

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA MECÁNICA Y MATERIALES



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO DE DISEÑO ÓPTIMO PARA FABRICACIÓN DE COMPONENTES MEDIANTE TECNOLOGÍAS ADITIVAS

Profesor Tutor: Juan José Ródenas García

Alumno Máster: Juan Vicente Haro González

Agradecimientos

En primer lugar, expresar mi agradecimiento a los profesores del Máster por la formación recibida y los conocimientos compartidos.

También agradecer a mi tutor de tesis, Juan José Ródenas, quien ha corregido este trabajo y me ha dado la oportunidad de mejorarlo. Agradecer el apoyo, correcciones, comentarios e inestimable ayuda.

Por último, quedo especialmente agradecido con AIMME (Instituto Tecnológico Metalmeccánico) por su apoyo y confianza depositados. Sin ellos, no habría podido realizar este trabajo.

ÍNDICE

DEFINICIÓN DE ACRÓNIMOS	1
1. INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN ADITIVA Y MOTIVACIÓN....	3
1.1 Introducción	3
1.2 Etapas del proceso de Fabricación Aditiva	6
1.2.1 Exportación a formato STL.....	6
1.2.2 Orientación de los modelos y adición de Soportes	7
1.2.3 Capeado: División virtual del fichero en capas.....	8
1.2.4 Fabricación Aditiva por capas	9
1.2.5 Post-procesos FA: Limpieza y eliminación de soportes	11
1.3 Evolución de los términos, del prototipado rápido a la fabricación aditiva.....	13
1.4 Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva.....	15
1.5 Ventajas e inconvenientes de las fabricación aditiva	16
1.6 Capacidades y aplicaciones de la fabricación aditiva	19
1.6.1 Canales de refrigeración/calefacción con cualquier forma en el interior de moldes de inyección	20
1.6.2 Producto personalizado a partir de geometría escaneada del usuario o paciente	21
1.6.3 Productos con geometrías complejas, imposibles de fabricar por otro método de fabricación	22
1.6.4 Scaffolds diseñados mediante CAD 3D, regiones porosas en implantes para mejorar osteointegración	23
1.6.5 Prototipos y piezas Near Net Shape	24
1.7 Motivación	25
1.7.1 Optimización de producto mediante herramientas MEF y FA.....	25
1.7.2 Selección de la tecnología de fabricación aditiva.....	27

2. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO ÓPTIMO TENIENDO EN CUENTA ANÁLISIS MEF Y RESTRICCIONES DE FABRICACIÓN	30
2.1 Introducción al proceso SLM	30
2.2 Restricciones de fabricación. Diseño de experimentos	36
2.2.1 Agujeros verticales y horizontales	37
2.2.2 Superficies inclinadas	44
2.2.3 Edición de Soportes	48
2.2.4 Voladizos mono-apoyados y bi-apoyados	52
2.2.5 Detalles	55
2.2.6 Mecanizado: Espesor a mecanizar para eliminar la rugosidad superficial	58
2.3 Restricciones de diseño	63
2.3.1 Reglas de diseño para agujeros	63
2.3.2 Reglas de diseño para planos inclinados	65
2.3.3 Reglas de diseño para soportes	65
2.3.4 Reglas de diseño para volados	66
2.3.5 Reglas de diseño para detalles	66
2.3.6 Espesor a mecanizar para eliminar la rugosidad superficial	66
2.4 Restricciones del material. Consideraciones	68
2.4.1 Validación de las propiedades mecánicas de la aleación Acero Inox. 316 LVM	70
2.5 Metodología final	76
2.5.1 Proceso de diseño optimizado por MEF y para fabricación por SLM.	76
3. CASO PRÁCTICO. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO A UN INYECTOR DE ACEITE.	87
3.1 Diseño inicial	87
3.2 Alternativa de diseño 2	90
3.2.1 Cálculo estático estructural por MEF	91
3.2.2 Análisis del diseño mediante MEF	97
3.2.3 Análisis de fabricabilidad para SLM	104

3.2.4	Consideraciones para la mejora del diseño según el análisis MEF y fabricabilidad para SLM.....	105
3.3	Alternativa de diseño 3: Diseño del componente mejorado mediante el análisis MEF y para fabricación por SLM.....	108
3.3.1	Aplicación de la metodología de diseño.....	108
3.3.2	Diseño mejorado del inyector de aceite según MEF y fabricación por SLM.....	116
3.3.3	Cálculo estático estructural por MEF.....	116
3.3.4	Análisis del diseño mediante MEF.....	122
3.3.5	Análisis de fabricabilidad para SLM.....	134
3.3.6	Fabricación mediante fusión selectiva por láser (SLM).....	136
4.	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN.....	139
4.1	Conclusiones.....	139
4.2	Discusión.....	143

Definición de acrónimos

3D: 3 Dimensiones.

A: Alargamiento, incremento de longitud que ha sufrido la probeta en %. Se mide entre 2 puntos cuya posición está normalizada.

ABF: Formato de fichero de capeado para tecnología EBM.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

CAD: Computer-Aided Design, (Diseño Asistido por Computador)

CIM: Ceramic Injection Molding, (Moldeo por Inyección de Cerámica).

CLS: Formato de fichero de capeado para tecnología Laser Cusing.

E: Modulo de Young o módulo de elasticidad.

EBM: Electron Beam Melting (Fusión por Haz de Electrones).

FA: Fabricación Aditiva.

FDM: Fused Deposition Modeling.

L.e: Limite Elástico.

LVM: Low Vacuum Melting, acero con bajo contenido en Carbono y procesado en condiciones de vacío.

MEF: Método de los Elementos Finitos.

MIM: Metal Injection Molding, (Moldeo por Inyección de Metal).

R: Carga de rotura o resistencia a tracción: carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.

SLA: Stereolithography (Estereolitografía).

SLC: SLiCe format Formato de fichero de capeado para tecnologías FA.

SLM: Selective Laser Melting (Fusión Selectiva por Laser).

SLS: Selective Laser Sintering (Sinterizado Selectivo Laser).

STL: Standard Tessellation Language. Formato del fichero utilizado para representar geometrías 3D para tecnologías de FA.

Z: Estricción, se mide en %, es la reducción de la sección que se produce en la zona de la rotura.

1. Introducción a la Fabricación Aditiva y motivación

1.1 Introducción

Recientemente, han aparecido un nuevo tipo de tecnologías denominadas Tecnologías de Fabricación Aditiva (FA) que permiten la producción de productos con geometrías más complejas que las obtenidas mediante tecnologías de fabricación tradicionales. La principal característica de las tecnologías de FA es que las piezas o productos se fabrican por la sucesiva adición selectiva de material, directamente a partir de un fichero digital con la geometría de la pieza CAD 3D^{1,2}. Estas tecnologías de FA no necesitan de ningún tipo de utillaje como ocurre en los procesos convencionales de fabricación (mecanizado, inyección a presión, forja, embutición, etc.). De aquí se derivan 2 de sus principales ventajas, la primera es que no es necesaria la inversión en utillaje para la fabricación de piezas, la segunda es que no existen limitaciones geométricas de fabricación derivadas de la utilización de utillaje en las piezas, por ejemplo, colisión de la herramienta en mecanizado, ángulos de desmoldeo en inyección de piezas, etc.

