	3	52358.27	-	-	-	-	-
ABS	13.3	236010.00	73889.85	85258.02	<b>63.88</b>	38.321	39.885
PC	12.6	223590.00	53658.55	65699.33	<b>70.62</b>	60.826	61.016
PA 6,6	12.0	212940.00	69382.63	77260.00	<b>63.72</b>	45.125	51.613

Tabla 3.15. Valores obtenidos tras el proceso de adecuación para los materiales propuestos.

### 3. 4. 1 SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN ÓPTIMA.

Con base en la tabla anterior y lo visto en la sección 3.3 de este capítulo, se debe elegir la solución óptima de entre los materiales propuestos, que dan solución al problema de diseño planteado (ver capítulo 2). En la siguiente tabla, se muestra un comparativo geométrico entre la estructura original, y las obtenidas para cada material propuesto.



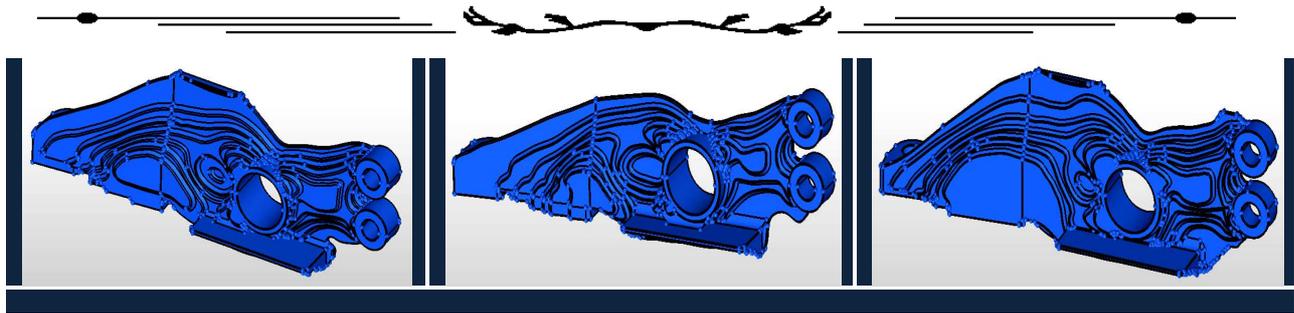


Tabla 3.16. Comparativo geométrico entre la estructura original metálica y la estructura óptima adecuada para manufactura de los materiales propuestos.

En la tabla anterior se puede ver claramente que las estructuras óptimas adecuadas para manufactura, obtenidas mediante la metodología propuesta, son totalmente manufacturables, en comparación con la estructura óptima obtenida de manera convencional (ver anexo 4). En esta última, se muestra que su manufactura es demasiado compleja, o mejor dicho no manufacturable por medio del proceso de inyección de plástico e incluso por cualquier otro proceso de manufactura como por ejemplo fundición en arena verde, cera perdida, estereolitografía, etc.

Las estructuras óptimas obtenidas, mostradas en la tabla 3.16, son estructuras que por su semejanza geométrica, mantienen también similitud en sus moldes, hablando del maquinado de estos. Lo cual nos lleva a que el costo del molde, del material de construcción, ciclo de vida e incluso el número de cavidades, son factores que quedan “fuera” de la toma de decisión de selección de la estructura óptimo-manufacturables. Esto también debido a que tendría que realizar un análisis a fondo de los costos de producción de todo el proceso, lo que está fuera del alcance de este trabajo.

Sin embargo tomando en cuenta lo anterior, para lograr elegir una de las soluciones óptimo-manufacturables obtenidas, se realiza un proceso simple de selección, basado en el peso total (en kilogramos) de cada estructura lograda para los materiales propuestos y en el costo de dichos materiales. Este es una idea básica, rápida pero lo suficientemente buena para tomar una decisión de manera general sin introducir ningún costo de producción, excepto el mencionado. De esta manera el peso está calculado en función del volumen obtenido, de la siguiente manera:

$$\rho = m/v \quad \rightarrow \quad m = \rho * v \quad \dots\dots\dots (3.30)$$

Así para el material ABS, según la Ec. (3.30) se tiene:

$$= (1150.5 [Kg/m^3]) * [(85258.02 [mm^3]) * (\frac{1}{1000^3}) [m^3/mm^3]] \quad \dots\dots\dots (3.31)$$

$$m_{ABS} = 0.098 [Kg] \quad \dots\dots\dots (3.32)$$

Por otra parte, siguiendo con la idea anterior, se obtiene el costo por kilogramo de cada material, en promedio. Debido a que dicho costo no es constante y sufre variaciones muy importantes día con día, para nuestros fines de selección, es un valor que se considera uniforme, sin contar con otros factores que aumentan el costo como el color, si es virgen o reciclado, entre otros. Con esto, los costos de estructura óptima adecuada para manufactura (EOAM) se calculan como:

$$Costo_{EOAM} = masa * valor_{MATERIAL} \quad \dots\dots\dots (3.33)$$

Así para el material ABS, según la Ec. (3.33) se tiene:



$$= (0.0981[\text{Kg}]) * (17.00 [\$/\text{Kg}]) \dots\dots\dots (3.34)$$

$$\text{Costo}_{\text{EOAM ABS}} = 1.6677 \cong 1.70 [\text{\$}] \dots\dots\dots (3.35)$$

De esta forma, el aplicar estos conceptos para los otros materiales se tienen los valores que conforman la tabla 3.17.

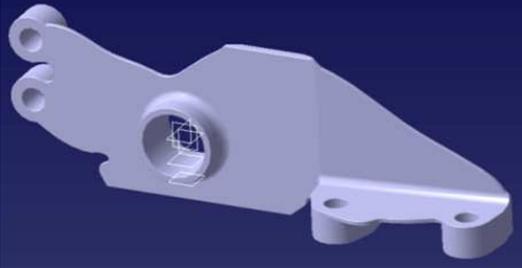
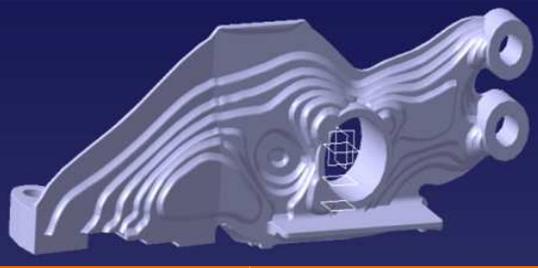
MATERIAL	ESPELOR	DENSIDAD	VOLUMEN Estructura óptima Adecuada	MASA Estructura óptima Adecuada	COSTO DEL MATERIAL	COSTO Estructura óptima Adecuada (por pieza)
	[mm]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	[Kg]	[\$/Kg]*	[\$]*
ABS	13.3	1150.6	85258.02	0.0981	17.00	<b>1.6677</b>
PC	12.6	1313.7	65699.33	0.0863	36.00	<b>3.1068</b>
PA 6,6	12.0	1143.5	77260.00	0.0883	25.00	<b>2.2075</b>

\* Valor del costo en pesos, calculados a Enero de 2012.

Tabla 3.17. Comparativo del análisis de densidad de elementos para los materiales propuestos.

Con lo cual se puede decir entonces que el material ABS, de manera rápida, es el seleccionado para realizar la fabricación de la estructura optimo-manufacturable.

**ESTRUCTURA ÓPTIMA ADECUADA PARA MANUFACTURA (EOAM)  
ELEGIDA COMO SOLUCIÓN FINAL**

Material: **ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO (ABS)**

Densidad:	<b>1150.5 [Kg/m<sup>3</sup>]</b>
Esfuerzo Máx.:	<b>39.885 [MPa]</b>
Volumen:	<b>85258.02 [mm<sup>3</sup>]</b>
Factor de Seguridad:	<b>1.17</b>
Peso:	<b>98.1 [g]</b>
Costo /unidad:	<b>1.7 [\$]</b>

Tabla 3.18. Estructura optimo-manufacturable, del material seleccionado ABS.

Esta es una propuesta de selección, aunado a esto se tiene que hacer un análisis detallado de los costos de producción para poder corroborar la elección de material o incluso tomar otra mejor.



---

# Conclusiones

*“Para las personas creyentes, Dios está al principio.  
Para los científicos está al final de todas sus reflexiones”.*

Max Planck

La metodología de diseño óptimo presentada en este trabajo, se basa en la integración de reglas evolutivas, el análisis por elementos finitos, así como parámetros de un proceso de manufactura específico, dentro del proceso de optimización estructural de elementos mecánicos, satisfaciendo de esta manera los objetivos trazados al inicio. Es un soporte o apoyo más que reemplazo para los ingenieros de diseño expertos, siendo una herramienta para dar solución óptima a un problema de diseño, cuyo desempeño no depende de la experiencia del diseñador, como en una metodología tradicional de diseño.

La metodología propuesta utiliza una simplificación del dominio de diseño mediante una superficie media o Shell, debido a que la gran mayoría de las piezas plásticas son de pared delgada y permiten este tipo de simplificaciones. Esto provoca el utilizar únicamente una variable, el espesor, y de esta manera relacionarlo con el valor del espesor de pared mínimo del material plástico que se utilice, ya que dicho valor es uno, sino es el que más importa, durante el diseño de piezas plásticas, para con ello mostrar parte de la adecuación e interacción llevada a cabo entre optimización y manufactura. Por otro lado el hacer un análisis de elemento finito con cascarones (shell's) permite realizarlos en un menor tiempo, lo cual ayuda al procesamiento de la solución durante la optimización estructural.

Se logró obtener una serie de reglas o criterios geométricos específicos, para llevar a cabo una adecuación para manufactura de una estructura óptima, permitiendo que ésta, pueda ser fabricada mediante el proceso de moldeo por inyección de plástico.

En el caso de las estructuras óptimas obtenidas para cada uno de los materiales propuestos, se demuestra que la distribución de esfuerzo en cada una de ellas, se vuelve homogénea al final del proceso de optimización y se mantiene aún después de realizar el proceso de adecuación para manufactura de cada una de ellas. Lo cual es de esperarse ya que al remover elementos ineficientes de una estructura, el nivel de esfuerzo aumenta considerablemente, debido a que los elementos que quedan son utilizados de una mejor manera por dicha estructura.

Las soluciones óptimo-manufacturables logradas en este trabajo son estructuras plásticas sólidas o gruesas, a pesar de utilizar un espesor de pared mínimo. Sin embargo esto no es excesivo ni limitante durante el proceso de inyección, en comparación con las piezas plásticas que son generalmente de pared delgada, ya que se obtiene una mayor rigidez en dicha pieza. Además se logró reducir el volumen en cada una de las estructuras óptimo-manufacturables, entre 63% a un 70% del valor inicial dependiendo del material plástico utilizado y cumpliendo con un factor de diseño cercano a 1.2, a pesar de que durante el proceso de adecuación se presenta un aumento de material de alrededor de un 5%, lo cual no tiene un gran impacto en la estructura final.

Con respecto a la solución al problema de diseño planteado, el cambio del proceso de manufactura, es decir pasar del troquelado y dobles de lámina, al proceso de inyección de plástico, implica una reducción del número de pasos u operaciones para fabricar la pieza final, así como también llevar a cabo un remplazo de material. Además de permitir obtener un número mayor de piezas iguales, hablando de una producción de más de 1000 piezas en comparación con el proceso de dobles de lámina que queda al buen ojo del operario, que logra piezas semejantes mas no iguales, obteniendo



---

tolerancias altas en la pieza metálica. El aplicar la teoría de optimización para plantear la solución del problema de diseño, permitió obtener una estructura conceptualmente nueva con una relación de peso-volumen, muy baja, que satisface los requerimientos y solicitudes impuestas.

La solución óptimo-manufacturable al problema de diseño se obtuvo para tres materiales propuestos, donde se observa que se requiere fuertemente de un análisis de cambio de tornillería, utilizada para fijar la pieza dentro del mecanismo al cual pertenece, dichos cambios provienen de la adecuación llevada a cabo, debido a que el espesor final de la pieza plástica lograda, es mayor en comparación con la original hecha de metal, ya que la longitud de los tornillos aumenta, lo que aplica directamente a los costos asociados a dicha pieza.

Las soluciones óptimo-manufacturables obtenidas para los distintos materiales propuestos, se observa que son semejantes geométricamente, con lo cual el seleccionar una de éstas, se encuentra en función de la relación costo-volumen de cada una de ellas, convirtiéndose en un factor importante de selección del material a utilizar, ya que el costo de maquinado del molde por esta condición de semejanza es prácticamente el mismo, y no es de un gran impacto en la elección de la solución óptima.

Las soluciones plásticas óptimo-manufacturables obtenidas, son más ligeras en comparación con la pieza metálica original, reduciendo el peso de la estructura entre un 21% y un 24% con los materiales plásticos estructurales dados, esto era de esperarse gracias a la utilización de las técnicas de optimización.

A pesar de que el proceso de adecuación para manufactura se lleva a cabo de manera manual, por no decir artesanal, el tiempo total de dicho proceso es bastante elevado, pero en sentido práctico no es excesivo, ya que depende de la complejidad de geometría obtenida. Además el hacerlo paso a paso, sirvió como guía para obtener una serie de reglas que podrán ser utilizadas, pero principalmente, podrán ser programadas en un algoritmo computacional pensando en la generación de un posible sistema experto.

## **TRABAJO FUTURO.**

- ✦ Realización de un análisis profundo únicamente de moldeabilidad, para la estructura óptimo-manufacturable.
- ✦ Realización de un análisis, posterior a la adecuación para manufactura de una estructura óptima plástica, desde el punto de vista de costos totales del proceso de moldeo por inyección de plástico, que incluyan costos de producción, del molde, distribución, etc.
- ✦ Un análisis del molde para una estructura optimo-manufacturable, desde todas sus perspectivas, es decir revisar todos los aspectos que conlleva su fabricación: maquinado, material, ciclo de vida, refrigeración, etc., así como también una estimación del número de cavidades de dicho molde.
- ✦ Revisar la posibilidad de extender la idea expuesta en este trabajo, a otros procesos de manufactura, revisando sus propios parámetros e involucrándolos con la optimización estructural.
- ✦ Implementar los criterios expuestos en este trabajo, programando un algoritmo computacional, llevando a cabo el inicio de un sistema que pueda resolver el problema de diseño de piezas plásticas óptimo-manufacturables de manera automática.
- ✦ Revisar la posibilidad de aumentar el rango de parámetros de proceso de inyección de plástico, como son: temperatura, velocidad y presión de inyección, entre otros.