Con el objetivo de clarificar la idea de fabricación aditiva, los procesos de fabricación pueden compararse y clasificarse atendiendo al modo de en que el material es procesado (Figura 1) para la obtención de la geometría física deseada, (productos, utillaje, modelos, etc.). A continuación se presenta una breve descripción de cada tipo de proceso:

- **Fabricación Sustractiva:** se parte de un bloque de material de dimensiones mayores que la geometría final a obtener. Mediante sucesivas operaciones de arranque de material se elimina selectivamente el material creando la pieza deseada. Algunos

¹ Wohlers T. *Wohlers Report 2010: Additive Manufacturing State of the Industry – Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Inc., ISBN 0-9754429-6-1

² ASTM F2792-10 *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428

ejemplos de esta tipología serían los procesos de fabricación siguientes:

- *Mecanizado*: proceso de fabricación que comprende un conjunto de operaciones de conformación de piezas mediante la eliminación de material, ya sea por arranque de viruta o por abrasión.
 - *Electroerosión*. consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo en un medio dieléctrico para arrancar partículas de la pieza hasta conseguir reproducir en ella las formas del electrodo. Ambos, pieza y electrodo, deben ser conductores, para que pueda establecerse el arco eléctrico que provoque el arranque de material
 - *Corte por agua, laser, sierra, etc.*
- **Fabricación Conformativa**: el material se introduce en una matriz con la cavidad de la pieza que se desea obtener. El material de partida se adapta a la forma de la matriz, se procesa con esta forma, finalmente la pieza es extraída de la matriz. Ejemplos:
- *Moldeo por Inyección*: El material fundido es inyectado en la cavidad del molde, la cavidad es el negativo de la pieza, el material solidifica con la forma de la pieza.
 - *Forja, embutición*: El material se deforma plásticamente para que se adapte a la cavidad de la matriz.
 - *Termo conformado*: una plancha o lámina de semielaborado termoplástico se calienta de forma que al reblandecerse puede adaptarse a la forma de un molde por acción de presión vacío o mediante un contramolde.
 - *Pulvimetalurgia convencional* (sinterización, MIM, CIM, etc.). La cavidad del molde es rellenada con material en formato polvo, tras un proceso de compactación y sinterización se extrae la pieza.
- **Fabricación Aditiva**: la pieza se fabrica, directamente a partir de un fichero 3D, añadiendo el material por capas. Ejemplos:

Capítulo 1. Introducción a la Fabricación Aditiva y motivación

- *Sinterizado laser (SLS)*: proceso de fabricación aditiva por capas donde un láser sinteriza polvo polimérico siguiendo la geometría de un modelo CAD 3D en cada capa.
- *Deposición por hilo fundido (FDM)*: proceso de fabricación aditiva donde un cabezal deposita hilo polimérico en capas siguiendo la sección de la pieza en cada capa. El hilo polimérico es fundido y extruido mediante la boquilla-cabezal.
- *SLM*: Fusión selectiva por láser de polvo metálico en atmosfera inerte (N₂, Ar) siguiendo la geometría de la pieza capa a capa hasta fabricar el objeto 3D.
- *EBM*: Fusión por haz de electrones de polvo metálico en vacío siguiendo la geometría de la pieza capa a capa hasta fabricar el objeto 3D.



Figura 1. Clasificación de los procesos de fabricación según el modo de procesar el material para obtener la pieza.

1.2 Etapas del proceso de Fabricación Aditiva

En este apartado se describen todas las etapas del proceso de fabricación aditiva por capas, cubriendo desde las etapas iniciales de preparación hasta los post-procesos típicos.

1.2.1 Exportación a formato STL

Como ya se ha comentado, las tecnologías de fabricación aditiva permiten fabricar cualquier objeto o pieza a partir de un fichero CAD 3D. El primer paso debe ser exportar la geometría CAD 3D a formato STL. El formato STL representa aproximadamente la geometría mediante una malla cerrada de triángulos. Esta exportación se puede hacer variando la resolución de acuerdo a las necesidades, alta o baja resolución (Figura 2). A mayor densidad de triángulos (resolución) mejor aproximación entre el fichero STL y el CAD de la pieza. En la Figura 4, pueden observarse modelos 3D de delfines con baja resolución del STL, donde las superficies curvas se encuentran facetadas debido a la baja cantidad de triángulos utilizada para representar la geometría.

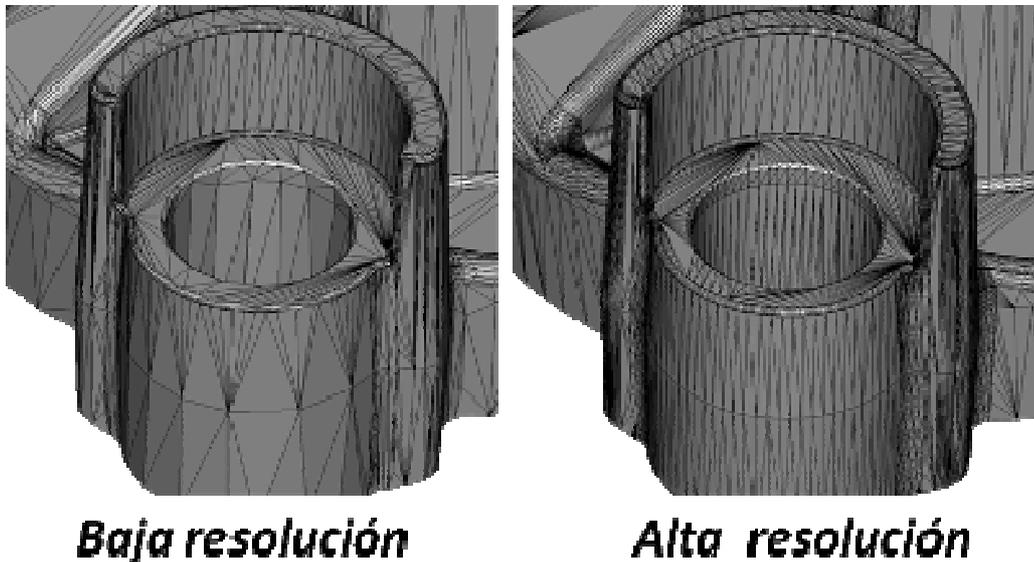


Figura 2. Diferentes aproximaciones de la geometría 3D mediante distintas resoluciones del fichero STL para la misma pieza.

1.2.2 Orientación de los modelos y adición de Soportes

Los modelos STL de las piezas son colocadas en una plataforma virtual (Figura 5), específica para cada tecnología, donde las modelos STL son dispuestos con la orientación de fabricación más favorable (Figura 4), de acuerdo con las capacidades y limitaciones de cada proceso de fabricación aditiva. Existen zonas geométricas de la pieza que no pueden ser fabricadas directamente de forma aditiva y es necesario añadir “soportes” para asegurar la correcta fabricación de la pieza. Estos soportes son finas columnas o entramados que sustentan zonas de la pieza demasiado esbeltas, voladizos o superficies con ángulos de fabricación muy bajos, normalmente a partir de ángulos mayores a 45° respecto a la horizontal los soportes no son necesarios (Figura 3). Estos soportes son generados automáticamente por el software de planificación de cada tecnología, durante el proceso de fabricación, se fabrican al mismo tiempo que la pieza y normalmente con el mismo material que esta. Los soportes se fabrican capa a capa desde la plataforma de fabricación y terminan en las caras de la pieza a soportar, para asegurar su correcta fabricación. Cuando la fabricación de las piezas ha terminado los soportes son eliminados de forma manual (apartado **5 Post-procesos FA: Limpieza y eliminación de soportes**), debido a este post-proceso el objetivo de la etapa actual, suele ser orientar las piezas de forma que sea necesaria la mínima cantidad de soportes.

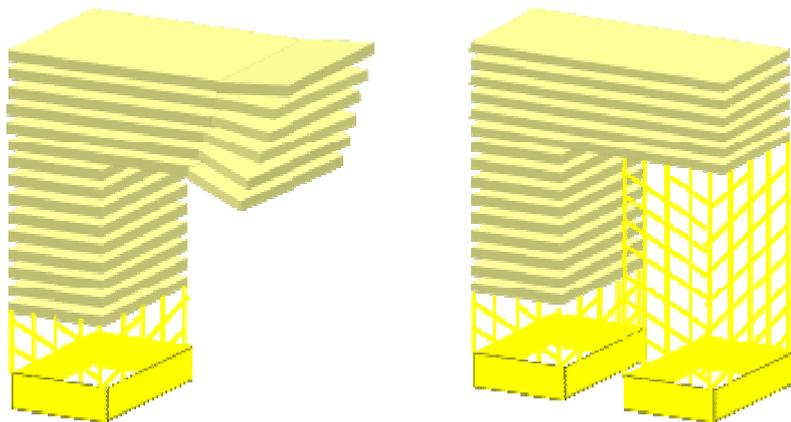


Figura 3. Izquierda, geometría en voladizo fabricada por capas, al no existir soportes la geometría en voladizo se genera en “el aire” y se desploma. Derecha, geometría en voladizo soportada correctamente.



Figura 4. Izquierda, esta orientación del modelo obliga a colocar más soportes que en la orientación de la derecha.

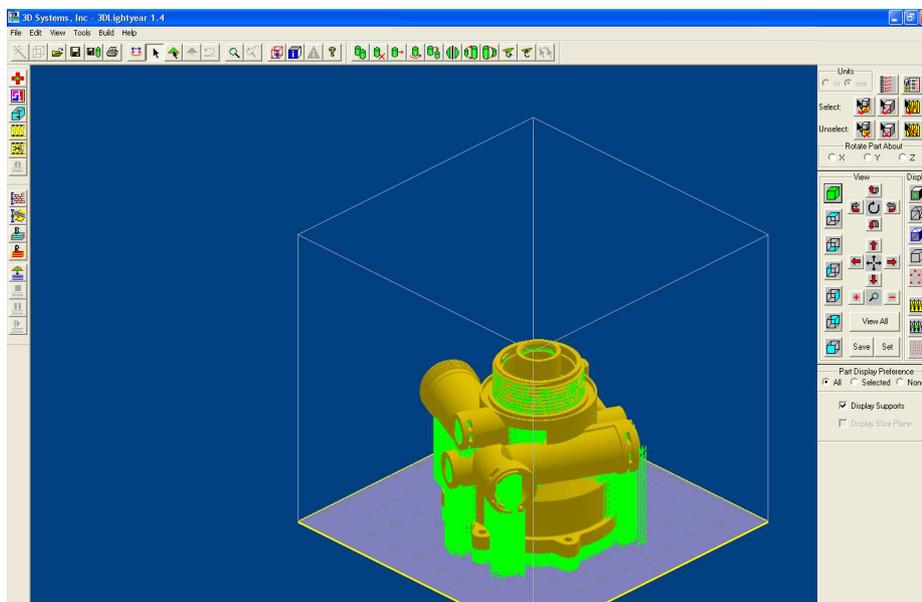


Figura 5. Plataforma virtual con el modelo 3D orientado y con los soportes necesarios para su correcta fabricación, tecnología Esteriolitografía.

1.2.3 Capeado: División virtual del fichero en capas

En esta etapa se divide virtualmente en finas capas el modelo 3D (formato STL), con la orientación adecuada de fabricación y con los soportes necesarios. El rango de espesor de las capas está comprendido entre 15 y 200 μm para la mayoría de tecnologías. El espesor de capa

depende de la tecnología utilizada y las resoluciones disponibles en cada tecnología, normalmente existen 2 ó 3 resoluciones:

- **Baja Resolución:** ofrece una alta productividad con baja calidad de detalle, este es el caso de espesores de capa mayor, por ejemplo 200 μm , donde resulta apreciable un efecto de escalonado en la superficie de la pieza fabricada.
- **Estándar:** ofrece un buen compromiso entre productividad y nivel de detalle, espesor de capa intermedio, por ejemplo 100 μm .
- **Alta resolución:** posibilita un alto nivel de detalle pero con una productividad menor. El espesor es, en este caso de 15 a 70 μm . Con esta resolución de fabricación no resulta apreciable el efecto de escalonado entre capas en las superficies de la pieza obtenida.

A esta etapa de preparación se le denomina “capeado” y el formato de fichero digital obtenido tiene diferentes extensiones (SLC, CLS, ABF, etc.) dependiendo de la tecnología y su correspondiente patente.

1.2.4 Fabricación Aditiva por capas

El fichero digital generado con la información de la pieza en capas, es enviado al equipo de FA, donde comienza el proceso de fabricación, que se compone básicamente de 2 etapas (Figura 6):

- 1- **Reparto del material.** El material es repartido sobre la bandeja de fabricación formando una capa del mismo espesor en el que se ha dividido virtualmente el fichero 3D. El formato de la materia prima puede ser líquido, en el caso de tecnologías que procesan polímeros ó polvo esférico para las tecnologías que procesan metales, aunque también existen tecnologías que procesan polímeros partiendo de polvo.
- 2- **Procesado del material en la capa.** Una fuente de energía (haz laser, haz de electrones, luz etc.) procesa selectivamente el

material de la capa siguiendo el contorno e interior de la pieza (Figura 2).

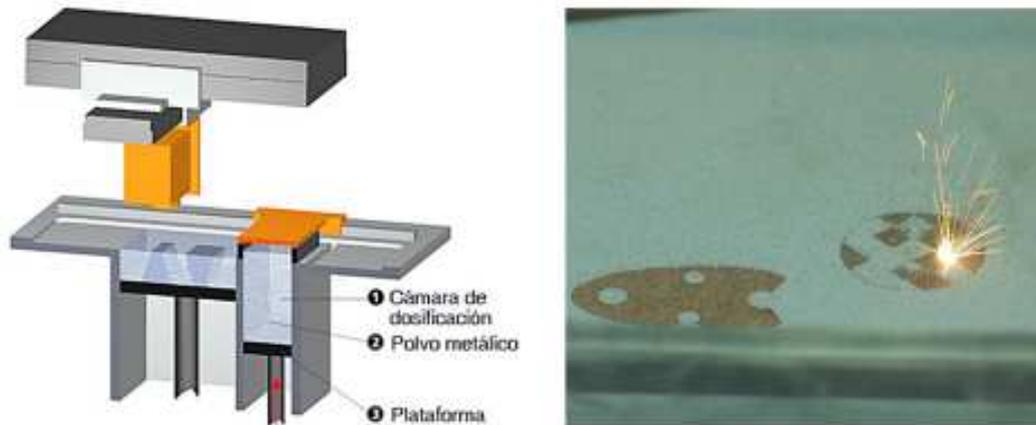


Figura 6. Izquierda, esquema del proceso. Derecha, laser fusionando polvo de acero siguiendo el contorno y el interior de las piezas en una determinada capa.

Estos dos pasos se repiten hasta que la pieza se ha completado, es decir, sobre una capa de material ya procesado se reparte una nueva capa de material que se vuelve a procesar. La fuente de energía introduce la energía suficiente para procesar la capa actual y unirla a las capas anteriores. Hay que añadir que en cada capa la maquina procesa una sección de la pieza diferente siguiendo el patrón del fichero 3D dividido en capas y cohesionando la nueva capa con las anteriores.

En la figura 7 puede observarse la estrategia de procesado por capa, primero se procesan los contornos de la pieza (exteriores e interiores) tras esto el laser procesa la sección interna de la pieza. El material no procesado que rodea la pieza es reutilizado tras la fabricación, en este caso polvo metálico y tecnología SLM (Selective Laser Melting).

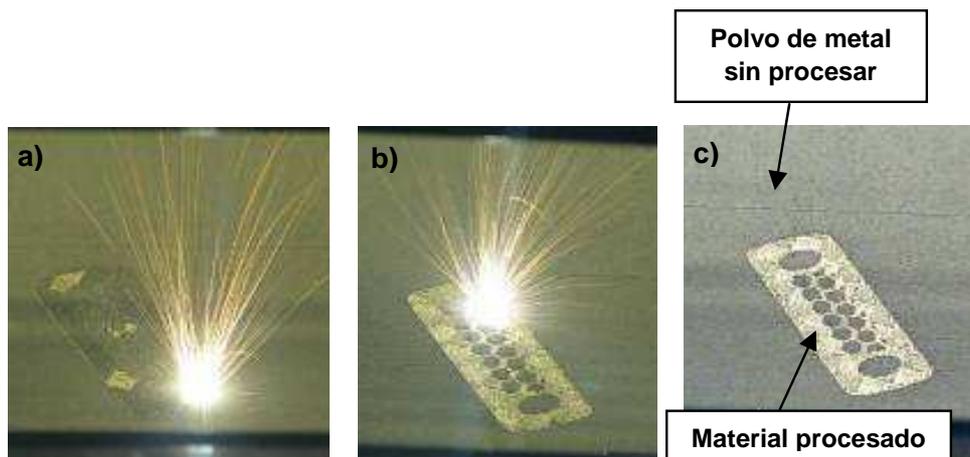


Figura 7. Secuencia de procesamiento en la capa, primero contornos (a) y luego sección interna de la pieza (b). Derecha, capa fusionada con polvo de metal que rodea la pieza en construcción (c).