---

# Bibliografía

- [ 1 ]. Alcaide, J. y Artacho, M.A. (2004). *Diseño de producto, métodos y técnicas* (2ª Ed.). México, D.F.: Alfaomega.
- [ 2 ]. BAYER ENGINEERING POLYMERS THERMOPLASTICS (2005). *Part and mold design. A design guide* (1ª Ed.). EEUU: Bayer Material Science.
- [ 3 ]. Bhatti, A. (2005). *Fundamental finite element analysis and applications* (2ª Ed.). EEUU: John Wiley & Sons Inc.
- [ 4 ]. Bootroyd, G. y Dewhurst, P. (2002). *Product design for manufacturing and assembly* (2ª Ed.). New York, EEUU: Dekker.
- [ 5 ]. Bralla, James G. (1999). *Design for manufacturability handbook* (2ª Ed.). New York, EEUU: McGraw Hill.
- [ 6 ]. Cresse, R. (3ª Ed.) (1999). *Introduction to manufacturing process* (pp. 193-211). EEUU: Dekker.
- [ 7 ]. Coello, C. (1996). *La computación evolutiva en el contexto de la inteligencia artificial* (1ª Ed.). México, D.F.: Lania, A.C.
- [ 8 ]. Dieter, G. (3ª Ed.) (2001). *Engineering design* (pp 8-123). New York, EEUU: McGraw Hill.
- [ 9 ]. García, M. J. (2010). *Optimización estructural*. Trabajo de grado, Ingeniería Mecánica, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- [ 10 ]. GENERAL ELECTRIC (2006). *Injection molding design guidelines* (1ª Ed.). EEUU: GE Engineering Thermoplastics.
- [ 11 ]. Goldberg, D. E. (1ª Ed.) (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning* (PP. 8-145). EEUU: Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- [ 12 ]. Hans-Peter, H. (1ª Ed.) (2001). *Specialized molding techniques to plastics process* (pp. 89-143). EEUU: Society Plastic Engineers.
- [ 13 ]. Koza, J. R. (6ª Ed.) (1998) *Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection* (pp. 17-120). Massachusetts, EEUU: MIT.
- [ 14 ]. Leondes, C. (3ª Ed.) (2001). *Computer aided design, engineering and manufacturing* (vol. 4, pp. 105-288). EEUU: CRC Press.
- [ 15 ]. Martínez, P. (2003). *Diseño óptimo simultáneo de topología y geometría de estructuras articuladas mediante técnicas evolutivas*. Trabajo de grado, Ingeniería Estructural, Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia.
- [ 16 ]. Proos, K. (2002). *Evolutionary structural optimization as a robust and reliable design tool*. Trabajo de grado, Ingeniería civil, Universidad de Sydney, Australia.
- [ 17 ]. Querin, O. M. (1997). *Evolutionary structural optimization*. Trabajo de grado, Ingeniería civil, Universidad de Sydney, Australia.
- [ 18 ]. Rosato, D. (2003). *Plastics engineered product design* (1ª Ed.). United Kingdom: Elsevier.
- [ 19 ]. Rosato, D. (2000). *Injection molding handbook* (3ª Ed.). New York, EEUU: McGraw Hill.
- [ 20 ]. Shigley, J. E. (4a Ed.) (1993). *Diseño en ingeniería mecánica* (pp-595-707). México, D.F.: Ed. McGraw Hill.
- [ 21 ]. Ugural, A. C. (4ª Ed.) (2003). *Advanced strength and applied elasticity* (pp 472-584). EEUU: Prentice Hall.



- 
- [ 22 ]. Ullman, D. (2010). *The Mechanical Design Process* (4ª Ed.). New York, EEUU: McGraw Hill.
- [ 23 ]. Ulrich, K. T. y Eppinger, S. D. (2004). *Diseño y desarrollo de productos*, (4ª Ed.) (Trad. S. Romero), México, D.F.: McGraw Hill (Original en inglés, 2003)
- [ 24 ]. Velázquez, F. (2010). *Optimización estructural evolutiva*. Trabajo de grado, Ingeniería Mecánica, UNAM, México.
- [ 25 ]. Winston, P. H. (3ª Ed.) (1999). *Inteligencia artificial* (pp. 183-192). México, D.F.: Addison-Wesley Iberoamericana.
- [ 26 ]. Xie, Y. M. y Steven, G. P. (1997). *Evolutionary structural optimization* (1ª Ed.). United Kingdom: Springer.
- [ 27 ]. Zienkiewicz, O. C. y Taylor, R. L. (2000). *The finite element method* (vol. 2: Solid Elastics) (5ª Ed.). EEUU: Butterworth-Heinemann,

## ARTÍCULOS.

- [ 28 ]. Annicchiarico, W. (2007). *Un esquema general para la optimización estructural de formas mediante algoritmos genéticos y elementos de diseño geométrico*. IMME Boletín Técnico, 45 (1), 2-19.
- [ 29 ]. Behrooz, F. y Siavash, G. (2011). *Optimization of injection molding process parameters using sequential simplex algorithm*, Elsevier Journal of materials and design, 32, 414-423.
- [ 30 ]. Bisht, N. y Parate, S. (2011). *Structural optimization of compactor side frame using optistruct*. TELCON Industries, 1-10.
- [ 31 ]. Cavel, S. y Mongeau, M. (2007). *Black-boxy comp structural optimization of a mechanical component*. Elsevier Journal of computers and industrial engineering, 53, 514-530.
- [ 32 ]. Chang, K. y Tang, S. (2001). *Integration of design and manufacturing for structural shape optimization*. Journal of advances in engineering software, 32, 555-567.
- [ 33 ]. Chaur, J. (1999). *Optimización aplicada al diseño mecánico*. Revista clase empresarial: El perfil del profesional del siglo XXI, pp. 1-6.
- [ 34 ]. Chen, C. P., Chuang, M. T. (2009). *Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis*. Journal of expert systems with applications, 36, 10752-10759.
- [ 35 ]. Cheng, J. y Feng, Y. (2008). *Optimization of injection mold based on fuzzy moldability evaluation*. Journal of materials processing technology, 208, 222-228.
- [ 36 ]. Del Prete, A. y Mazzotta, D. (2010). *Design optimization application in accordance with product and process requirements*. Journal of advances in engineering software, 41, 427-432.
- [ 37 ]. Dimla, D. y Camiloto, M. (2005). *Design and optimization of conformal cooling channels in injection moulding tools*. Journal of materials processing technology, 165, 1294-1300.
- [ 38 ]. Folgado, R. y Pecas, P. (2010). *A case study in the manufacturing of injection moulds*. Journal of production economics, 128, 368-378.
- [ 39 ]. Gen, M. y Lin, T. (2009). *Evolutionary techniques for optimization problems in integrated manufacturing system: State-of-the-art-survey*. Journal of computers and industrial engineering, 56, 779-808.
- [ 40 ]. Gonzalez, A. y Gonzalez, S. (2005). *Diseño de piezas de inyección de plástico*. BASF Española, 1-10.
- [ 41 ]. Hailian, Y. y Xiongqing, Y. (2010). *Integration of manufacturing cost into structural optimization of composite wings*. Journal of aeronautics, 23, 670-676.



- 
- [ 42 ]. Huang, X., Xie Y. M. (2006). *A new algorithm for bi-directional evolutionary structural optimization*. Journal ASME International, 49 (4), 1091-1100.
- [ 43 ]. Hsu, M. y Hsu, Y. (2005). *Interpreting three-dimensional structural topology optimization*. Journal of computers and structures, 83, 327-337.
- [ 44 ]. Kicinger, R. y Arciszewski, T. (2005). *Evolutionary computation and structural design: A survey of the state-of-the-art*. Journal of computers and structures, 83, 1-36.
- [ 45 ]. Li, X. y Zhao, G. (2009). *Optimal design of heating channels for rapid heating cycle injection mold based on response surface and genetic algorithm*. Journal of materials and design, 30, 4317-4323.
- [ 46 ]. Lozano, D. y Velázquez, F. (2010). *Optimización estructural evolutiva: Diseño de cavidades en elementos planos*. Mecánica computacional (AMCA), XXIX, 1143-1159.
- [ 47 ]. Maute, K. y Raulli, M. (2003). *An interactive method for the selection of design criteria and the formulation of optimization problems in computer aided optimal design*. Journal of computers and structures, 82, 71-79.
- [ 48 ]. Ozelik, B. y Kuram, E. (2012). *Investigation the effects of obstacle geometries and injection molding parameters on weld line strength using experimental and finite element methods in plastic injection molding*. Journal of international communication in heat and mass transfer, 39, 275-281.
- [ 49 ]. Rajkumar, R. y Hinduja, S. (2008). *Recent advances in engineering design optimization: Challenges and future trend*. Journal of CRIP annals – manufacturing technology, 83, 697-715.
- [ 50 ]. Rubio, M.A. y Perez, J.M. (2006). *A procedure for plastic parts demoldability analysis*. Journal of robotics and computer-integrated manufacturing, 22, 81-92.
- [ 51 ]. Spath, D. y Neithardt, W. (2005). *Integration of topology and shape optimization in the design process*. Trabajo de grado, Ingeniería en estructuras, Universidad de Karlsruhe, Alemania.
- [ 52 ]. Tai, C. y Lin, J. (1999). *The optimal position for the injection gate of a die-casting die*. Journal of materials processing technology, 86, 87-100.
- [ 53 ]. Velazquez, F. y Santillan, S. (2006). *Diseño óptimo evolutivo*. Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología, VII (3), 139-150.
- [ 54 ]. Wang, G. y Zhao, G. (2011). *Multi-objective optimization design of the heating-cooling channels of the steam heating rapid thermal response mold using particle*. International Journal of Thermal Science, 128, 790-802.
- [ 55 ]. Zhenxing, Y. y Jianhua, R. (2005). *A topology optimization method of three-dimensional continuum structure*. VI Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, 1-11.

## MESOGRAFÍA.

<http://www.nsolver.com/productos/tiipflow>

[http://www.plastico.com/tp/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARTICULOS/doc\\_68367\\_HTML.html?idDocumento=68367](http://www.plastico.com/tp/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARTICULOS/doc_68367_HTML.html?idDocumento=68367)

<http://www.monografias.com/trabajos63/inyeccion/inyeccion2.shtml>

[http://tdd.elisava.net/coleccion/20/sanchez-soto\\_gamez\\_gordillo\\_pages\\_maspoeh-es/view?set\\_language=es](http://tdd.elisava.net/coleccion/20/sanchez-soto_gamez_gordillo_pages_maspoeh-es/view?set_language=es)

[http://tdd.elisava.net/coleccion/20/gonzalez-de-cabanes\\_gonzalez-mestre-es](http://tdd.elisava.net/coleccion/20/gonzalez-de-cabanes_gonzalez-mestre-es)

<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/4808-Diseno-optimizado-de-piezas-de-plasticos.html>

[http://es.wikiversity.org/wiki/Dise%C3%B1o\\_C%C3%A1culo\\_y\\_Fabricaci%C3%B3n\\_de\\_Piezas\\_y\\_Productos\\_Pl%C3%A1sticos](http://es.wikiversity.org/wiki/Dise%C3%B1o_C%C3%A1culo_y_Fabricaci%C3%B3n_de_Piezas_y_Productos_Pl%C3%A1sticos)

<http://www.mitecnologico.com/Main/Dise%F1oDeLaPieza>

<http://es.scribd.com/doc/29618930/Guia-de-diseno-plastico-Aimplas>

<http://www.inyeccionplasticos-arizaga.com/piezasporinyeccion.htm>

<http://www.cosmocax.com/la-inyeccion-de-plasticos-3-el-molde-1/>



---

<http://www.monografias.com/trabajos63/inyeccion/inyeccion2.shtml>  
[http://es.wikiversity.org/wiki/Dise%C3%B1o\\_C%C3%A1lculo\\_y\\_Fabricaci%C3%B3n\\_de\\_Piezas\\_y\\_Productos\\_Pl%C3%A1sticos](http://es.wikiversity.org/wiki/Dise%C3%B1o_C%C3%A1lculo_y_Fabricaci%C3%B3n_de_Piezas_y_Productos_Pl%C3%A1sticos)  
[http://tdd.elisava.net/coleccion/20/gonzalez-de-cabanes\\_gonzalez-mestre--es](http://tdd.elisava.net/coleccion/20/gonzalez-de-cabanes_gonzalez-mestre--es)  
[http://bvs.sld.cu/revistas/ibi/vol\\_29\\_1\\_10/ibi01110.htm](http://bvs.sld.cu/revistas/ibi/vol_29_1_10/ibi01110.htm)  
[http://www.edutecne.utn.edu.ar/control\\_vibr\\_tors/control\\_vibr\\_tors.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/control_vibr_tors/control_vibr_tors.pdf)  
[http://www.postmat.unal.edu.co/mecanismo\\_flexible.pdf](http://www.postmat.unal.edu.co/mecanismo_flexible.pdf)  
<http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/27/27-13.pdf>  
<http://www.cenm.org/abstract/uao/gcim/mario-diego.pdf>  
<http://redalyc.uaemex.mx/pdf/643/64325203.pdf>  
<https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/4808-Diseño-optimizado-de-piezas-de-plasticos.html>  
<http://www.dismold.upv.es/contac.html>  
<http://3dcadportal.com/index.php/articulos/480-simulacion-y-optimizacion-de-diseno-en-piezas-inyectadas-usando-moldflow>  
<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/5616-Una-nueva-era-en-el-diseno-de-piezas-de-plastico.html>  
<http://www.infoambiental.es/precios-plastico>  
<http://www.mundoanuncio.com.mx/q/policarbonato/c-10045>  
<http://material-profesional.iztapalapa.vivastreet.com.mx/equipo-profesional+tonala/plastico-policarbonato-virgen/49356549>  
<http://www.internatura.org/contactodat.php?id=2>  
[http://www.plasticosmexicanos.com.mx/cot\\_materiales.html](http://www.plasticosmexicanos.com.mx/cot_materiales.html)



---

# Anexos

## ANEXO 1.

### A1.1. METODOLOGÍA GENERAL DE FEM.

#### ➤ Discretización del Dominio a través de Elementos Finitos.

El análisis por elementos finitos depende de un número de elementos y el arreglo de estos para definir el modelo. La exactitud de la solución mejora cuando se incrementa el número de elementos, lo cual involucra un requerimiento computacional que es incrementado rápidamente debido a ello. La buena discretización de un modelo en elementos finitos, provoca tener una buena aproximación en la solución del modelo. Para lograr una buena discretización se deben considerar los siguientes conceptos:

**Geometría física del dominio.** Se deben utilizar bastantes elementos en el modelo del dominio para tener una buena exactitud en la solución. Cuando un dominio curvo se discretiza usando elementos finitos con lados rectos, se debe usar un número razonable de elementos; de otra manera estos generarán una discrepancia entre la geometría original y la discretización por elementos finitos.

**Exactitud deseada.** Generalmente, usando más elementos se produce mayor exactitud en la solución.

**Formulación de elementos.** Algunos elementos producen mayor exactitud que otros, es por ello que debe escogerse los más adecuados para llevar a cabo la discretización.

**Características especiales de la solución.** Las regiones sobre las cuales la solución cambia rápidamente, en general requieren un gran número de elementos para capturar la exactitud, para con ellos tener altos gradientes en la solución. El resultado de esos gradientes en el modelo, es usado para guiar el proceso de refinamiento de malla en esas regiones.

**Interacción de elementos.** Los elementos son unidos por nodos. La solución a estos nodos son las variables primarias en el proceder del elemento finito. Esto es importante para crear mallas con elementos adyacentes, que son conectados siempre de esquina a esquina.

**Simetría.** En muchos problemas prácticos, el dominio y las condiciones de frontera son simétricas, entonces se puede especificar simetría en el modelo y en la solución. La importancia de reconocer la simetría es debido a que es una ventaja el reducir el tamaño del modelo y con ello el sistema de ecuaciones a resolver.

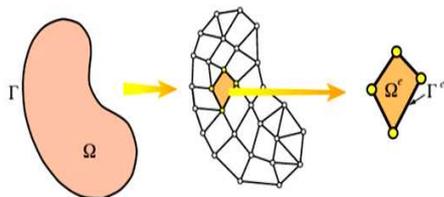


Fig. A1.1. Ejemplo de discretización de un modelo, en elementos finitos

El número y disposición de los elementos debe ser lo bastante buena para aproximar la geometría, cargas y otras características físicas del problema. Para ver la convergencia de la solución, se puede seleccionar un punto en el modelo y monitorear la solución de este. La solución debe comenzar a estabilizarse después de usar un número de elementos en el modelo que tenga un nivel razonable. En la figura A3.1, se muestra un mallado con elementos triangulares y rectangulares.



➤ **Ecuaciones de los Elementos.**

Cada situación de análisis que es descrita en términos de una o más ecuaciones diferenciales requiere de un apropiado grupo de ecuaciones de elementos. Para cada uno de los sistemas de ecuaciones gobernantes, varios elementos con diferentes formas y características pueden ser considerados para una aplicación. Es por ello que escoger un elemento apropiado para una aplicación se vuelve vital y con ello poder entender mejor la aproximación que esta tendrá durante el cálculo final.

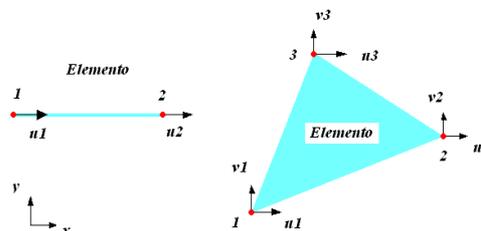


Fig. A1.2. Tipos de elementos finitos en 1y 2D, además de sus grados de libertad en cada nodo [5].