1.2.5 Post-procesos FA: Limpieza y eliminación de soportes

Terminado el proceso de fabricación, se extraen la/s pieza/s de la máquina y el material que envuelve la pieza que no ha sido procesado es reutilizable entre un 95% y 99% (Figura 7c). Las piezas son limpiadas del material no procesado que las rodeaba con distintos métodos dependiendo de la tecnología empleada. Por ejemplo: en el caso de que la materia prima fuesen polímeros líquidos (Esterolitografía ó SLA y Procesado por luz digital ó DLP), primero se escurren las piezas dentro de la maquina, después las piezas se limpian manualmente con alcohol (Figura 8).

En el caso de partir de polvo metálico las piezas pueden ser sopladas con aire a presión, chorreadas con arena (SLM) o chorreadas con el mismo material de partida (polvo de titanio) para evitar la contaminación de la pieza, este es el caso de las piezas de titanio fabricadas por EBM (Figura 9).

Tras la limpieza inicial, se retiran los soportes mediante procesos manuales con la ayuda de herramientas como: pinzas, bisturís, tenazas,

Capítulo 1. Introducción a la Fabricación Aditiva y motivación

sierras, discos de corte, etc. En el caso de las piezas metálicas también se suelen realizar algunas operaciones de mecanizado en las zonas de las piezas donde se requiere precisión, como planeado, taladros, roscados, etc. En ocasiones también se realizan pulidos.

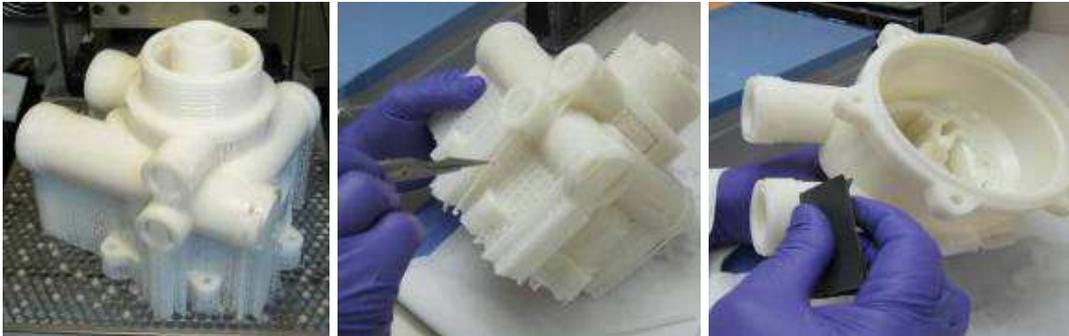


Figura 8. Izquierda, pieza con soportes en la plataforma de fabricación de Esterolitografía, en donde la resina líquida escurre desde el modelo sólido hasta el depósito. Centro, eliminación manual de soportes. Derecha limpieza final y lijado de las superficies que tenían soportes.

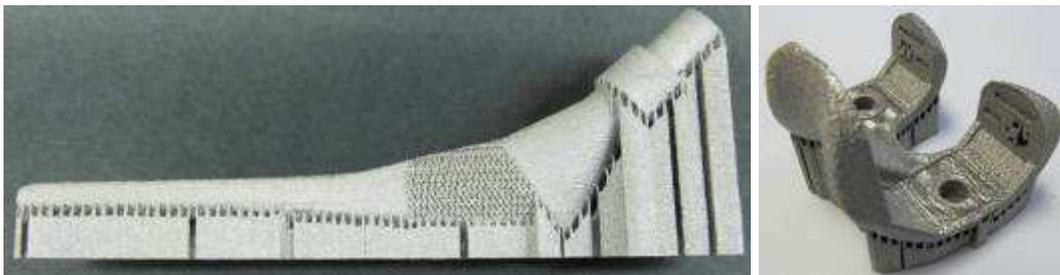


Figura 9. Piezas de titanio fabricadas mediante EBM con los soportes de fabricación.

Para resumir las etapas anteriores, en la figura 10, se muestra de forma esquemática las etapas generales seguidas para la fabricación de una pieza, particularizado para un implante de rodilla y la tecnología EBM. Notar que, la última etapa de acabados es común a otros procesos de fabricación (forja, colada, etc.), lo que demuestra que se obtiene una pieza totalmente funcional sin porosidad a partir de la fusión en sucesivas capas de polvo metálico.

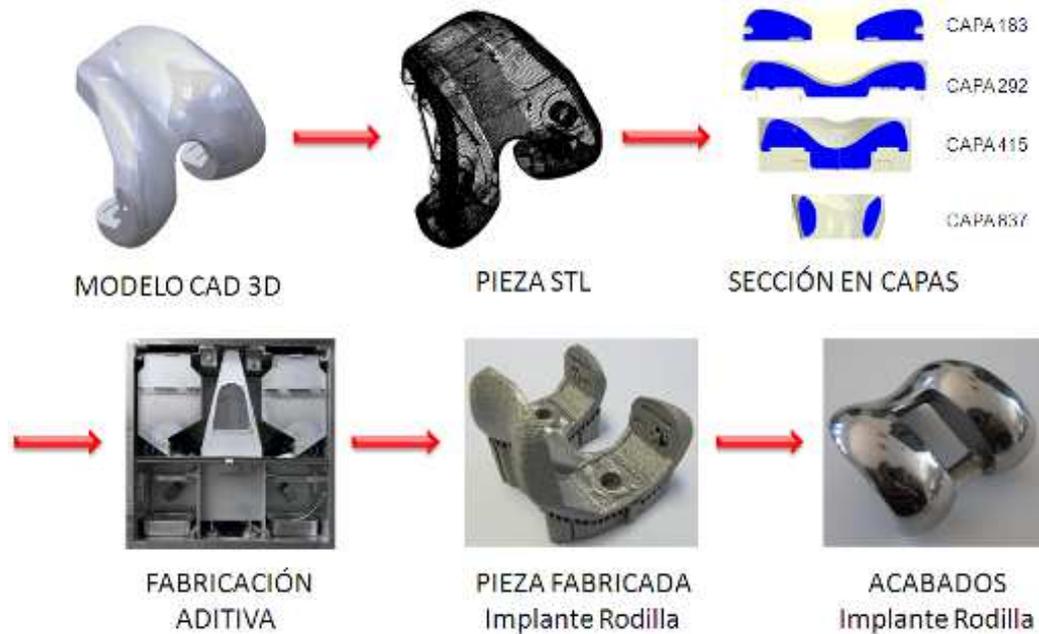


Figura 10. Etapas seguidas durante los procesos de Fabricación Aditiva.

1.3 Evolución de los términos, del prototipado rápido a la fabricación aditiva

A finales de los años 80 aparecieron las primeras tecnologías capaces de fabricar piezas añadiendo el material por capas partiendo de un fichero CAD 3D del modelo geométrico. El objetivo de estas tecnologías era fabricar rápidamente y de forma automática un modelo geométrico del producto para su validación en las primeras etapas del diseño, es decir un prototipo. Dada su aplicación y como herramienta de marketing para vender equipos, al conjunto de estas tecnologías se las denominó Rapid Prototyping (Prototipado Rápido)¹.

En los siguientes años se realizaron desarrollos en distintos ámbitos, se mejoró la precisión de los equipos y se aumentaron las potencias de las fuentes de energía, mejorando la resolución, acabados superficiales y tolerancias. También fueron apareciendo nuevos materiales y nuevas tecnologías que seguían el mismo principio de fabricación capa a capa. Al ofrecer más posibilidades (materiales y resoluciones) se empezaron a fabricar piezas, productos y utillajes totalmente funcionales. A partir de ese momento, estas tecnologías no

Capítulo 1. Introducción a la Fabricación Aditiva y motivación

solo se utilizaban en la fabricación de prototipos sino en otras aplicaciones, debido a esto, se acuñaron los nombres de Rapid Manufacturing (Fabricación Rápida) y Rapid Tooling (Utillaje Rápido) junto al de Rapid Prototyping. Es decir existían tres grupos de tecnologías con el mismo principio de fabricación, clasificadas en función de su aplicación:

- **Rapid Prototyping:** conjunto de tecnologías que normalmente fabrican capa a capa prototipos. Por ejemplo: Esterolitografía, SLS (Selective Laser Sintering), etc.
- **Rapid Manufacturing:** conjunto de tecnologías que normalmente fabrican capa a capa piezas. Por ejemplo: SLM ó EBM.
- **Rapid Tooling:** conjunto de tecnologías que normalmente fabrican capa a capa moldes y utillajes. Por ejemplo: SLM para fabricar moldes con canales de refrigeración adaptados a la huella de la pieza.

Notar que estos nombres mantenían el apelativo comercial Rapid como herencia del Rapid Prototyping, aunque las tecnologías, en muchos casos, no fuesen precisamente rápidas.

Recientemente, 2009, se formó un comité científico ASTM F42 para normalizar la designación de estos procesos de fabricación. Se denominó con **Additive Manufacturing (Fabricación Aditiva)** al conjunto de las tecnologías que fabrican geometrías solidas (productos, utillajes, prototipos, etc.) añadiendo el material en capas a partir de información electrónica².

De esta forma las anteriores designaciones y clasificaciones de las tecnologías según su aplicación son incorrectas, aunque se debe remarcar que existe aun cierta tendencia, para los que no están familiarizados con las tecnologías, a denominar a estas tecnologías como Prototipado Rápido.

1.4 Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva

Como se comentó anteriormente, las tecnologías de Fabricación Aditiva no deben ser clasificadas en función de su aplicación puesto que con la misma tecnología podemos fabricar prototipos, productos y utillajes. Estas tecnologías sin embargo pueden ser clasificadas de muchas maneras, en función del tipo de energía que procesa el material: haz laser, haz de electrones, mascara de luz, etc. También pueden clasificarse en función del espesor de la capa y su resolución, etc. En la figura 11, se presenta una clasificación en función del tipo de material que procesan polímero o metal, con algunas de las tecnologías más representativas como ejemplo.



Figura 11. Clasificación de las tecnologías de FA en función del tipo de material que procesan. Se han representado algunas de las tecnologías más representativas.

1.5 Ventajas e inconvenientes de las fabricación aditiva

Las principales ventajas de las tecnologías de FA son:

1. *Reducción del tiempo necesario de puesta en el mercado para productos personalizados (Time-to-market reduction)*. Debido a que se tratan de procesos de fabricación directos desde el fichero CAD 3D, sin la necesidad de fabricar utillajes específicos previamente al producto personalizado como ocurre en los procesos convencionales de fabricación.
2. *Completa libertad y flexibilidad en el diseño de producto*. A diferencia de otros procesos de fabricación, la FA puede producir piezas con casi cualquier forma y complejidad, ya que no tiene ninguna de las limitaciones geométricas de los procesos de fabricación convencionales. Algunos ejemplos: ángulos de salida en moldeo ó limitaciones de acceso de herramienta en mecanizado, etc.
3. *Máximo ahorro de material*. El material es añadido selectivamente y no sustraído desde un bloque. Para algunas aplicaciones, especialmente en el sector del metal, existen casos de estudio donde se demuestra que los residuos producidos a partir de material en bruto se reducen hasta un 40% cuando se utilizan tecnologías de fabricación aditiva en vez de tecnologías sustractivas (mecanizado)³. Además entre el 95% y el 98% del material no utilizado puede ser reciclado.
4. *Sin necesidad de inversión en moldes o utillaje*. La pieza se produce directamente a partir del fichero CAD 3D. Para obtener las primeras unidades se reducen tanto el coste de inversión como el tiempo necesario para la producción del utillaje que repercuten finalmente en las piezas fabricadas, como ocurre en procesos convencionales. Todo esto permite que las tecnologías de FA sean competitivas en la producción de series cortas y medias, el tamaño de la producción dependerá generalmente de la tecnología de FA, tipo de material, complejidad de la geometría de la pieza y de la competitividad de los procesos convencionales para este caso. En la figura 12 se muestra de modo general hasta que tamaño de producción resulta más

³ P. Reeves, *ATKINS: Manufacturing a Low Carbon Footprint: Zero Emission Enterprise Feasibility Study*, 2nd International Conference on Additive Technologies (iCAT), 17-19th September 2008.

competitivo utilizar FA en comparación con procesos convencionales de fabricación.

5. *Fabricación automática de producto.* Las tecnologías de FA construyen de forma automática siguiendo la geometría CAD 3D del producto, sin la intervención de operarios y por tanto evitando errores humanos en la producción.
6. *Piezas finales con densidad 100%* (en el caso de las tecnologías de metal). Se fabrican piezas con ninguna o prácticamente ninguna porosidad residual con excelentes propiedades mecánicas, a diferencia de los procesos pulvimetalúrgicos convencionales.
7. *Fabricación de geometrías imposibles para los procesos convencionales.* Las tecnologías de FA pueden producir piezas y moldes con canales de circulación de fluidos con cualquier forma y ramificación, también pueden fabricar productos huecos o cavidades internas ó estructuras porosas diseñadas por CAD junto con el implante para favorecer el crecimiento óseo y la fijación del implante.
8. *Fabricación de piezas Near Net Shape.* Existen aleaciones complejas o costosas de procesar por otros métodos de fabricación, ejemplo de esto son las superaleaciones base Níquel (Inconel) o cobalto-cromo. La FA permite fabricar componentes con geometría muy cercana a la final, que pueden ser acabadas por mecanizado.

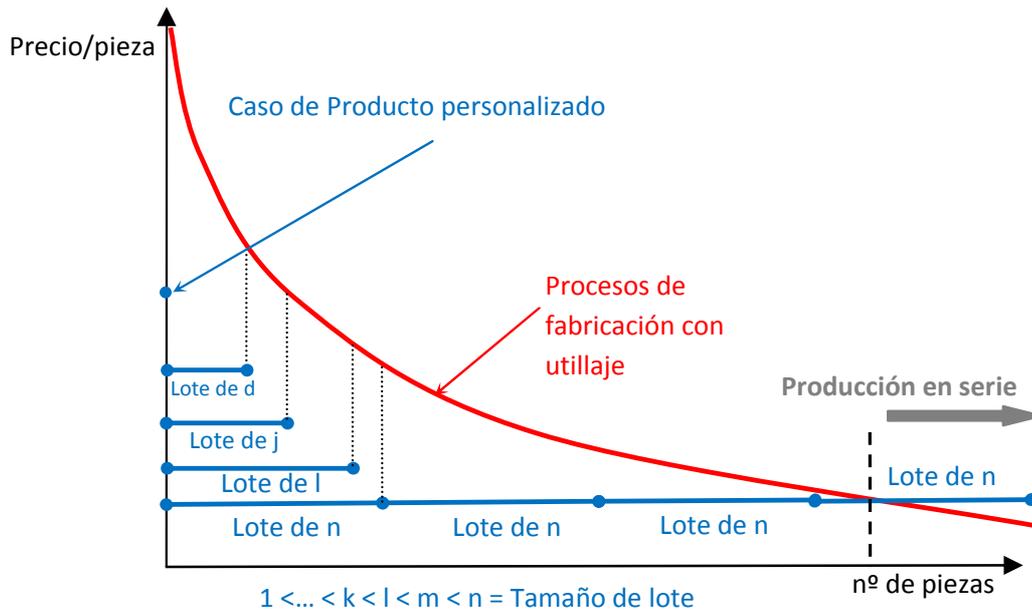


Figura 12. Comparación del coste por pieza en función del tamaño de producción para procesos convencionales con utillaje y tecnologías FA.

Los principales inconvenientes de las tecnologías de Fabricación Aditiva son:

1. *Alto coste de la materia prima*, ya que las materias primas deben transformarse al formato necesario (polvo del micraje necesario, hilo polimérico, resina líquida, etc.) para ser utilizado por cada tecnología de FA, los costes de transformación se repercuten en el material. Aunque la creciente utilización de las tecnologías de FA ha permitido la aparición de un mayor número de proveedores y escalar la producción de los materiales, lo que ha producido un descenso del precio de la materia prima para FA.
2. *Caracterización de las propiedades de los materiales procesados por FA*. Al tratarse de un proceso aditivo discontinuo las propiedades de los materiales son distintas en función de la dirección de fabricación, generalmente se comportan como materiales ortótropos con diferentes propiedades si se ensayan en dirección de la capa o en dirección perpendicular a la capa. Además según el material, el espesor de la capa, la tecnología y los parámetros de proceso esta diferencia puede ser mayor o menor.