La solución del elemento propuesta se escribe en términos de variables seleccionadas en puntos denominados *Nodos*. Las variables en los nodos son generalmente referidas como los *Grados de Libertad*, una terminología que fue desarrollada para el método por ingenieros de estructuras, como se puede observar en la figura A1.2:

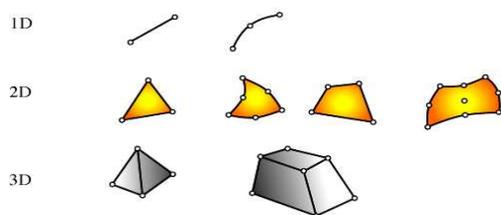


Fig. A1.3. Tipos de Elementos Finitos en 1D, 2D y 3D [5].

La geometría de un elemento depende del tipo de la ecuación diferencial gobernante. Para problemas unidimensionales, esta tiene una ecuación diferencial ordinaria, y el elemento es una línea recta o curva. Para problemas gobernados en dos dimensiones, con 2 ecuaciones diferenciales parciales, los elementos usualmente son triángulos o cuadriláteros. En problemas en tridimensionales se requieren tetraedros o elementos con paredes solidadas. Todo esto se muestra en la figura A1.3. Las ecuaciones de los elementos expresan una relación entre los parámetros físicos en las ecuaciones diferenciales y los grados de libertad en los nodos.

Esto provoca que la ecuación del elemento sea fácilmente programable dando las coordenadas de los nodos, además de otros parámetros físicos, obteniendo entonces una ecuación de elemento con valores numéricos. El número de ecuaciones de algunos elementos puede ser muy largo, es por ello que se utiliza una notación matricial. La programación se organiza en dos fases: en la primera, la matriz del elemento se desarrolla para un elemento característico que represente a todos los demás elementos, lo cual nos llevara a una forma simbólica. En la segunda fase se utiliza la formula general o simbólica del elemento representativo, para generar entonces las matrices de todos los elementos obteniendo valores específicos para cada matriz.

➤ **Ensamble de las Ecuaciones de los Elementos.**

La discretización en elementos finitos divide el dominio de solución en elementos simples. Para cada elemento las ecuaciones de elemento finito pueden ser escritas o sustituidas por valores numéricos en las formulas para cada tipo de elementos. El principal concepto en el proceso de ensamble es que un nodo común entre varios elementos, su solución nodal es igual para cada elemento dividido por dicho nodo. De este modo contribuye al grado de libertad de todos los elementos adyacentes que deben ser añadidos de manera conjunta. En general se puede identificar una serie de pasos a seguir para ensamblar elementos:

- ⊕ Asignar un número distinto a cada nodo perteneciente a cada elemento.
- ⊕ Identificar los nodos de cada elemento, lo cual dará un vector de posición dentro de la matriz global.



- ⊕ Para el primer renglón, la localización tendrá en el renglón índice al primer nodo y en cada columna se indica la posición de cada uno de los nodos. y así sucesivamente para los demás, para finalmente obtener una matriz global de  $n \times n$ , donde  $n$  será equivalente al número de nodos que se tenga en el dominio discretizado y multiplicado por el número de grados de libertad que se tenga en cada nodo.
- ⊕ Se sustituye cada posición del vector de posición, en la posición de la matriz global, cada uno de sus valores correspondientes a cada uno de los elementos. Posteriormente se suman o se restan los valores que coincidan en la posición de la matriz global.

➤ **Condiciones de Frontera.**

Una variedad de condiciones de frontera están especificadas para distintos problemas. Para problemas de armaduras, algunos nodos están localizados en los soportes, los desplazamientos en esos nodos deben ser cero. Para problemas de flujo de calor las condiciones deben satisfacerse a lo largo de las fronteras especificando temperatura, convección, aislamiento o flujo de calor. Para problemas de análisis de esfuerzos, aplicación de cargas en una cara mientras existen soportes fijos, etc. Las condiciones que se involucran en el sistema se denominan condiciones de frontera. En el FEM, algunas de las condiciones de frontera son incorporadas directamente en las ecuaciones de los elementos. A estas condiciones se les conoce como: *Condiciones de Frontera Esenciales* ( $C_e$ ). Las condiciones que no son incorporadas directamente en las ecuaciones de los elementos, se les conoce como: *Condiciones de Frontera Naturales* ( $C_n$ ).

$$\begin{array}{ll}
 \text{CFEsenciales} & C_e = u(x, y) \\
 \text{CFNaturales} & C_n = \frac{\partial u(x, y)}{\partial x}
 \end{array} \dots\dots\dots (A1.1)$$

En el ensamble el proceso se asume que los grados de libertad (GDL) son desconocidos. Sin embargo debido a las condiciones de frontera esenciales algunos de estos grados de libertad deben tener un valor de cero u otro valor especificado. Por lo tanto, la introducción de las condiciones de frontera esenciales, involucran la sustitución de los valores en el vector de variables nodales. Al introducir estas condiciones de frontera, provoca que el sistema global, es decir el ensamble global, se vea reducido de acuerdo a los valores que se conozcan en las condiciones. Si se conocen los nodos en los cuales se tiene el valor de condición de frontera en ese mismo número se verá reducido el sistema global.

➤ **Solución Nodal de las variables.**

La solución del sistema global es una solución nodal, debido a que se obtiene la solución por cada nodo, dependiendo de los grados de libertad de cada uno de ellos. Existen varios métodos de solución del sistema de ensamble global como son: Solución Lineal de ecuaciones, descomposición de Choleski, método de gradiente conjugado, multiplicadores de Lagrange, función de penalización, etc. Cada uno de estos métodos de solución se utiliza dependiendo de la complejidad del sistema analizado. El más común y utilizado es la solución lineal de ecuaciones, por su sencillez tanto de aplicación como de programación. Utilizando la solución lineal, aplicando una matriz inversa al vector  $d$ , donde La solución nodal global estará dada, introduciendo los valores conocidos de los grados de libertad, al vector de solución “ $d$ ”.

$$d = K^{-1}R \dots\dots\dots (A1.2)$$

➤ **Postproceso o relación de las cantidades para cada elemento.**

El postproceso se refiere, a la obtención de cantidades particulares como lo son: el esfuerzo y la deformación, particularmente su distribución en el modelo de análisis. Estas cantidades se obtienen a partir de la solución nodal, y se calculan para cada elemento generado tras la discretización del modelo.



## ANEXO 2.

### A2. 1. ESFUERZO.

Las fuerzas internas son producidas en un cuerpo cuando está sujeto a cargas externas. Esas fuerzas internas son caracterizadas en términos de esfuerzos. El esfuerzo en un punto P es definido pasando la sección de un plano a través de un punto y considerando fuerza por unidad de área en un elemento diferencial. Denotando el área de este elemento diferencial como  $\Delta A$  y la fuerza como  $\Delta F$ , el vector de esfuerzo en el punto P del plano del cual su vector normal es  $n$ , se escribe como:

$$t_n(P) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad \dots\dots\dots (A2.1)$$

El esfuerzo normal y de corte son escritos considerando las componentes de la fuerza en las direcciones del plano, normal ( $\square F_n$ ) y tangencial ( $\square F_t$ ) como sigue:

Esfuerzo normal:  $\sigma_n(P) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \quad \dots\dots\dots (A2.2)$

Esfuerzo de corte:  $\tau_n(P) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_t}{\Delta A} \quad \dots\dots\dots (A2.3)$

La definición de esfuerzo está íntimamente ligada a la sección del plano caracterizado en términos del vector normal "n". Ya que un número infinito de planos pueden pasar por un punto P dado, el estado de esfuerzo en el punto será claramente el estado en la sección del plano considerado. La usual práctica es definir el esfuerzo en términos de planos normales quienes están a lo largo de las direcciones coordenadas. Así en un sistema coordenado los esfuerzos en un plano normal son por ejemplo.

Esfuerzo:

$$\sigma_x(P) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} ; \sigma_y(P) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} ; \sigma_z(P) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad \dots\dots\dots (A2.4)$$

Esfuerzo cortante:

$$\tau_x(P) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} ; \tau_y(P) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} ; \tau_z(P) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad \dots\dots\dots (A2.5)$$

Similarmente se puede definir los esfuerzos en planos normales quienes están a lo largo del eje Y (plano XZ) y a lo largo del eje Z (plano XY). Las componentes del estado de esfuerzos en un punto P pueden ser descritas en términos de nueve componentes de esfuerzo:

Vector de esfuerzos en el plano con un normal a lo largo del eje X:  $t_x = (\sigma_x \quad \tau_{xy} \quad \tau_{xz})^T \quad \dots (A2.6)$

Vector de esfuerzos en el plano con un normal a lo largo del eje Y:  $t_y = (\tau_{yx} \quad \sigma_y \quad \tau_{yz})^T \quad \dots (A2.7)$

Vector de esfuerzos en el plano con un normal a lo largo del eje Z:  $t_z = (\tau_{zy} \quad \tau_{zy} \quad \sigma_z)^T \quad \dots (A2.8)$

Estas componentes de esfuerzos se pueden ver en la figura A2.1 en un elemento diferencial, aquí se observa que en las tres caras escondidas, los vectores normales van en dirección opuesta a las mostradas en la figura.



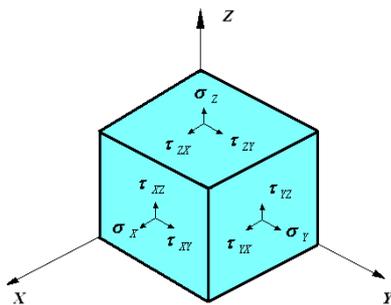


Fig. A2.1. Estado de esfuerzos en un elemento cúbico diferencial.

Escribiendo los vectores de esfuerzo en forma matricial, se denomina Tensor de Esfuerzos, con 9 variables de esfuerzo, y se define como:

$$S = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \dots\dots\dots (A2.9)$$

Usando la condición de equilibrio de momentos, podemos observar que las componentes del esfuerzo cortante son iguales

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad \dots\dots\dots (A2.10)$$

Así el tensor S de esfuerzos, es un tensor simétrico y donde hay únicamente 6 componentes de esfuerzo para resolver.

**Direcciones principales y Esfuerzos principales.**

Las direcciones principales están en dirección del vector normal unitario para el plano donde no hay esfuerzo cortante y así el esfuerzo normal es máximo. Los términos fuera de la diagonal principal en el tensor de esfuerzos S son esfuerzos cortantes, los que están en la diagonal principal del tensor siguen la dirección de los planos principales y son los esfuerzos principales. Así los esfuerzos y direcciones principales pueden ser determinados resolviendo el siguiente problema de Eigenvalores:

$$(S - \sigma I) n_p = 0 \quad \dots\dots\dots (A2.11)$$

Donde  $\sigma$  es un esfuerzo principal, I es una matriz identidad de 3x3 y  $n_p$  es un vector normal al plano principal. Los eigenvalores son determinados por un determinante  $\text{Det}(S - \sigma I)$ , para cada eigenvalor le corresponde un eigenvector y es determinado resolviendo la ecuación de arriba para  $n_p$ . Los esfuerzos principales son ordenados acorde a sus valores algebraicos: Máximo:  $\sigma_1$ , Intermedio:  $\sigma_2$  y Mínimo:  $\sigma_3$ .

**A2.2. CRITERIOS DE FALLA.**

El esfuerzo ultimo y de cedencia en ingeniería de materiales son determinados mediante exámenes a probetas cargadas en una dirección. El uso de esta información general para sólidos tridimensionales, se puede convertir el estado de esfuerzos tridimensional en un valor equivalente que representa los esfuerzos de falla de un cuerpo. Los tres criterios de esfuerzos de falla más comúnmente usados son: criterio de Tresca, criterio de von Mises y criterio de Mohr. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de estos criterios mencionados.

➤ **Criterio de Tresca.**

El criterio de esfuerzo cortante máximo es mejor conocido como criterio de Tresca. Acorde a este criterio, la falla del material ocurre cuando el máximo esfuerzo cortante en algún plano en el material, alcanza el valor de esfuerzo cortante determinado en una prueba de tensión uniaxial. Así acorde al criterio de falla del cortante máximo, el esfuerzo de falla ocurre cuando:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_f}{2} \quad \dots\dots\dots (A2.12)$$



Donde  $\sigma_1$  es el esfuerzo principal máximo y  $\sigma_3$  es el esfuerzo principal mínimo. En una prueba uniaxial  $\sigma_1$  es el esfuerzo axial aplicado y  $\sigma_3 = 0$ ; por lo tanto el máximo esfuerzo cortante es  $\sigma_f / 2$ , donde  $\sigma_f$  es el esfuerzo de falla del material. Usando este criterio el factor de seguridad se define como:

$$F.S. = \frac{\sigma_f / 2}{\tau_{\max}} = \frac{\sigma_f}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad \dots\dots\dots (A2.13)$$

➤ **Criterio de von Mises.**

Este criterio es el más comúnmente utilizado como criterio de falla en metales. Este asume que el esfuerzo de falla ocurre cuando el valor del esfuerzo cortante es igual al esfuerzo cortante octaédrico en cedencia en una prueba de tensión uniaxial. Un plano octaédrico es un plano que tiene ángulos iguales en dirección con el esfuerzo principal. El esfuerzo cortante en un plano octaédrico es conocido como el esfuerzo cortante octaédrico. Usando la transformación de esfuerzos para un plano inclinado, se puede observar un plano octaédrico. Bajo esta condición el esfuerzo cortante octaédrico se puede expresar en términos de las componentes de esfuerzo normal y cortante del tensor de esfuerzos, como:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad \dots (A2.14)$$

Usando esta ecuación, el esfuerzo cortante octaédrico en una prueba de tensión uniaxial, se tiene que:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{2 \sigma_f^2} = \sqrt{2}/3 \sigma_f \quad \dots\dots\dots (A2.15)$$

Así organizando el criterio de von Mises, el esfuerzo de falla ocurre cuando, la cantidad de la izquierda usualmente referida como el *esfuerzo efectivo de von Mises* y denotado como  $\sigma_E$ , mediante una simplificación tiene:

$$\sigma_E = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad \dots (A2.29)$$

Usando este criterio el factor de seguridad se define como:

$$F.S. = \sigma_f / \sigma_E \quad \dots\dots\dots (A2.16)$$

➤ **Criterio de Mohr.**

En materiales frágiles la falla en pruebas de tensión y compresión son distintas. Acorde al criterio de Mohr, la falla de un material frágil es predicha cuando:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{tf}} - \frac{\sigma_3}{\sigma_{cf}} = 1 \quad \dots\dots\dots (A2.17)$$

Donde  $\sigma_1$  es el esfuerzo principal máximo,  $\sigma_3$  es el esfuerzo principal mínimo,  $\sigma_{tf}$  es el esfuerzo de falla en una prueba de tensión uniaxial y  $\sigma_{cf}$  es el esfuerzo de falla en una prueba de compresión uniaxial. Los esfuerzos  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  deben tener su propio signo, así los esfuerzos  $\sigma_{tf}$  y  $\sigma_{cf}$  deben ser siempre positivos dentro de (A3.17). Usado este criterio el factor de seguridad se define como:

$$F.S. = \frac{1}{(\sigma_1 / \sigma_{tf}) - (\sigma_3 / \sigma_{cf})} \quad \dots\dots\dots (A2.18)$$



---

## ANEXO 3.

### A3.1. DISEÑO DE PIEZAS PLÁSTICAS.

El diseño estructural de una pieza concebida para ser transformada en plástico, puede empezar por el análisis de cargas de la aplicación en cuestión. Conociendo el tipo y la magnitud de las solicitaciones se puede realizar un estudio mecánico, de este modo se obtiene un pre-dimensionado y un cálculo aproximado de los espesores. Estas indicaciones que valdrían para el diseño en general de materiales, deben ir acompañadas de otras que se utilizan de forma exclusiva para el diseño con materiales plásticos.