3. *Ausencia de software específico de diseño para tecnologías de FA.* La mayoría de los programas de diseño CAD 3D utilizan las operaciones básicas de mecanizado para modelar el producto, lo cual dificulta el modelado de productos muy complejos con curvas, splines, etc. que aprovechen las posibilidades de fabricación de las tecnologías aditivas.
4. *Desarrollo de nuevos materiales.* Aunque ya se dispone de un número considerable de materiales para ser procesados por FA, estas tecnologías y sus capacidades podrían introducir ventajas competitivas en nuevas aplicaciones, para ello es necesario el desarrollo de nuevos materiales, tanto los parámetros de proceso adecuados como el formato requerido.
5. *Aumento de la velocidad de producción.* En el caso de las más recientes existe mucho margen de mejora para incrementar la velocidad del proceso para reducir el tiempo de proceso y su coste, se están realizando algunas investigaciones con láseres más potentes o un mayor número de láseres.
6. *Mejora de la calidad superficial y la precisión dimensional.* Dependiendo de la aplicación y el acabado obtenido por la tecnología aditiva puede ser necesario realizar un mayor número de post-procesos y acabados superficiales, que incrementan el coste del producto. Algunas investigaciones están tratando de reducir el tamaño del foco del laser y del haz de electrones, al mismo tiempo que se empiezan a utilizar polvos esféricos de menor tamaño.

1.6 Capacidades y aplicaciones de la fabricación aditiva

Las tecnologías aditivas gracias a su modo de fabricación aditivo permiten la producción de una nueva generación de productos o utillajes. A continuación se presentan algunos ejemplos de sus capacidades en diferentes aplicaciones (Figuras 13 a 21):

1.6.1 Canales de refrigeración/calefacción con cualquier forma en el interior de moldes de inyección

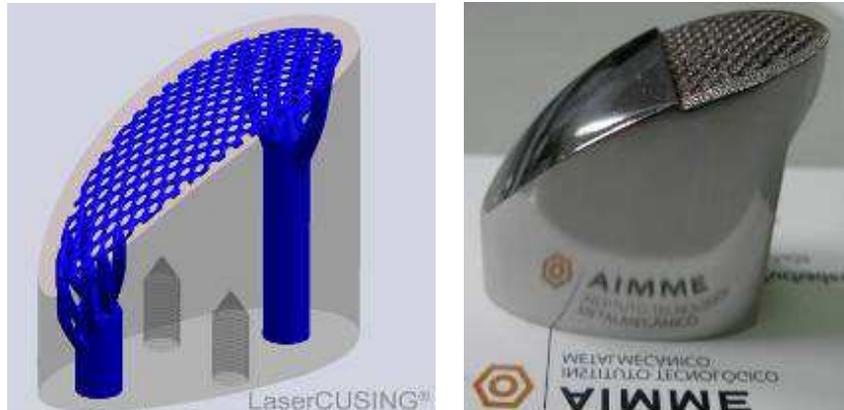


Figura 13. Izquierda, diseño del sistema de refrigeración adaptado a la superficie tipo malla. Derecha, inserto de molde fabricado con SLM en acero para trabajo en caliente, cortado para mostrar el interior de la malla de refrigeración. Cortesía Concept Laser GmbH.

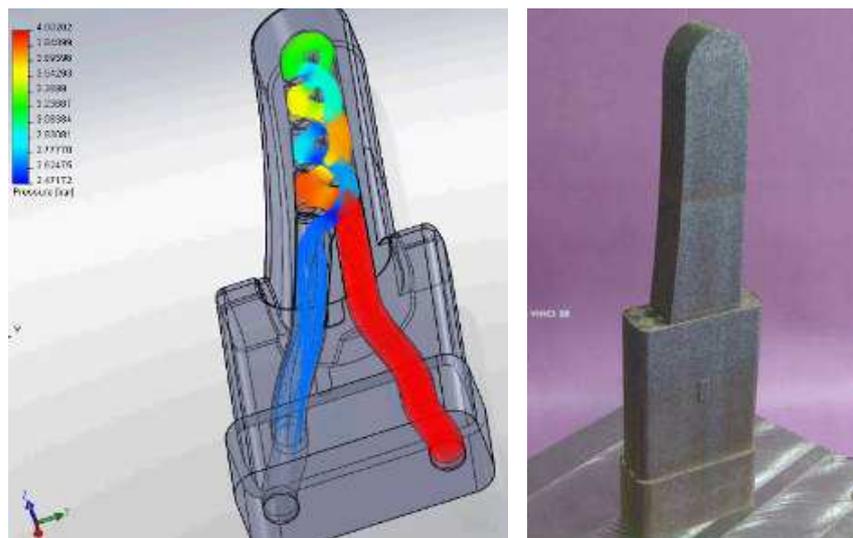


Figura 14. Izquierda diseño y simulación de fluidos mediante refrigeración en espiral adaptada a la geometría de la corredera para inyección de aluminio. Derecha corredera para inyección de aluminio fabricada con SLM en acero para trabajo en caliente. Fuente HTT, proyecto PROFIT subvencionado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio⁴.

⁴ Proyecto HTT. Estudio de canales de refrigeración adaptados para la inyección de aluminio. Informe técnico interno AIMME 2007-08. Proyecto financiado por el Ministerio Ciencia e Innovación de España.

1.6.2 Producto personalizado a partir de geometría escaneada del usuario o paciente



Figura 15. Ortesis tobillo-pie personalizada a la anatomía del paciente, fabricado mediante Estereolitografía. Fuente FABIO proyecto CONSORCIA subvencionado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio⁵.



Figura 16. Ortesis para rodilla personalizada a la anatomía del paciente, fabricado mediante Estereolitografía. Fuente FABIO proyecto CONSORCIA subvencionado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio⁵.

⁵ J. Delgado et al. 2010. FABIO project: Development of innovative customized medical devices through new biomaterials and additive manufacturing technologies. 3rd Int Conference on Additive Technologies, iCAT '10, 22-24 September 2010 Nova Gorica, Slovenia.



Figura 17. Implante vástago de cadera personalizado a la anatomía del paciente, fabricado en Ti6Al4V mediante EBM. Fuente FABIO proyecto CONSORCIA subvencionado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio⁵.

1.6.3 Productos con geometrías complejas, imposibles de fabricar por otro método de fabricación



Figura 18. Izquierda Melonia Shoe diseñado por Naim Josefi and Souzan Youssouf. Derecha, zapato fabricado por Sinterizado de Poliamida. Fuente Materialise www.materialise.com.



RATIO.MGX Pendant lamp by [Naomi Kaempfer](#)



TULIP.MGX Table lamp by [Peter Janssen](#)



LILY.MGX Table lamp by [Janne Kyttanen](#)



DETAIL.MGX Chandelier by [Dan Yeffe](#)

Figura 19. Lámparas con geometrías complejas fabricadas por Sinterizado Selectivo Laser de poliamida y Estereolitografía. Fuente Materialise www.materialise.com.

1.6.4 Scaffolds diseñados mediante CAD 3D, regiones porosas en implantes para mejorar osteointegración

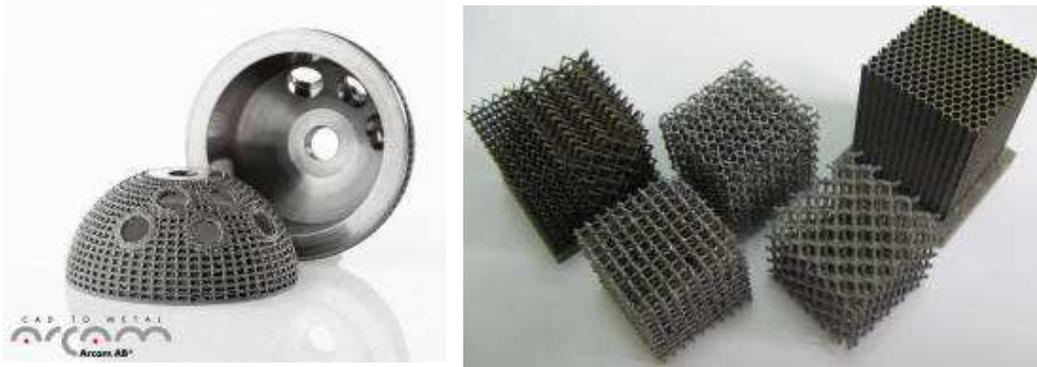


Figura 20. Izquierda cotilo acetabular, con estructura porosa 3D para mejorar la osteointegración del implante, fabricado en EBM con Ti6Al4V (Cortesía ARCAM AB). Derecha, distintos tipos de estructuras 3D fabricadas en acero inox. 316L (SLM) y en Ti6Al4V (EBM). Fuente proyecto MEPESS, subvencionado por IMPIVA ⁶.

1.6.5 Prototipos y piezas Near Net Shape



Figura 21. Ejemplos de prototipos fabricados por EBM en Ti6Al4V. Arriba para sector aeronáutico y debajo para automoción. Cortesía ARCAM AB www.arcam.com.

⁶ Proyecto MEPESS, Estudio de estructuras selectivas espaciales 3D por Fabricación Aditiva. Informe técnico interno AIMME 2008-09. Proyecto financiado por IMPIVA.

1.7 Motivación

1.7.1 Optimización de producto mediante herramientas MEF y FA

Como se ha comentado anteriormente, las tecnologías de fabricación por adición de material por capas permiten la fabricación de piezas y productos con geometrías muy complejas, prácticamente cualquier geometría es fabricable. Esto es debido a que no tienen las limitaciones de los procesos de fabricación convencionales (mecanizado, forja, inyección, etc.). Estas limitaciones de los procesos de fabricación convencionales pueden terminar condicionando la geometría del producto para que sea fabricable, aunque no aporten ningún valor añadido a su funcionalidad, incluso pueden llegar a reducirla, por ejemplo aumentando su peso.

Las tecnologías aditivas fabrican utilizando únicamente materia prima y el fichero CAD 3D de la pieza o producto, no existen utillajes ni sus limitaciones. Por tanto la geometría del producto, que cumple con la funcionalidad para la que fue diseñada, no debe ser prácticamente modificada para que pueda ser fabricada con la mayoría de las tecnologías aditivas, a diferencia de lo que ocurre con los procesos convencionales.

Por otra parte cuanto más trabajado esta el diseño de un producto, mejor cumplirá con la función para la que fue diseñado y mayor será su valor añadido. En el caso de que se utilizase una tecnología aditiva para la producción de 2 piezas con el mismo material y similar tamaño, el coste de fabricación sería prácticamente el mismo, ya que se procesa la misma cantidad de material, sin tener en cuenta cual de los dos tiene un diseño más complejo o más sencillo. Por esta razón, puede afirmarse que la complejidad del diseño de un producto no incrementa el coste de fabricación con tecnologías de FA. No ocurre así con los procesos convencionales, por ejemplo en mecanizado: donde cuanto más compleja sea la pieza, necesitará un mayor número de montajes y de operaciones de fresado, que finalmente se repercutirán en el coste de producción de la pieza.

En contraposición, a las tecnologías de fabricación aditiva les favorecen los diseños trabajados, más complejos y optimizados, ya que

cuanto más optimizado está un producto, normalmente menor material se utiliza y todavía resulta menor su coste de producción con FA, ya que se procesa una menor cantidad de material.

Estos procesos de fabricación aditiva permiten colocar ó añadir selectivamente el material donde sea necesario, por ejemplo, para soportar las cargas y condiciones de funcionamiento. Incluso es posible, fabricar productos que incluyan regiones con: estructuras espaciales en 3D para aligerar la pieza, espesores de pieza variables, zonas reforzadas (según las cargas a soportar), cavidades (donde no se necesita material), etc. Por tanto, el diseño de un producto puede ser totalmente orientado a la función que debe realizar y para comprobar su funcionamiento se realizan simulaciones y cálculos mediante ordenador por el Método de Elementos Finitos (MEF). Estas herramientas permiten simular el comportamiento de un diseño de acuerdo a las solicitaciones a las que se verá sometido: por ejemplo el nivel de tensiones al que se encuentra sometido un componente, dada una geometría, dadas unas cargas, un material y unas condiciones de contorno; la transmisión de calor a través de una pieza, etc.

Las simulaciones MEF, permiten optimizar la cantidad de material de una pieza, dadas unas cargas y condiciones de contorno, mediante iteraciones y variaciones de la geometría inicial. Estas herramientas orientan al ingeniero indicándole que región de la pieza trabaja menos que otras, por tanto en esta región de la pieza puede reducirse la cantidad de material y otras zonas reforzarse para soportar las condiciones de funcionamiento. De esta manera pueden obtenerse diseños de producto optimizados, con el mínimo material necesario, para soportar las condiciones de funcionamiento. Incluso pueden realizarse piezas con distintos comportamientos con un mismo material al incluir zonas rígidas y zonas flexibles.

La combinación de las herramientas MEF y las posibilidades de fabricación de las tecnologías aditivas permiten la concepción de una nueva tipología de productos de alto valor añadido.

1.7.2 Selección de la tecnología de fabricación aditiva

En el presente estudio se ha desarrollado una metodología de diseño óptimo para la fabricación de componentes por fabricación aditiva. Este estudio se ha centrado y desarrollado en una única tecnología de fabricación aditiva (SLM) ya que cada tecnología de FA ofrece unas capacidades y limitaciones diferentes. Sin embargo, el esquema de trabajo utilizado puede ser extrapolado para cualquier otra tecnología de fabricación aditiva.

Teniendo en cuenta la variedad de tecnologías de fabricación aditiva y los materiales disponibles (Figura 11) en este apartado se pretende justificar la selección de la tecnología de fabricación SLM y del material acero inoxidable AISI 316L. Los motivos son los siguientes:

- La optimización en peso ó aligeración de producto resulta más crítica en el caso de tecnologías de metal, debido a la mayor densidad de las aleaciones metálicas en comparación con la densidad de los polímeros. Por cada cm^3 de volumen ahorrado en un diseño optimizado, el peso del producto se reduce en mayor medida con metales que con polímeros.
- Las mejores propiedades mecánicas de las aleaciones metálicas frente a las propiedades de los polímeros permiten un mayor margen para el ahorro de material, ya que se pueden realizar espesores menores, cavidades internas, etc.
- El consumo energético es mayor para procesar metales que polímeros, disminuir las horas de proceso (menor cantidad de material a procesar) disminuye el coste energético de la fabricación. Las tecnologías aditivas que procesan metales utilizan una potencia entre 100 y 3000 W, las que procesan polímeros utilizan del orden de mW a unos pocos Vatios.
- En FA la materia prima se vende por peso (Kg) tanto para polímeros como aleaciones metálicas. Debido a la diferencia de densidad entre polímeros y metales se necesitan un mayor número de kilos para recargar los equipos de FA que trabajan con metales que los equipos de FA que procesan polímeros. La

diferencia en densidad es mucho más importante que la diferencia en precio por kilogramo por lo que resulta muy interesante desarrollar técnicas que, de alguna manera, optimicen el peso sobre todo en el caso de componentes metálicos por ser de mayor densidad que los polímeros. En el futuro se podría seguir los planteamientos de este trabajo para desarrollar procedimientos específicos para el caso de polímeros.

Las anteriores razones justifican mayores beneficios derivados de optimizar el diseño con metales que con polímeros. Actualmente se disponen de 2 tecnologías de fabricación aditiva en metal SLM y EBM, a continuación se presentan los motivos por los que se ha seleccionado SLM:

- En estos momentos, el proceso SLM ($2 \text{ cm}^3/\text{hora}$) es más lento que EBM ($12\text{-}60 \text{ cm}^3/\text{hora}$), por tanto disminuir la cantidad de material a procesar reduce en mayor proporción el tiempo de fabricación necesario para producir el componente y por tanto su coste.
- El equipo SLM disponible para la realización de este estudio procesa acero inoxidable AISI 316L. El equipo EBM disponible procesa la aleación de titanio Ti6Al4V. Debido a la diferencia en las densidades de los materiales ($\rho_{\text{Acero}} = 7,8 \text{ Kg/dm}^3$ vs $\rho_{\text{Titanio}} = 4,5 \text{ Kg/dm}^3$) la reducción del volumen en 1 cm^3 con acero produce una aligeración del peso del componente de casi el doble (1,733 veces) comparando con el titanio.
- Actualmente el proceso SLM procesa (dependiendo del equipo) todo tipo de aleaciones: aceros, titanios, aluminios, cobalto-cromo, inconel, metales preciosos, etc. EBM se encuentra principalmente enfocado al sector biomédico con aleaciones de titanio y de cobalto-cromo pese a la posibilidad de procesar muchas otras aleaciones metálicas. Derivado de la flexibilidad actual del proceso SLM, el presente estudio puede ser tenido en cuenta en un mayor número de aplicaciones.