Otras consideraciones como son la uniformidad de espesores en las diferentes zonas de la pieza, la facilidad de desmoldeo, la capacidad de la pieza a ser llenada de tal modo que el material fundido pueda acceder a todas las zonas de la cavidad del molde de forma uniforme y evitar al máximo los defectos provocados por líneas de unión, atrapes de aire, zonas con material frío, etc., serán especialmente estudiadas cuando se esté diseñando la pieza para ser fabricada en un material plástico.

#### ESPESOR DE LAS PAREDES.

Podemos generalizar y decir que cuanto más regulares sean los espesores de la pieza, menos problemas tendremos en los procesos de inyección y post-inyección. En el caso de que existan espesores de pared diferentes, hay que realizar el cambio de una dimensión a otra de la forma lo más gradual posible. Esta regularidad en el diseño nos ayuda a evitar turbulencias de flujo importantes que se producirían durante el llenado de la pieza como se muestra en la figura A3.1. No hay que olvidar que las turbulencias en cualquier caso dificultan una ordenación entre las diferentes cadenas moleculares y por tanto provocan una orientación que no es la más idónea para que la pieza trabaje al máximo rendimiento.

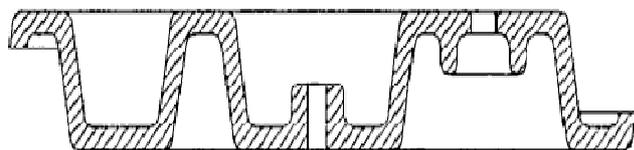


Fig. A3.1. Sección de una pieza con espesor único.

No hay que olvidar que la pieza que se está diseñando, va a ser obtenida mediante un proceso de transformación por inyección de termoplásticos. Este proceso nos obliga a definir en la pieza un punto por donde va a penetrar el material en estado fundido.

En la mayoría de los casos, es aconsejable situar el punto de inyección en la zona gruesa de la pieza. De este modo se asegura en mayor medida el llenado de la cavidad, manteniendo los conductos por donde pasa el material, abiertos el mayor tiempo posible. Hay que tener en cuenta también que durante el proceso de post-inyección se van a producir en la pieza fenómenos de contracción, producidos por ordenaciones posteriores de las cadenas poliméricas. En las zonas donde las paredes tengan mayor grosor es donde se producirán porcentajes de contracción más altos, es por ello que es importante que estas zonas estén cerca del punto de inyección y reciban material fundido durante el mayor tiempo posible y puedan compensar la contracción producida.

En el caso contrario podrían darse en la pieza defectos como piezas faltadas o zonas internas vacías de material, además de posibles problemas de rechupes o fuertes tensiones internas, provocadas por las diferentes contracciones que tienen lugar cuando partimos de espesores muy distintos en zonas cercanas. La selección de un espesor nominal depende también del plástico con el que va a realizar la pieza. En el llenado van a influir de manera decisiva las propiedades viscosas del material en estado fundido. Unos espesores recomendados los podemos observar para cada tipo de plástico en la tabla A3.1.



Plástico	Espesor		
	mínimo(mm)	medio(mm)	máximo(mm)
Resina Acetática	0,38	1,6	3,2
ABS	0,76	2,3	3,2
Acrílicos	0,65	2,4	6,5
Poliamidas	0,4	1,6	9,0
Policarbonatos	1,0	2,5	9,5
Poliuretano baja densidad	0,5	1,5	6,5
Poliuretano alta intensidad	0,9	1,5	6,5
Polipropileno	0,6	2,0	8,0
SAN	0,7	1,6	6,5
PVC	1,0	2,5	9,5

Tabla A3.1. Espesores de pared para distintos materiales.

En el aspecto económico, el tiempo del ciclo de inyección de la pieza, tiene una importancia relevante para el costo final de la misma. En un ciclo de inyección, el periodo correspondiente al tiempo de enfriamiento de la pieza ocupa más de un 60 % del tiempo total. Es importante saber pues, que el tiempo de enfriamiento depende exponencialmente del espesor de la pieza. Con esto queremos remarcar que con espesores de paredes delgadas no se consigue simplemente un ahorro de material, sino que además y ello es más importante, conseguimos una importante mejora en el tiempo de producción de la pieza y consecuentemente una importante reducción en el costo final.

El diseño debe intentar en función de las circunstancias, adaptarse a espesores no superiores a 3 mm. Para mantener este límite se pueden utilizar recursos como son zonas con nervios o cambios de geometría, con ello no sólo mejoramos el ciclo, tal y como hemos comentado, sino que optimizamos el peso de la pieza. Por otro lado, se recomiendan espesores mínimos de trabajo de 1.2 mm. De este modo se facilita el llenado en todas las zonas de la cavidad.

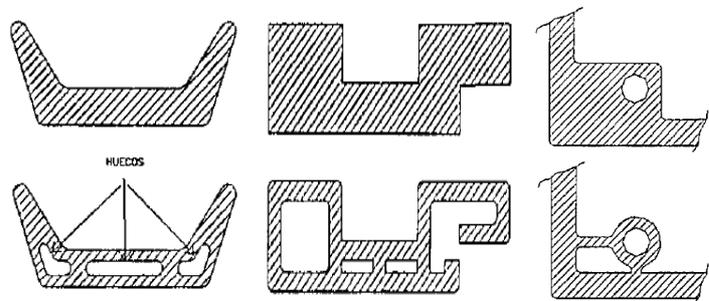


Fig. A3.2. Sección de una pieza con espesor único.

En la figura A3.2, se muestran algunos ejemplos donde los espesores gruesos son evitados mediante cambios en la geometría. Cabe recordar que zonas con importante acumulación de material, son inevitables puntos de formación de rechupes, algunos muy visibles en la superficie de la pieza.

### AGUJEROS.

Para el diseño de agujeros en las diferentes zonas de la pieza de plástico, hay que tener en cuenta las dificultades que ello va a acarrear en el momento de fabricar el molde. De modo general, podemos diferenciar tres tipos de agujeros: no pasantes o ciegos, pasantes y con escalón.

El diseño de un agujero pasante, desde el punto de vista de la construcción del molde, va a ser más sencillo y permitirá que el pasador se apoye en ambos lados del molde. Esta acción permite una mayor resistencia del pasador a las presiones internas, durante el periodo de llenado del molde.

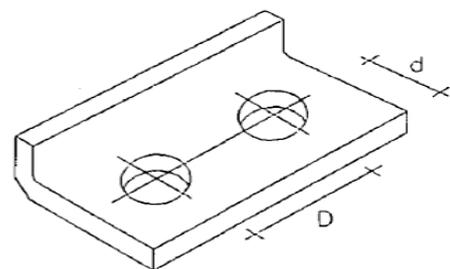


Fig. A3.3. Agujeros en una pieza plástica.

Por lo contrario, diseñar un agujero no pasante, obliga a construir un pasante más robusto, puesto que solo está apoyado en una zona del molde, teniendo siempre más posibilidades de rotura y por tanto un mantenimiento más costoso.



Es importante tener en consideración, que diseñar los agujeros con su eje paralelo al movimiento de apertura del molde, facilitará siempre la acción del movimiento de los pasantes, así pues serán más recomendados que no aquellos cuyo eje es perpendicular a los movimientos de apertura del molde. No se debe desligar el concepto de diseño de una pieza con el del diseño del molde. Este último es el que nos da la posibilidad de inyectar la pieza y por tanto de poder fabricarla.

### ÁNGULOS DE SALIDA O DESMOLDEO.

Los ángulos de salida, son aplicados a una pieza con el objetivo de facilitar su desmoldeo, como se observa en la figura A3.4. De manera general, los agujeros, las paredes y los nervios o ribs, deben tener una inclinación mínima de 1°. En particular se toma en cuenta la profundidad de las paredes donde sea importante. No diseñar la pieza con suficientes ángulos de desmoldeo puede además de no permitir la correcta extracción de la pieza, causar en la superficie la formación de arrapes o desgarro de material causados por la fricción entre el metal de la cavidad y el plástico durante el proceso de extracción.

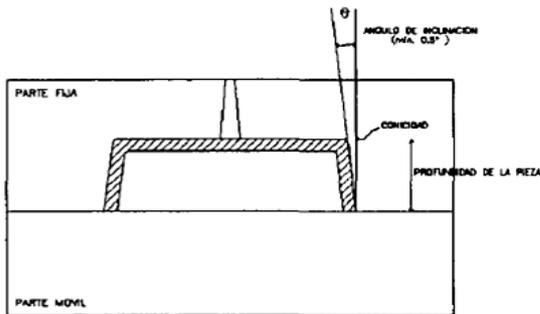


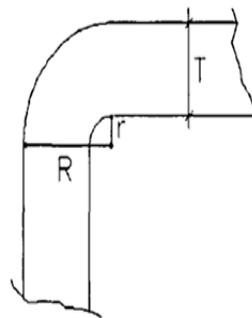
Fig. A3.4. Ángulos de salida en una pieza.

Profundidad (en mm)	Ángulos de inclinación (en mm)				
	1/4	1/2	1	1 1/2	2
10	0,004	0,067	0,17	0,26	0,35
20	0,067	0,175	0,35	0,52	0,7
30	0,131	0,26	0,51	0,78	1,05
40	0,175	0,35	0,68	1,04	1,4
50	0,218	0,43	0,85	1,3	1,75
60	0,262	0,52	1,02	1,56	2,1
70	0,305	0,61	1,2	1,82	2,45
80	0,349	0,69	1,36	2,1	2,8
90	0,392	0,78	1,53	2,34	3,15
100	0,436	0,87	1,7	2,6	3,5

Tabla A3.2. Ángulos según la profundidad de los ribs.

### REDONDEOS (ROUNDED).

El uso adecuado de radios durante el diseño, reduce de un modo importante la concentración de tensiones en la pieza. Eliminar las zonas donde se producen un elevado número de concentración de tensiones, permite realizar un modelo de constitución más fuerte y eliminar, sin duda, posibles zonas de iniciación de una fractura. En definitiva eliminando ángulos agudos en la geometría, lo que posibilitamos es una más larga vida de la pieza. Por tanto siempre que lo permita la funcionalidad de la pieza, para realizar la transición de una pared a otra utilizaremos curvas lo más abiertas posibles. En la figura A3.5, se presentan unos esquemas que muestran una serie de proporciones aptas para el diseño de curvas con materiales plásticos.



$r > 1/3T$ , pero no menos de 0,015 inc.  
Se recomienda  $r = 1/2 T$  o mayor.

$R = 3/2T$  o mayor.

El espesor ha de mantenerse entre el radio mayor y el menor

Fig. A3.5. Radios en una pieza.

### DISEÑO DE UNA TORRETA.

La mayoría de los espesores de las paredes de una pieza de plástico son insuficientes para resistir la sollicitación de un tornillo, o sencillamente no tienen una sección suficiente para alojar al elemento roscante.



Para dar lugar a la colocación de tornillos y reforzar las zonas o los agujeros donde van a ir colocados estos elementos, se diseñan torretas, que permitirán dimensiones físicas suficientes y reforzarán la zona. Incrementar simplemente el espesor no será una medida recomendable, por las razones comentadas en el apartado anteriormente. Las geometrías más utilizadas en torretas, se muestran en la figura A3.6. El uso de nervios es muy frecuente junto a estos elementos de diseño.

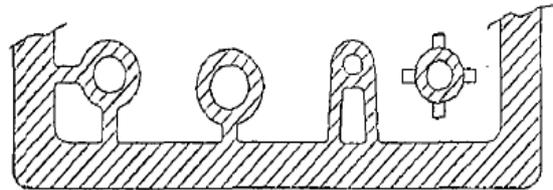


Fig. A3.6. Distintas formas de una Torreta.

### NERVIOS o COSTILLAS.

Tal y como se ha comentado en los puntos anteriores, en el proceso de diseño de una pieza, es importante utilizar espesores delgados, no solo por el ahorro de material sino para obtener mejores tiempos de ciclo de la pieza a inyectar. Es por ello que en muchos casos utilizaremos zonas nervadas, que reforzarán la geometría de la pieza sin necesidad de aumentar la masa y nos permitirán llegar a mayores estados de rigidez sin necesidad de aumentar el espesor. Un esquema del diseño de un nervio se presenta en la figura A.3.7.

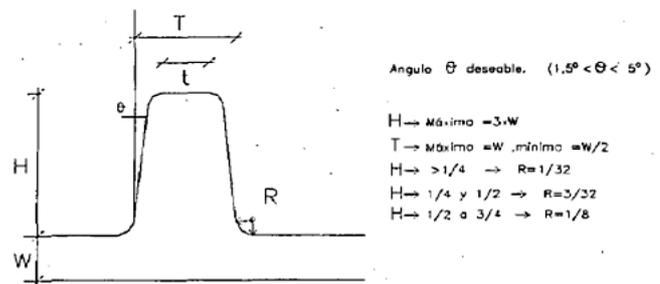


Fig. A3.7. Dimensiones de un nervio en una pieza.

- ❖ Estos nervios se colocarán generalmente en partes de la pieza donde la estética de las mismas no sea relevante. Para máximo aprovechamiento se situarán en zonas donde la estructura reciba solicitaciones máximas o donde se produzcan flechas máximas. Para un correcto diseño deberemos tener en cuenta los siguientes conceptos:
- ❖ Los radios entre el nervio y la pared de la pieza, deberán ser tales que no faciliten una importante acumulación de material, la cual podría dar lugar a problemas de rechupe en la pieza durante el periodo de post-inyección.
- ❖ Los nervios han de estar diseñados con unos ángulos de desmoldeo adecuados, que permitan una fácil extracción de la pieza.
- ❖ Una proporción geométrica de los espesores que nos permita distribuir las zonas de material de modo homogéneo para que la diferencia de los tiempos de enfriamiento en cada zona sean lo menos posible.
- ❖ Se recomiendan cambios graduales en cuanto a la geometría se refiere, en las diferentes zonas de los nervios. De este modo se facilita el llenado del nervio, se reducen los lugares de concentración de tensiones y se evitan acumulación de gases u otros defectos derivados de un llenado incorrecto. Las zonas donde confluyen los nervios, son lugares de rápida circulación del flujo.

Este efecto nos puede producir un llenado de la pieza que a veces, no es el esperado y puede dar lugar a líneas de reunión en sitios no deseados.

### ASPECTOS DE LA INYECCIÓN ASOCIADOS AL DISEÑO.

Un diseño para una pieza de plástico que posteriormente va a ser inyectada, se ha de realizar con la idea preconcebida de que la pieza se ha de transformar mediante el llenado de una cavidad. Esta cavidad formara parte de un molde de inyección, el cual dispondrá de colada, canales, punto de inyección, plano de partición, además de salidas de gases, nodos, partes móviles, etc.



## DISPOSICIÓN DEL PUNTO DE INYECCIÓN.

Ubicar el punto por donde el fluido penetrará en la cavidad es de gran importancia no solo para obtener una buena calidad de la pieza inyectada y posibilitar un llenado adecuado de la misma, sino también para conseguir mejores tiempos de llenado y de este modo reducir los tiempos de fabricación. Controlar la temperatura a la cual la masa llega en estado fundido a los diferentes puntos del molde, nos permitirá conocer la viscosidad del plástico en estos puntos y por lo tanto la facilidad con la que se podrá reproducir la superficie del molde. Este parámetro nos dará una idea de la calidad superficial que vamos a obtener. A continuación, detallamos diferentes consideraciones a tener en cuenta para seleccionar la ubicación del punto de inyección:

El punto de inyección, siempre y cuando nos lo permita la geometría de la pieza, se situará cerca del centro geométrico de la misma. De este modo se consigue un llenado equilibrado en presión, temperatura y tiempo, en las diferentes zonas de la cavidad.

El punto de inyección se situará en las cercanías de la superficie vista de la pieza. Se pretende de este modo que el material llegue con temperatura alta y reproduzca con mejor calidad esta superficie. En el caso de que esta superficie vaya texturizada esta ubicación será importante para reproducir mejor el grabado. Es importante tener en consideración que en la zona donde vaya ubicada la entrada, obtendremos una señal proveniente de la marca que deja la boquilla de la inyectora. Esta señal se podrá disimular en mayor o menor grado, pero siempre será más fácil ubicar esta entrada en una zona que no sea visible según la funcionalidad de la pieza.

Se deberá evitar que el punto de inyección esté situado en zonas donde tenga próximos, elementos geométricos que obstaculicen la correcta circulación del fundido. Así mismo, se estudiarán las circulaciones del plástico fundido según las diferentes opciones de ubicación del punto de llenado y se tendrá en cuenta la opción que aporte menos líneas de reunión a la pieza. Una buena orientación y una libre circulación del flujo ha de permitir una buena distribución de las cadenas poliméricas y una mejora en las propiedades mecánicas de la pieza.

Sólo analizando el recorrido del plástico al llenar la cavidad según las condiciones de inyección seleccionadas, obtendremos un conocimiento de la orientación molecular, o de las fibras, en el caso de que el material vaya cargado. Este análisis, nos da paso a optimizar la respuesta dinámica de la pieza a unas tensiones externas ya conocidas. De este modo el polímero trabajará a las máximas prestaciones y podremos exigir en cada parte una buena respuesta a cada sollicitación.

## LÍNEAS DE REUNIÓN.

Como ya hemos comentado, una pieza de plástico ha de ser diseñada con el concepto de que las diferentes partes del molde serán llenadas por una masa en estado fundido. Esto implica que, cuando se encuentren dos frentes de flujo, debido a la geometría de la pieza, aparecerá una línea de soldadura. Estas líneas a veces son inevitables y otras veces pueden eliminarse moviendo el punto de inyección, cambiando el concepto de llenado o bien realizando modificaciones en la geometría. A continuación se muestra en un gráfico (figura A3.8) como se posicionan las cadenas moleculares en una línea de reunión.

Las líneas de reunión también denominadas líneas de soldadura, a nivel molecular presentan una desorientación. En esta zona el material se comporta diferente. El comportamiento mecánico de la pieza será menor por existir una heterogeneidad del material.

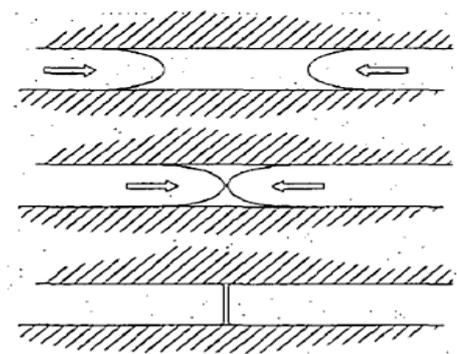


Fig. A3.8. Líneas de unión o soldadura.



En estas zonas existen pues más posibilidades de inicio de la rotura que en el resto del material. Por este motivo se intentará evitar siempre la coincidencia en el mismo punto de una línea de soldadura con zonas altamente solicitadas de la pieza. El efecto de una línea de soldadura puede minimizarse con una buena selección de los parámetros de transformación como son: una alta temperatura del molde cuando estamos transformando el material, una alta temperatura de la masa del material durante la inyección, unas adecuadas velocidades de inyección y una compactación del material adecuada.

### TOLERANCIAS.

En el diseño de piezas con plástico, obtener valores muy precisos en las dimensiones de las piezas, es extremadamente difícil y costoso. Toda exigencia que se produzca en la dirección de las dimensiones, encarecerá el estudio de la pieza y la construcción del molde. Es por ello, que en caso de no ser necesario, los valores de las tolerancias serán holgados. Las dimensiones que tome la pieza final, vendrán influenciados no sólo por el comportamiento intrínseco de cada plástico sino también por las condiciones de transformación utilizadas para la transformación de la pieza. Variables del proceso de inyección como son la temperatura de la masa del fundido, la temperatura de trabajo del molde, las presiones de inyección utilizadas o las velocidades de llenado, influirán decisivamente en estas dimensiones.

Tamaño de una pieza				
Material	25,4 mm	101,6 mm	152,4 mm	304,8 mm
ABS	0,101	0,15	0,3	0,76
POM	0,152	0,25	0,51	1,52
Acrylic	0,1	0,2	0,38	1,01
PA	0,15	0,3	0,5	1,9
PE	0,2	0,38	0,76	1,77
PP	0,17	0,3	0,6	1,5
PC	0,08	0,2	0,3	0,76
PS	0,1	0,2	0,38	1,01

Tabla A.3.3. Tolerancias según el material utilizado.

### CONTRACCIONES.

Este fenómeno que sucede en cualquier proceso de inyección con plásticos en mayor o menor grado, es la base de muchos errores cometidos en el diseño de piezas. Es por ello, que las medidas necesarias para contrarrestar este efecto, han de ser tomadas originalmente en el cálculo y diseño de la misma. Inicialmente se hará un estudio de cómo afectan las contracciones del material a la dimensión de la pieza y posteriormente se procederá a dimensionar la cavidad del molde con esta información.

Las contracciones producidas en el plástico, tal y como sucedía en las tolerancias, dependerán de las características intrínsecas del plástico y de los parámetros utilizados durante el proceso de inyección. Es importante tener en cuenta que en una misma pieza, el material plástico no contraerá igual en todas sus partes. Diferentes espesores darán lugar a diferentes tiempos de enfriamiento y a diferentes ordenamientos a nivel molecular de las márcocadenas poliméricas. Un orden diferente de las cadenas en diferentes zonas, dará lugar a diferentes grados de contracción.

Para saber cómo actuará el polímero en cada caso, deberemos de saber si se está diseñando para un plástico amorfo o un semicristalino. El grado de cristalinidad que tenga el polímero tras la transformación, influirá también en el grado de contracción que tomará la pieza. Altos grados de cristalinidad que se consiguen con lentos tiempos de enfriamiento o con aditivos nucleantes en el polímero, nos traerán siempre mayor estabilidad dimensional y mejores propiedades mecánicas a la pieza. En la dirección de llenado de la pieza y por tanto en la dirección mayoritaria de ordenación de las cadenas del polímero, tendrán lugar grados de contracción mayores que en las direcciones perpendiculares a la circulación del flujo de plástico fundido.



También se tendrá en cuenta, que en caso de diseñar una pieza para un material que vaya cargado con fibras, las contracciones serán diferentes, debido al efecto resistente que ofrece la fibra. En este caso las variaciones dimensionales en el sentido longitudinal o transversal de la fibra serán muy diferentes. En el caso de la sección longitudinal habrá menos contracción debido al efecto de la fibra, que en la sección transversal prácticamente no actuará.

<b>Contractación en %</b>	
<b>(Dirección longitudinal / transversal)</b>	
PES/PSU	0.5/0.8
ASA	0.3/0.8
SAN	0.3/0.7
ABS	0.4/0.7
POM	2/1.9
PBT	1.5/1.5
PA 6.6	0.9/0.9
PA 6	0.55/0.55

Tabla A3.4. Factores de contracción.

Debido al gran número de parámetros que influyen en la contracción, en las tablas de diseño, se trabaja con un rango de valores en función de cada material y de cada circunstancia. En la tabla A3.4. Se presentan unos valores orientativos en función del material. Tal y como se ha comentado, modificando diferentes parámetros de presión y temperatura, durante el proceso de inyección se pueden evitar mayores grados de contracción. Sin embargo, tomar las precauciones necesarias durante el diseño, facilitará posteriormente la inyección de la pieza y permitirá que los diferentes parámetros del proceso tengan unas posibilidades más amplias de trabajo. Esta holgura en los parámetros nos permite transformar la pieza con menos tensiones internas, obtener grados más altos de calidad o ajustar el ciclo para obtener mejores tiempos de producción.

### ACABADO SUPERFICIAL.

Diseñar con materiales plásticos, ofrece la posibilidad de escoger una variedad innumerable de acabados superficiales, desde superficies lisas con efectos de espejo, efectos texturizantes, pasando por acabados tipo madera y grabados de diversas formas. Hay plásticos con determinadas características, como el ASA, SAN, PMMA, PBT, etc. que facilitan una superficie brillante de la pieza.

De todos modos unos factores decisivos para alcanzar buenos brillos en la pieza, pasan por unas paredes de la cavidad del molde altamente lisas así como unos parámetros de inyección tales como la temperatura de la masa y la temperatura del molde, que faciliten al plástico fundido llenar la cavidad del molde copiando exactamente la superficie. Tal y como se comentó en el apartado referente al ángulo de desmoldeo, en el caso de que la superficie vaya texturizada, habrá que tener en cuenta la profundidad del dibujo y hacer coincidir en la medida de lo posible, la dirección del texturizado y la dirección de expulsión de la pieza.



---

## ANEXO 4.

### A4.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA CONVENCIONAL DEL SOPORTE LATERAL.

La optimización topológica es un proceso que se da de manera gradual, donde en cada iteración se debe cumplir con las restricciones impuestas al proceso. La estructura óptima se logra cuando se alcance una convergencia en los resultados, es decir cuando ya no se pueda remover más material de la estructura y no viole las condiciones impuestas.

#### SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO.

En el modelo sólido del soporte lateral, como se puede observar en la figura A4.1, existen zonas que son susceptibles de ser simplificadas (encerradas en color amarillo), es decir, zonas que no son de gran utilidad en el soporte lateral, de manera estructural, pero sí para el proceso de manufactura actual por medio del cual se fabrica. Dado que esta pieza se piensa realizar por medio del proceso de inyección de plástico, reemplazando el proceso actual, dichas zonas detectadas pueden ser removidas del modelo, llegando entonces a un dominio simplificación tal y como se muestra en la figura A4.2.

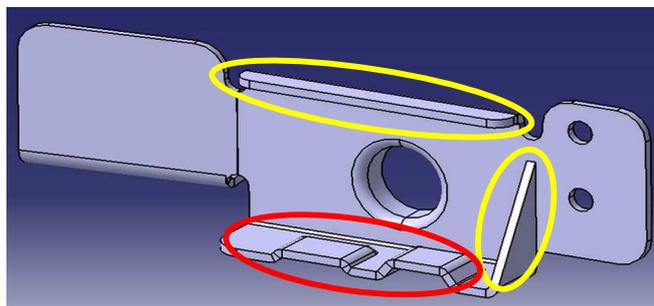


Fig. A4.1. Zonas susceptibles de simplificación.

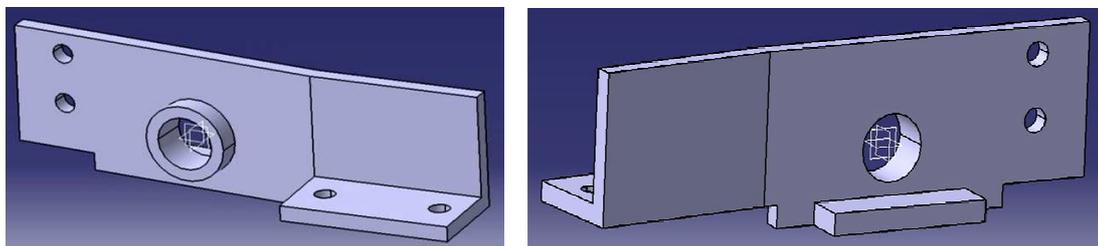


Fig. A4.2. Vista posterior y frontal del modelo ó dominio simplificado.

En la figura anterior se puede observar que en la parte posterior, en lugar de tener dos superficies donde existe contacto con otro elemento del mecanismo (encerrado en color rojo figura A4.1), lo cual proporciona 2 posiciones inicial y final de la pieza metálica original; se decidió extender dicha zona, ya que dichas posiciones se mantienen aun bajo esta extensión de material y además se logra una simplificación sin tantos cambios bruscos en la geometría que será el dominio topológico inicial. El espesor utilizado fue de 4 veces el espesor de pared mínimo del material plástico conocido como ABS, con el fin de permitir al software de optimización a utilizar (Optistruct v11), no tenga una convergencia abrupta y arroje valores incoherentes.

#### ZONAS DE DISEÑO Y NO DISEÑO.

Antes de comenzar con la optimización, se deben definir en el modelo geométrico, es decir el dominio de diseño, zonas consideradas como de diseño y no diseño.



---

**Zonas de Diseño.** Son aquellas regiones en las cuales se podrá realizar la remoción o eliminación de material, es decir son zonas libres de ser diseñadas, como su nombre lo indica.

**Zonas de No Diseño.** Son aquellas regiones de material que quedaran intactas, a las cuales no se les realiza ningún tipo de modificación o eliminación de material.

En la siguiente figura, se muestran las zonas tanto de diseño (color amarillo), así como las de no diseño en el modelo simplificado del soporte lateral (color azul), siendo estas últimas, las zonas en donde se localizan los agujeros para tornillería y el agujero por donde pasa el eje de movimiento del mecanismo.

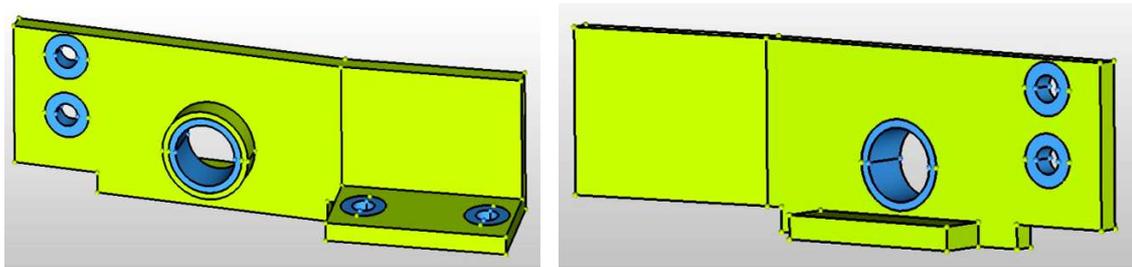


Fig. A4.3. Zonas de diseño y de no diseño.

## ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEA).

### DISCRETIZACIÓN DEL MODELO.

Se realiza la discretización del modelo, para ello se utilizó como elemento de discretización los de tipo CHEXA o hexaedros, ya que este tipo de elementos está formado por de 8 nodos y por tanto 3 grados de libertad por nodo, con lo cual guarda más información del modelo. A pesar del inconveniente del tiempo de cálculo con respecto a los tetraedros, y la generación de más elementos durante la discretización, no es de gran impacto durante el análisis.

En la siguiente imagen se muestran distintos tamaños de elemento de malla con los cuales se llega a la conclusión que el mejor para realizar la simulación de FEM es con un tamaño de elemento de 1, ya que este, se tiene una buena aproximación.

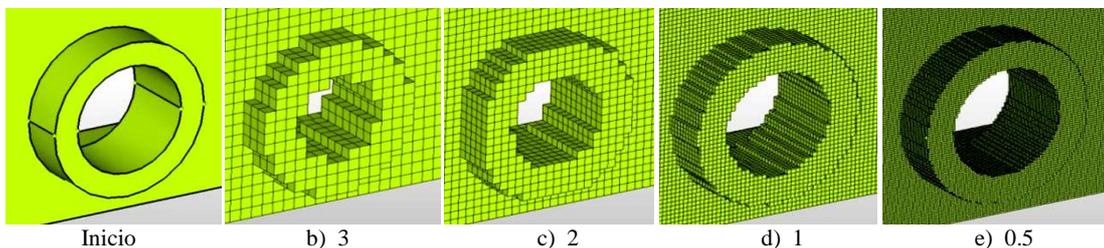


Fig. A4.4. Malla generada según el tamaño de elemento.

En la figura A4.5, se muestra el tipo de elemento utilizado y el modelo final discretizado, obteniendo: Nodos: 194188, Elementos: 164925, GDL: 607592.



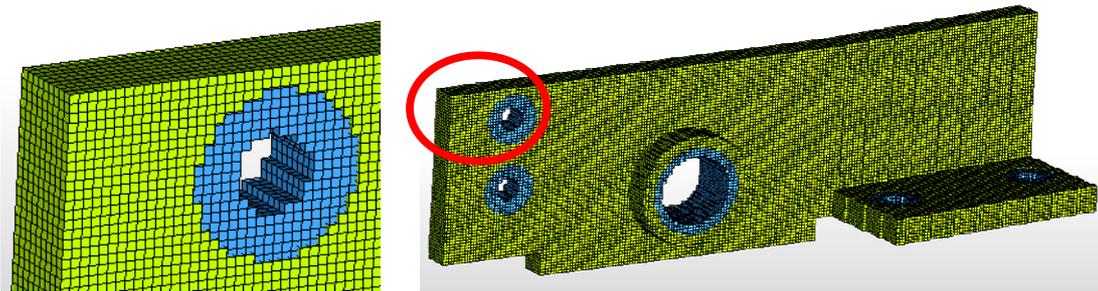


Fig. A4.5. Malla hexaédrica del modelo simplificado del soporte lateral.

### ESCENARIO DE CARGA.

En las siguientes imágenes se muestra el sistema de cargas aplicado a la pieza en análisis, en color rojo se observan las restricciones y en color azul las cargas impuestas al sistema (para los valores de carga ver capítulo 3).

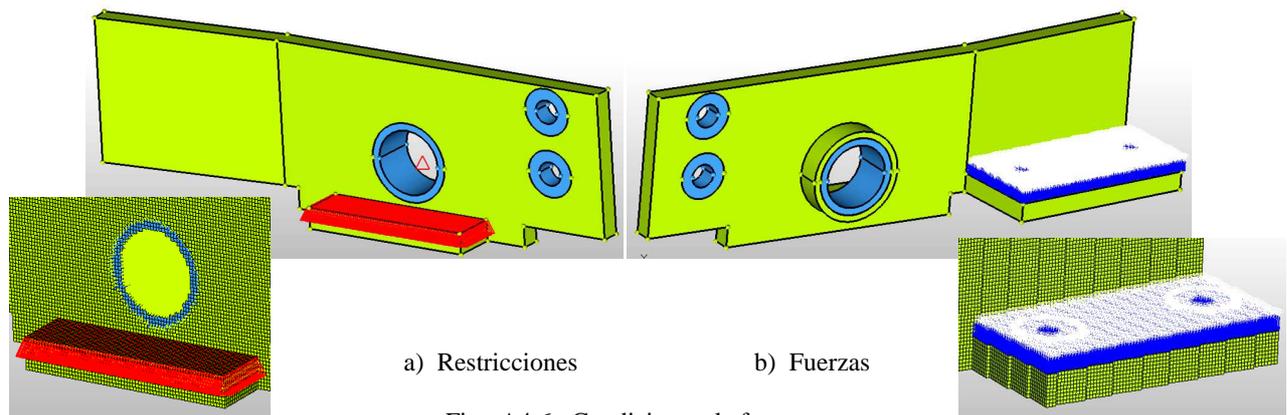


Fig. A4.6. Condiciones de frontera.

### DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZO.

Para realizar todo lo que conlleva un análisis por elementos finitos, se utilizó el software HIPERWORKS 11, versión estudiantil, y en particular su modulo RADIOSS, específico para realizar este tipo de cálculos. Las propiedades del material para realizar la simulación del soporte lateral, son del material plástico conocido como ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) y son las siguientes: densidad = 1150.5 [Kg/m<sup>3</sup>], módulo de elasticidad = 2.496 [GPa], esfuerzo de cedencia = 46.7 [MPa], coeficiente de Poisson = 0.31.

En la figura A4.7, se observan los resultados obtenidos del FEM, donde se muestra claramente las zonas de bajo y alto nivel de esfuerzos, presentados en la distribución de esfuerzos en el soporte lateral simplificado. En ellos se muestra que el esfuerzo máximo es de 53.786 [MPa], lo cual quiere decir que el soporte lateral tiene un factor de seguridad muy grande, es decir que la pieza está sobre-diseñada. Razón que permite introducir técnicas de optimización en el diseño de esta pieza.



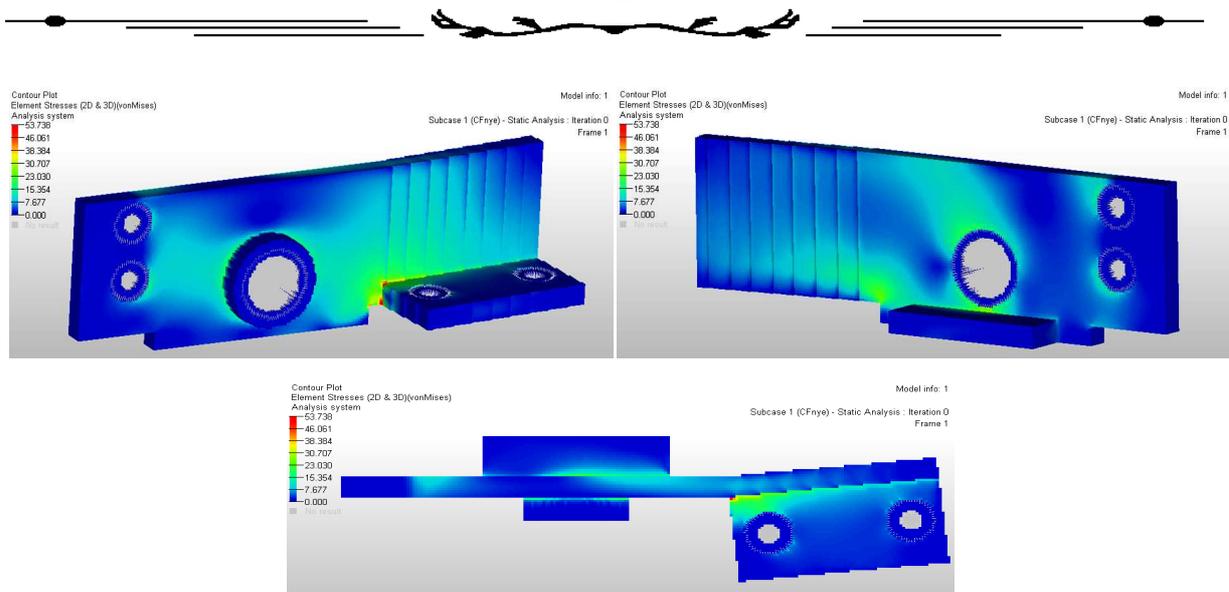


Fig. A4.7. Distribución de esfuerzos.

## PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.

Al obtener la distribución de esfuerzo de la pieza en análisis, se procede entonces a iniciar con el proceso de optimización. Dicho proceso se realizó con el software HYPERWORKS v11 versión estudiantil, y en particular con su módulo específico para este tipo de soluciones de optimización topológica llamado OPTISTRUCT, a través de un análisis de densidad de elementos. Para realizar este análisis se definen entonces: la variable de diseño, función objetivo y las restricciones necesarias para el proceso de optimización.

La VARIABLE DE DISEÑO, es el volumen, ya que lo que se requiere es tener una pieza óptima que sea más ligera que la actual. La FUNCIÓN OBJETIVO, impuesta en este proceso de optimización topológica es la búsqueda del valor mínimo de la variable de diseño, es decir minimizar el volumen. Las RESTRICCIONES, dadas para el proceso, están en función del material plástico utilizado (ABS), ya que la restricción impuesta al proceso de optimización, consiste en no sobrepasar el valor del esfuerzo de cedencia del material ( $\sigma_{ced}$ ). Con esto aseguramos un buen desempeño de la estructura óptima. Estos tres parámetros de optimización, permitirán obtener una estructura óptima para el material plástico ABS, con ello se garantiza que dicha estructura óptima, soporte las mismas condiciones que la pieza actual, además de tener un menor volumen y contar con un bajo valor de factor de seguridad, llevando nuestra estructura al límite.

## ANÁLISIS DE DENSIDAD.

El software utilizado, realiza el proceso de optimización a través de la técnica denominada algoritmos genéticos y presenta los resultados tras cada iteración, mediante una escala normalizada de densidades para definir los elementos. La escala se encuentra definida en un rango comprendido entre 0.0 y 1.0. En el límite inferior 0.0 se encuentran los elementos que no tengan densidad ni rigidez, es decir elementos que serán removidos de la estructura y en el límite superior 1.0 se encontrarán los elementos que tengan de densidad y rigidez normal, es decir los elementos que no serán removidos de la estructura. Dicha escala puede ser subdividida en un número de rangos que el diseñador necesite para tener una mejor visualización de los resultados. El software en su rutina interna y propia para este proceso, le asigna un valor de densidad a cada elemento, con base en la escala antes mencionada, obteniendo así tras cada iteración un gráfico de distribución de densidad de elementos.



La optimización topológica del soporte lateral, se realiza obteniendo el volumen mínimo, utilizando el material plástico ABS, así como algunos de sus parámetros tales como: el espesor de pared mínimo ( $e_{\text{mín ABS}}$ ) de 1.9 [mm] y su esfuerzo de cedencia ( $\sigma_{\text{ced ABS}}$ ) de 46.7 [MPa], además de las condiciones del espesor inicial el cual es tres veces el espesor de pared mínimo del ABS (7.6 [mm]).

En la siguiente tabla, se muestra la evolución que sufre la estructura tras cada iteración realizada. Cada imagen mostrada es indicada reconocida como resultado de topología. En ellas se observa que los elementos que cuentan con un valor de densidad de 1.0, son los mostrados en color rojo, lo que indica que dichos elementos cuentan con una densidad normal o igual a la que tenían originalmente y los elementos con valor de densidad 0.0, se muestran en color azul oscuro, es decir son los elementos que pueden ser removidos de la estructura.

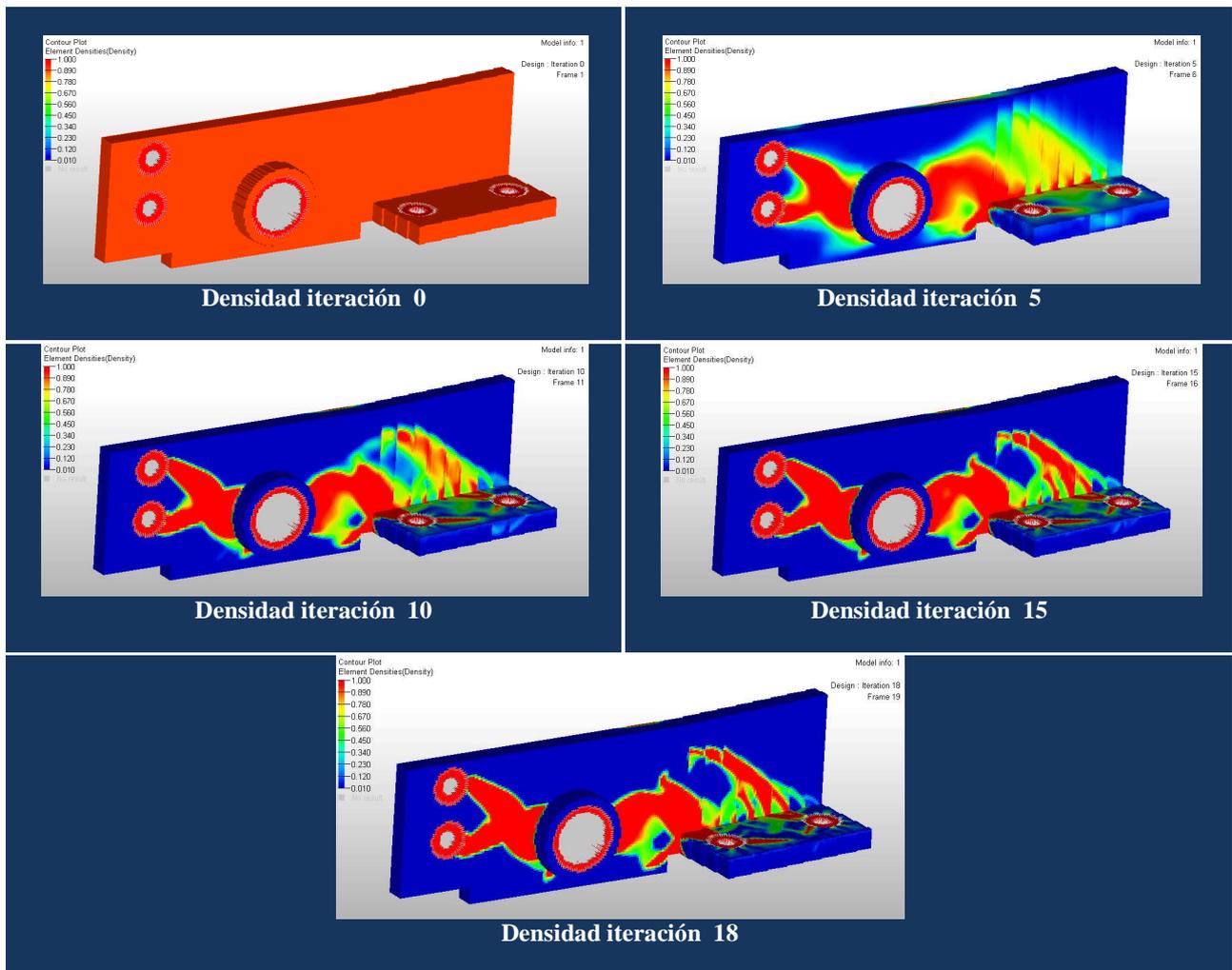


Fig. A4.1. Densidad iteración 18, con elementos mínimos que satisfacen el espesor de pared.

En esta tabla se puede observar claramente que en la iteración 18, se da la convergencia, es decir que no puede remover más material, sin violar las restricciones impuestas al proceso de optimización topológica. En dicha iteración cumple con el criterio de diseño impuesto, no rebasar el esfuerzo de cedencia del material y también se observa claramente la disminución de material en la estructura.



---

## ESTRUCTURA ÓPTIMA TOPOLÓGICA.

En las siguientes imágenes se muestra la geometría óptima topológica, obtenida en este proceso para el material plástico ABS. Se puede observar claramente que, por un lado la geometría es compleja geoméricamente, y por otro dicha estructura es muy compleja para fabricarla mediante un proceso de inyección de plástico o cualquier otro proceso de manufactura. Es por ello que se debe llevar a cabo un proceso de adecuación para manufactura de dicha estructura óptima.

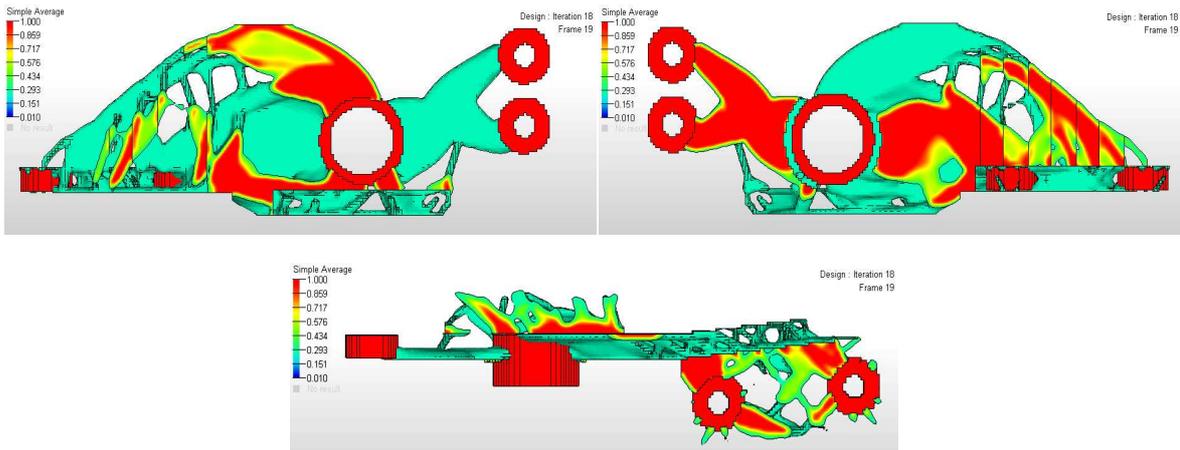


Fig. A4.8. Densidad de la iteración 18, donde se observan vistas de la estructura óptima tridimensional, con zonas de no diseño.

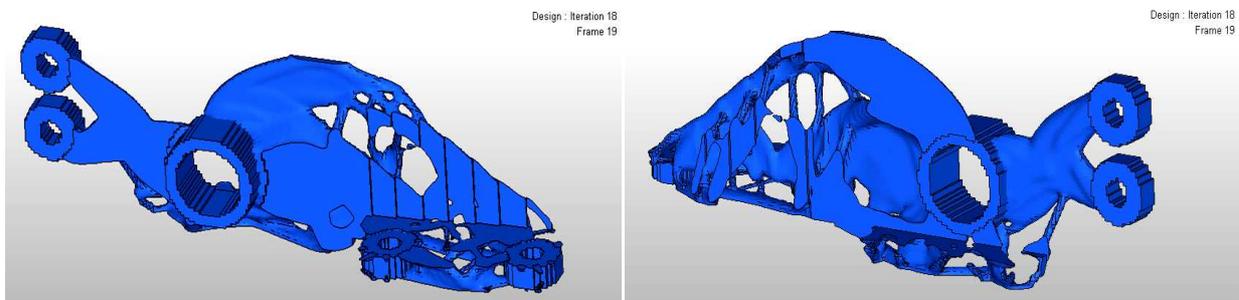


Fig. A4.9. Estructura óptima con zonas de no diseño (isométrico).

Es importante mencionar que las geometrías obtenidas mediante este tipo de técnicas, carece siempre de una forma regular e incluso puede presentar discontinuidades en una o varias zonas de la estructura óptima, esta característica por sí sola es muy importante y debe ser tomada en cuenta durante la interpretación de los resultados, ya que se debe intentar que esta pueda ser manufacturable.



**ANEXO 5.**

**A5.1 RESULTADOS DEL PROCESO DE ADECUACIÓN.**

A continuación se presentan distintas imágenes de los resultados obtenidos de la adecuación para manufactura, para los tres materiales plásticos propuestos. En la tabla A5.1, se observan imágenes de la estructura óptima topológica, es decir no adecuada, para los distintos materiales propuestos.

ESTRUCTURA ÓPTIMA TOPOLÓGICA ( NO ADECUADA )			
<p>ACRILONITRILLO BUTADIENO ESTIRENO  (ABS)</p>			
<p>POLICARBONAT O (PC)</p>			
<p>POLIAMIDA 6,6 (PA66)</p>			

Tabla A5.1. Imágenes de la estructura óptima para distintos materiales plásticos.



En la tabla A5.2, se observan imágenes de la estructura óptima topológica lograda tras el proceso de adecuación para manufactura, para uno de los distintos materiales propuestos.

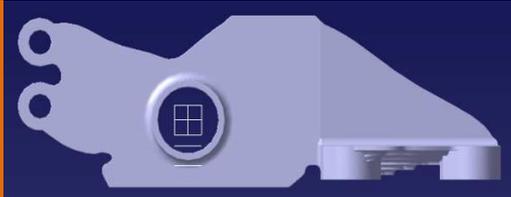
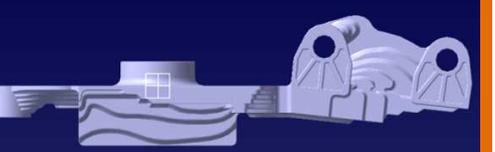
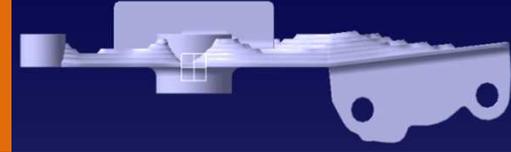
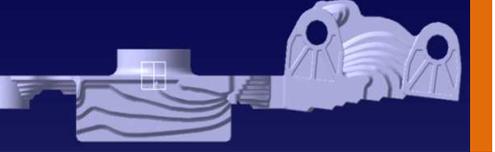
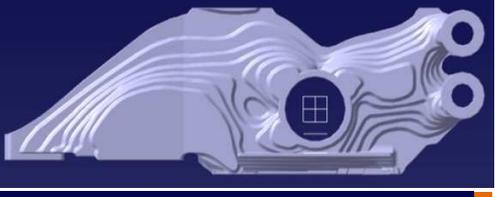
ESTRUCTURA ÓPTIMA ADECUADA PARA MANUFACTURA ( EOAM )			
ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO  (ABS)			
			
POLICARBONAT O (PC)			
			
POLIAMIDA 6,6 (PA66)			
			

Tabla A5.2. Imágenes de la estructura óptima adecuada para manufactura (EOAM), para distintos materiales plásticos.



---

## ANEXO 6.

### A6.1 PROPUESTA DE GENERACIÓN DEL MOLDE PARA LA ESTRUCTURA ÓPTIMA ADECUADA PARA MANUFACTURA.

Se muestran imágenes del molde propuesto para inyectar la pieza óptimo-manufacturable, tomando en cuenta factores como es la dirección de extracción, número de corazones, etc.

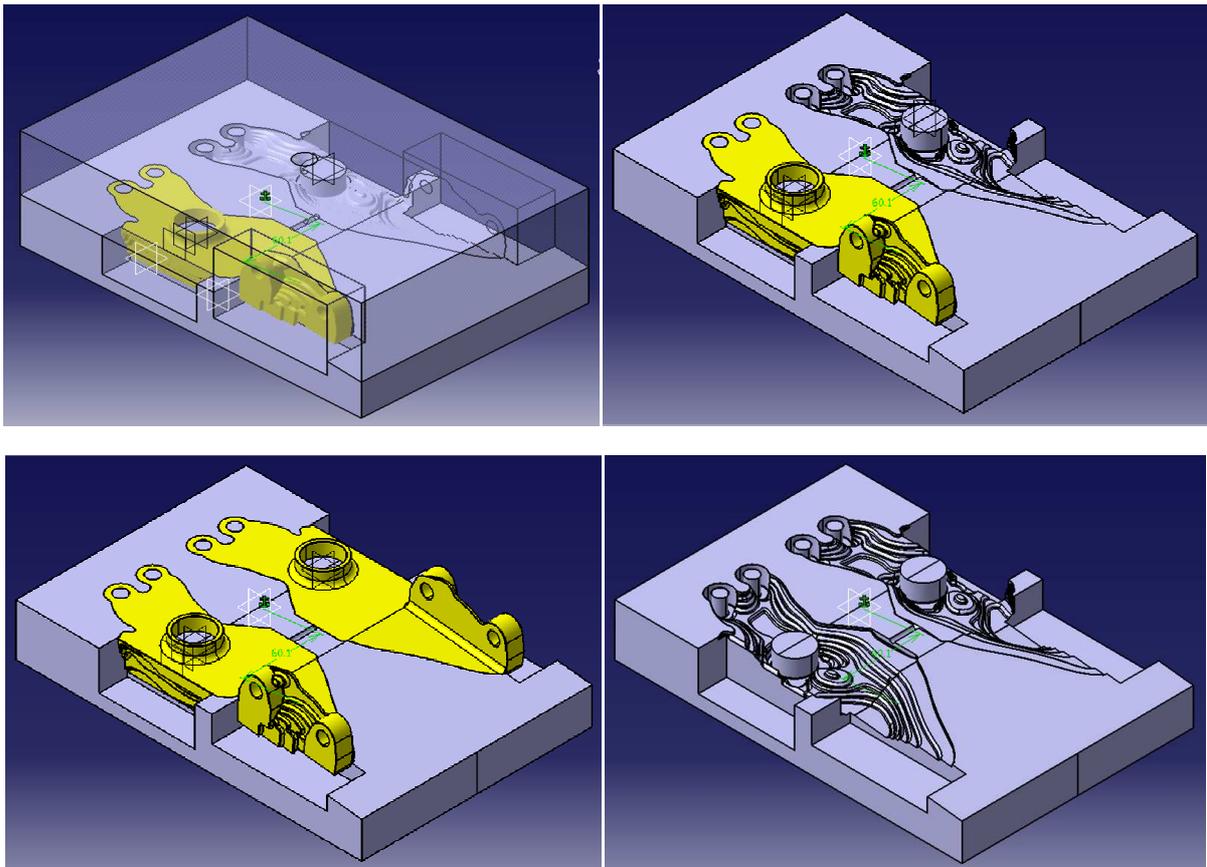


Fig. A6.1. Vistas del molde propuesto (isométrico).

Como se puede observar en la figura anterior, se propone que el molde sea fabricado para dos cavidades y con ello obtener la parte derecha y su simétrico izquierdo de una sola vez.

En la figura A6.2, se muestran los insertos que pueden interactuar en el molde, para la creación de la pieza plástica.



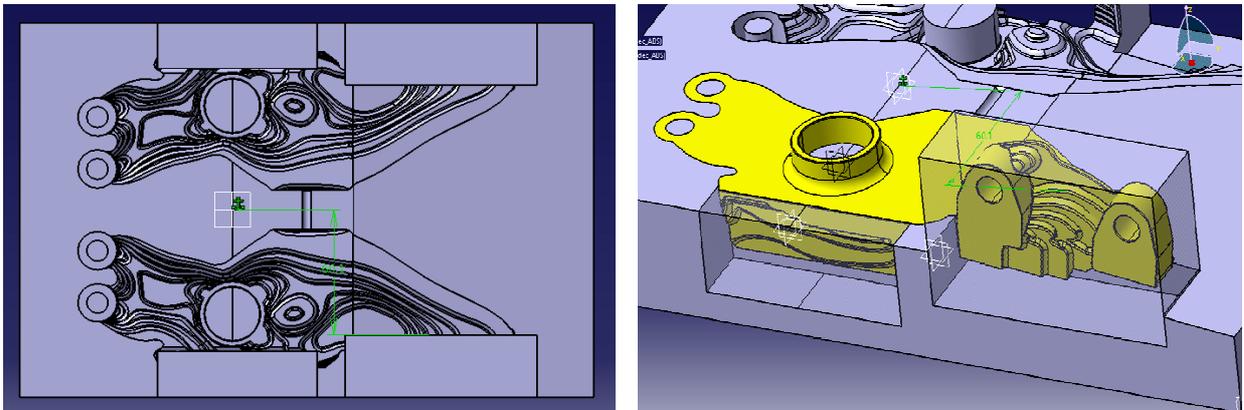


Fig. A6.2. Vistas del molde donde se muestran los insertos a utilizar.

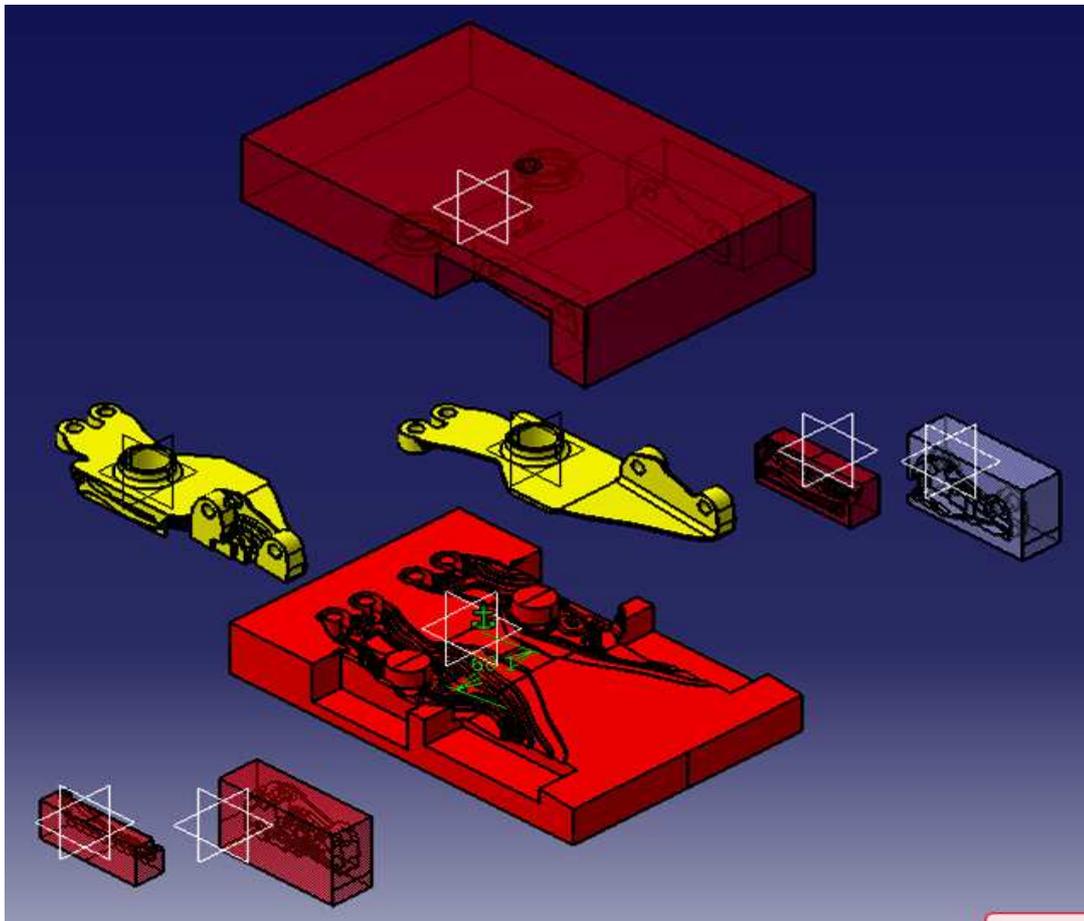


Fig. A6.3. Explosivo del molde propuesto



---

## A6.2 ANÁLISIS DE FLUJO DE LA ESTRUCTURA OPTIMA ADECUADA PARA MANUFACTURA.

Ubicar un punto por donde el fluido ingresará en la cavidad del molde es de gran importancia no sólo para obtener una buena calidad de la pieza inyectada y posibilitar un llenado adecuado de la misma, sino también para conseguir mejores tiempos de llenado y de este modo reducir los tiempos de fabricación. Bajo este contexto, se realizó una simulación de análisis de flujo plástico de la estructura óptima, no como una consideración para la adecuación, sino para presentar una posible localización del punto de inyección, de la pieza ya adecuada, y con ello reforzar la metodología de diseño óptimo aquí presentada, ya que este análisis completo está fuera del alcance de este trabajo. Para esto se utilizó el software MOLDFLOW 2011 versión estudiantil, con lo cual se obtuvieron los resultados aquí presentados, para el material Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). A continuación se muestran distintos puntos de inyección.

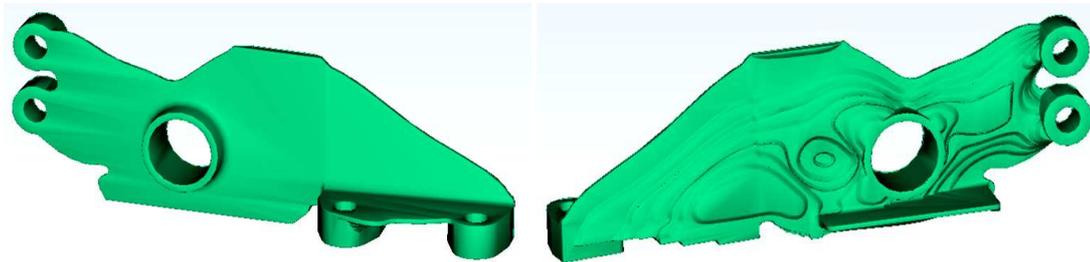


Fig. A6.4. Vistas de la estructura óptima derivada del proceso bidireccional.

En la siguiente imagen se muestran las posibles zonas donde el programa calcula, se puede localizar el punto de inyección más factible, para lograr el llenado total de la pieza.

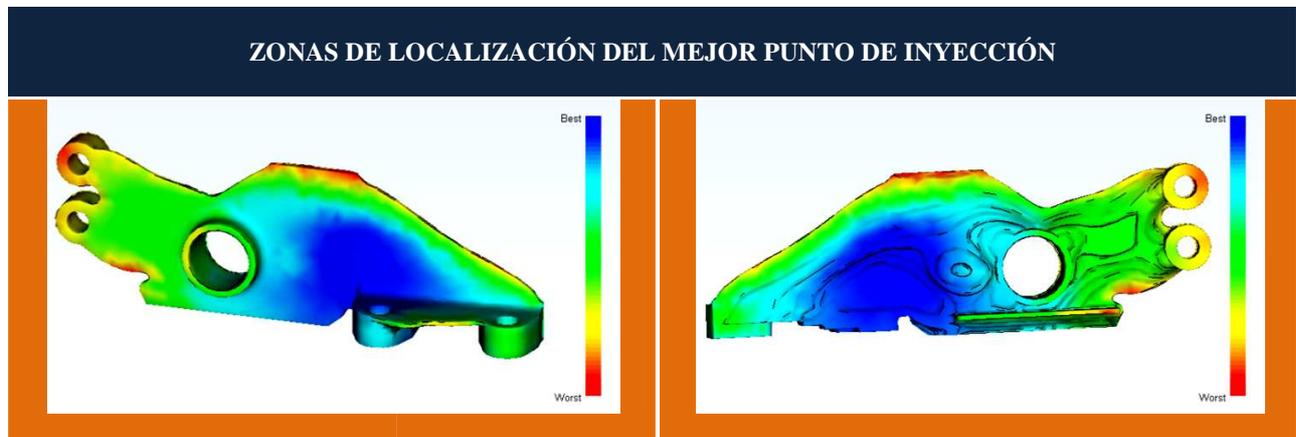


Tabla A6.1. Historial de evolución de densidad de elementos para el ABS.

Con base en lo anterior se decidió aplicar tres puntos de inyección en distintos lugares, para realizar la simulación, logrando obtener los resultados mostrados en la siguiente tabla A6.2:



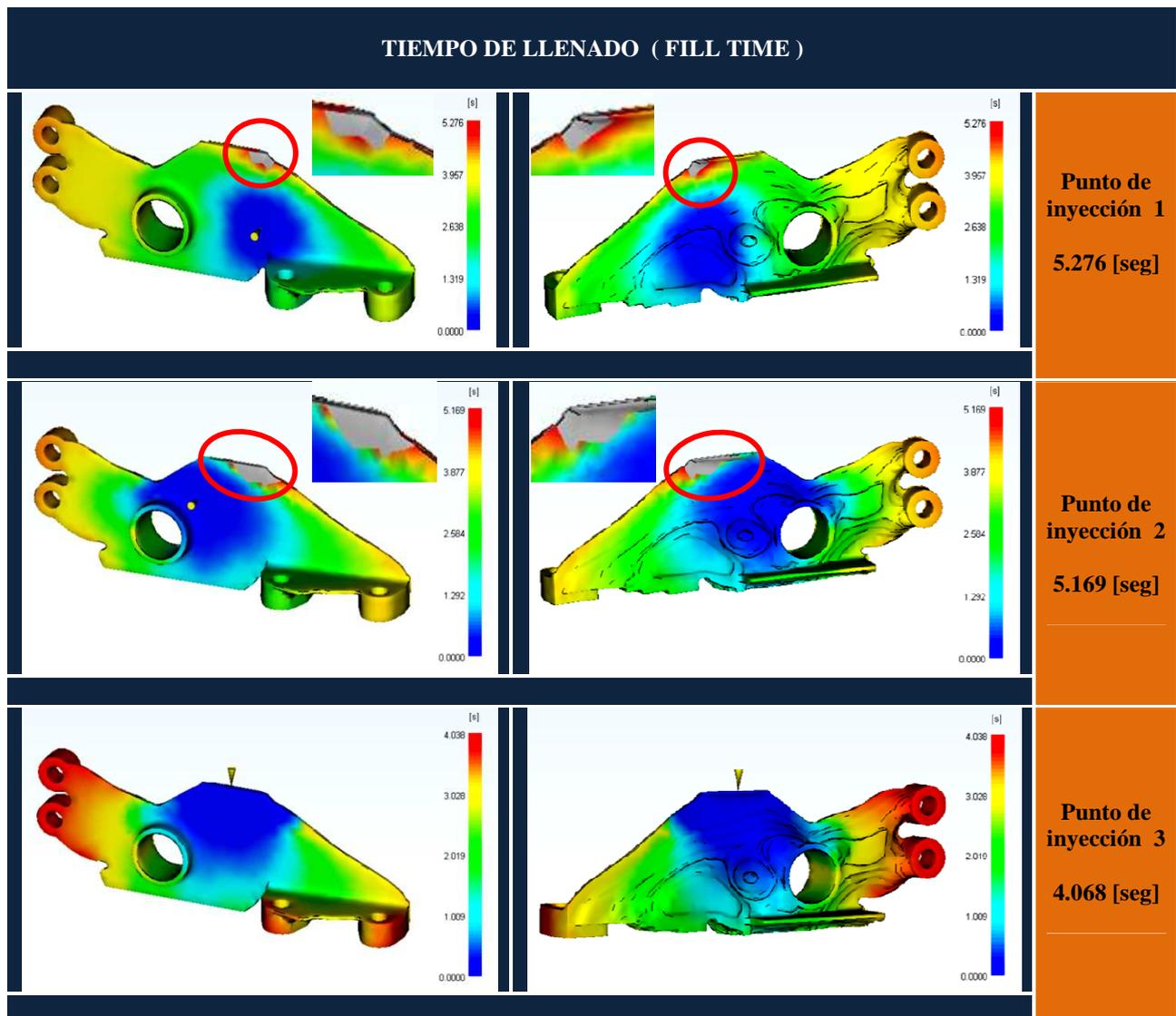
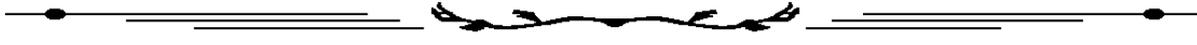


Tabla A6.2. Historial de evolución de densidad de elementos para el ABS.

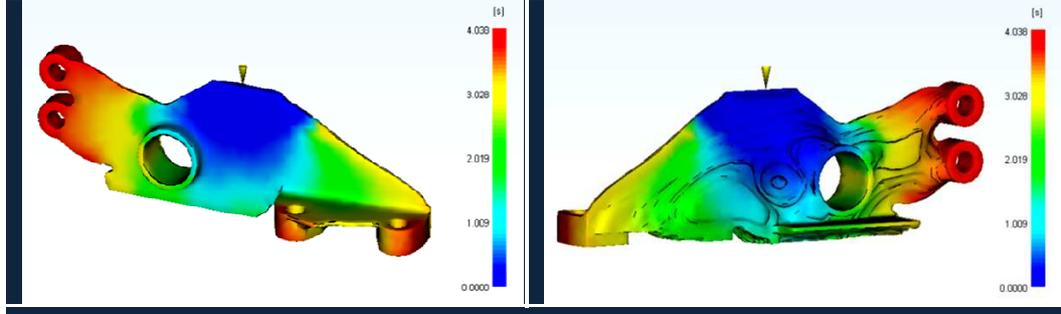
Se puede observar que el mejor punto para inyectar es el punto número 3, en el cual se logra además de un llenado total de la pieza, se tiene un reducción del tiempo estimado de llenado, que aunque a simple vista no es mucho, en una posible producción en masa este se vuelve un factor sumamente importante. También este punto permite un autorebabeo durante el proceso de apertura y extracción de la pieza.

En la tabla A6.3 se muestran imágenes de los resultados obtenidos de la simulación de inyección para el ABS.





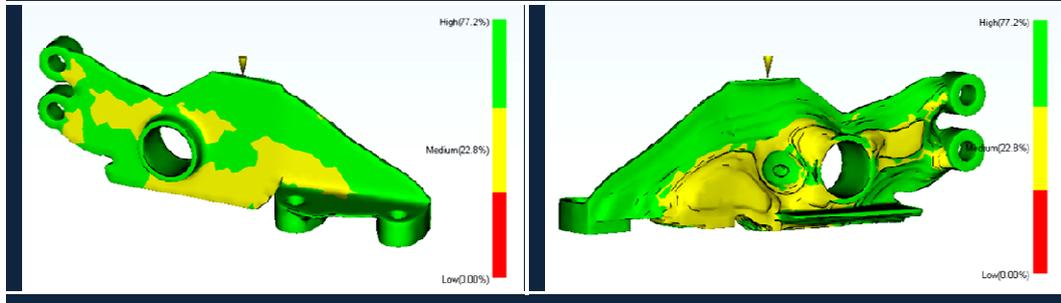
### SIMULACIÓN DE INYECCIÓN ( ABS )



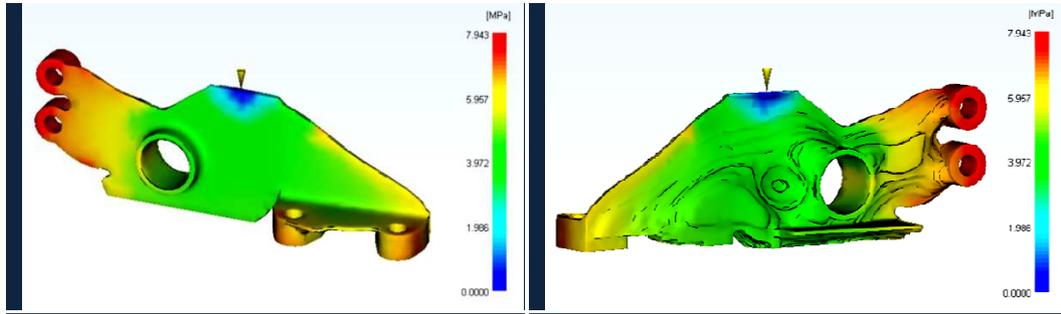
**TIEMPO DE LLENADO**  
*( FILL TIME )*

**Punto de inyección**

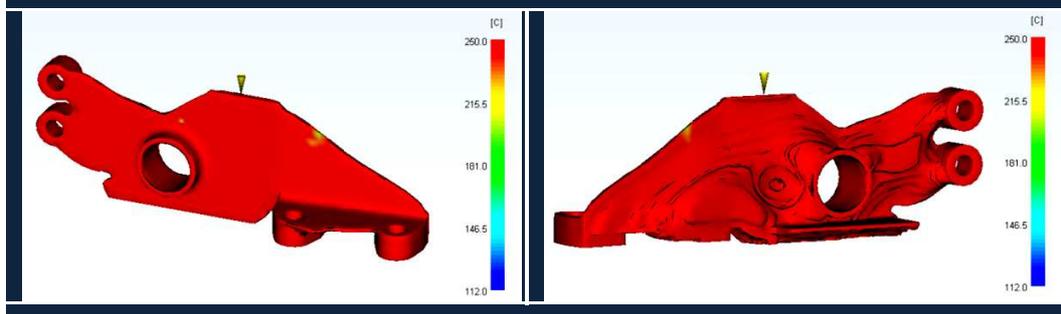
**4.068 [seg]**



**PREDICCIÓN DE CALIDAD DE LA PIEZA**  
*( PREDICTION QUALITY )*



**PRESIÓN DE INYECCIÓN**  
*( DROP PRESION )*



**TEMPERATUR A DE INYECCIÓN**  
*( TEMPERATURE )*



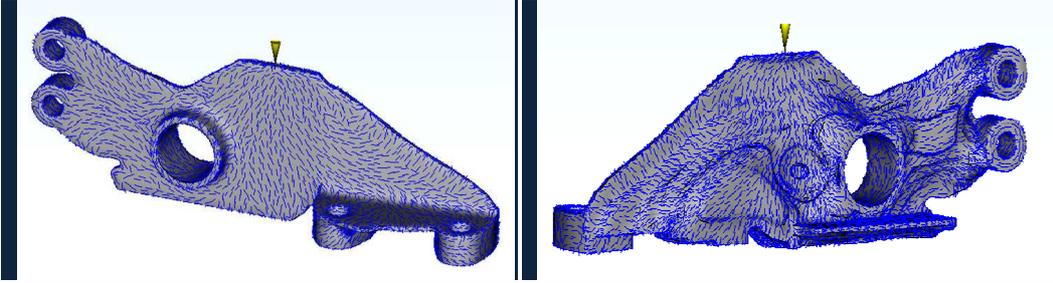
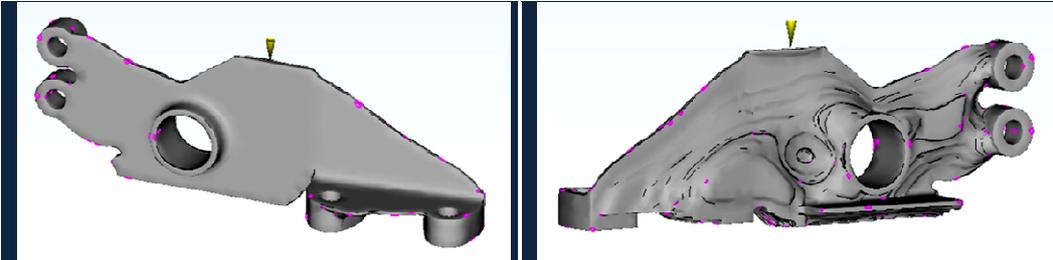
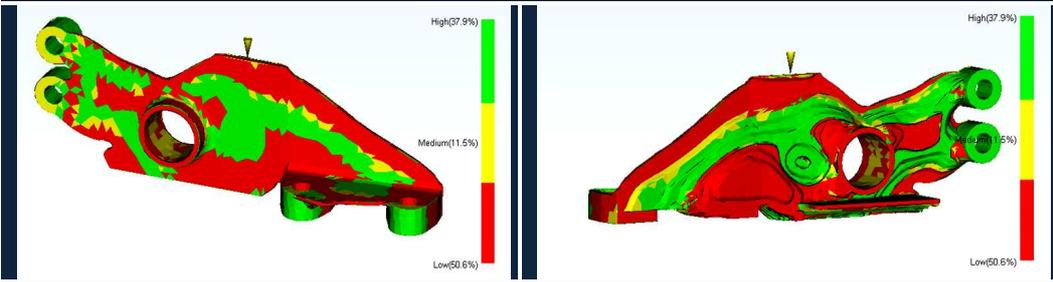
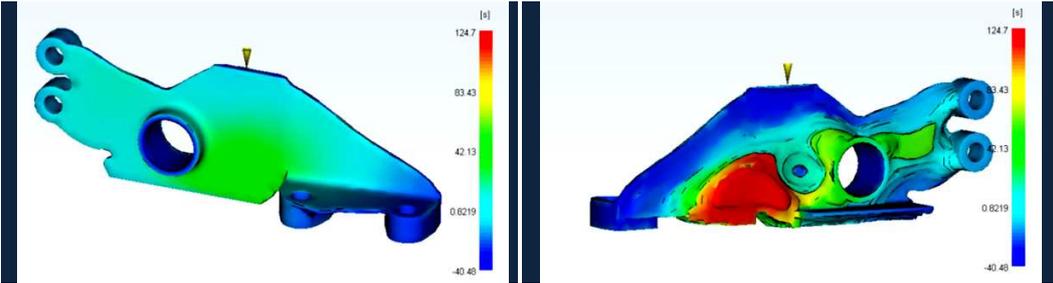
SIMULACIÓN DE INYECCIÓN ( ABS ) ... <i>Continuación</i>	
	<b>ORIENTACIÓN DEL FLUJO</b> <i>(ORIENTATION AT SKIN)</i>
	<b>BOLSAS DE AIRE</b> <i>(AIR TRAPS)</i>
	<b>CALIDAD DEL ENFRIAMIENTO</b> <b>O</b> <i>(COOLING QUALITY)</i>
	<b>TIEMPO DE ENFRIAMIENTO</b> <b>O</b> <i>(COOLING TIME)</i>

Tabla A6.3. Resultados obtenidos de la simulación para el ABS.