- Debe añadirse que el uso del acero inoxidable está más extendido entre las diferentes aplicaciones industriales que el de la aleación de titanio, normalmente utilizada en biomedicina y en aeroespacio.

Como conclusión a las razones expuestas, resulta recomendable siempre el rediseño del componente para ser fabricado por SLM con el objetivo de reducir su coste, el tiempo de fabricación, al mismo tiempo que se optimiza la cantidad de material y su peso. En el caso de EBM la optimización del componente puede deberse más a motivos de mejora del funcionamiento (aligeración de peso, reducir la rigidez, etc.), aunque también reduce su coste y permite ahorrar material y tiempo de proceso.

La optimización del diseño o rediseño del componente debe hacerse teniendo en cuenta las capacidades y limitaciones del proceso de fabricación aditiva SLM y la información obtenida por los cálculos MEF.

2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

2.1 Introducción al proceso SLM

En el presente capítulo se expone el desarrollo realizado para la obtención de una metodología de diseño ó rediseño óptimo de un componente teniendo en cuenta inicialmente que será fabricado por la tecnología de fabricación aditiva SLM, por tanto resulta crucial analizar más detalladamente, el modo en que el material es procesado sucesivamente por capas, sus capacidades y limitaciones. El presente estudio se ha realizado con el equipo SLM, modelo M3 Linear de la empresa alemana Concept Laser GmbH. Los datos presentados como potencia del laser o espesor de capa están particularizados para el equipo M3. Estos datos son representativos para otros equipos SLM, que ofrecen similares prestaciones. En cualquier equipo SLM, el proceso de fabricación se compone básicamente de 2 etapas:

- 1- Reparto del material.** El polvo de metal, en este caso acero 316L, es repartido sobre la bandeja de fabricación, formando una capa de espesor 30 micras, por un elemento denominado "coater". El elemento coater o repartidor de polvo puede ser un rodillo, un cepillo o una cuchilla dependiendo del equipo SLM. El polvo metálico debe ser esférico para asegurar una buena fluidez y pueda ser repartido correctamente. El polvo esférico normalmente utilizado es producido por atomización por gas y en SLM se utiliza en el rango comprendido entre 15 y 45 micras. La distribución del tamaño de partícula (tipo gaussiana) comprendida entre 15 y 45 micras y la forma esférica permiten una correcta compactación del polvo (Figuras 22 y 23). Otros métodos de fabricación como

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

atomización por agua, procesos químicos o mecánicos (fragmentación del material) producen polvos con formas irregulares que no producen una correcta compactación.

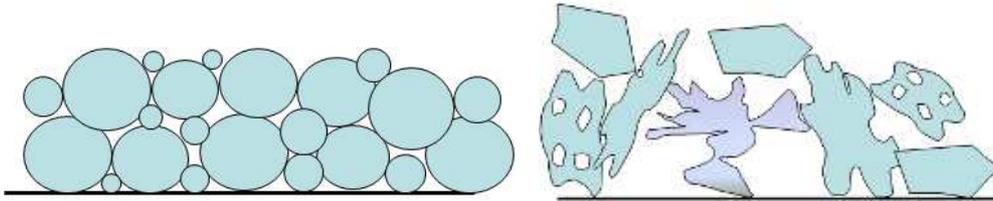


Figura 22. Izquierda, polvo esférico formando una capa más compacta que el caso de utilizar polvos irregulares (derecha).



Figura 23. Izquierda, material de partida polvo metálico esférico. Derecha, imagen de la superficie de una capa de polvo repartida en el proceso SLM.

- 2- Fusión por laser de la capa del polvo.** El haz laser funde selectivamente el polvo de la capa siguiendo el contorno e interior de la pieza para cada capa (Figura 27). El cabezal del Laser, a cierta altura fija, se desplaza siguiendo los ejes X e Y en un plano paralelo horizontal a la bandeja de fabricación. Mediante el posicionamiento del cabezal del Laser y un juego de espejos el haz sigue las trayectorias necesarias para fundir el polvo metálico, correspondientes a la sección de la pieza en cada capa. Una vez, se ha procesado una capa, la plataforma de fabricación desciende $30\ \mu\text{m}$ en Z y se reparte una nueva capa de polvo metálico encima (Figuras 24 y 25).

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

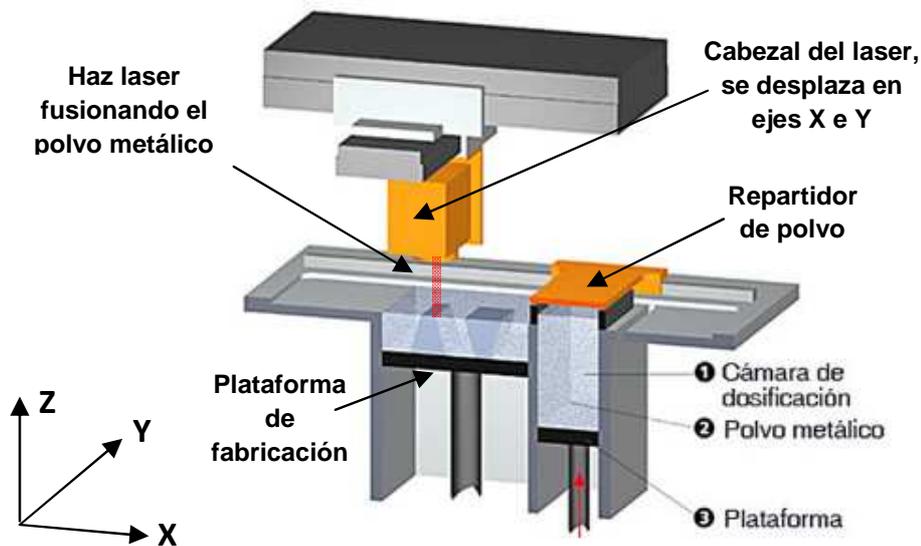


Figura 24. Esquema del proceso de fabricación SLM con los principales elementos: repartidor de polvo, cabezal laser, plataforma fabricación, etc. Cortesía Concept Laser GmbH.

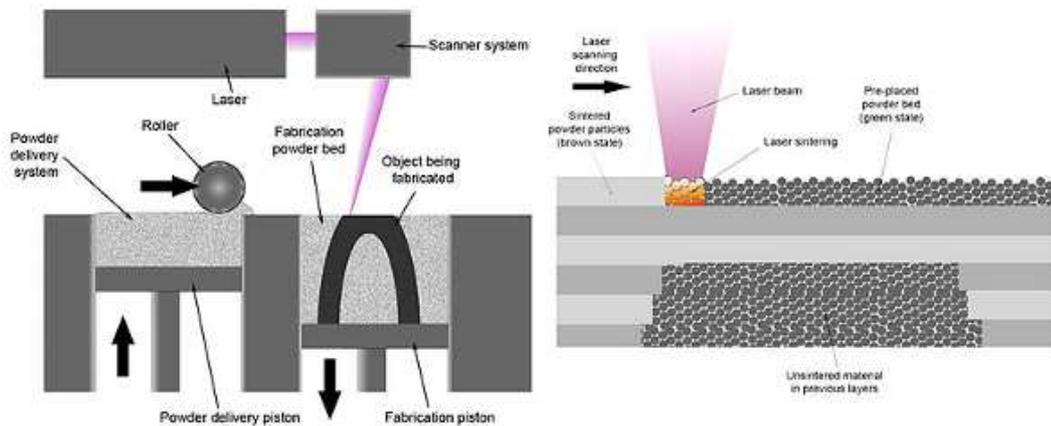


Figura 25. Esquema del proceso de fabricación SLM. Izquierda, el depósito sube para suministrar el polvo metálico, el rodillo reparte una fina capa de polvo sobre la bandeja de fabricación, que es procesada por el láser. Derecha, detalle de la fusión del polvo metálico por el láser en cada capa.

Se ha comentado que el tamaño del polvo utilizado para la fabricación aditiva en SLM está comprendido en el rango 15-45 μm y que el espesor de capa utilizado es 30 μm , por tanto podría pensarse que existen partículas de polvo ($>$ a 30 μm) que no forman parte de las capas. Esta diferencia se debe a que para conseguir un espesor de capa de 30 μm de material procesado es necesario repartir una capa de polvo metálico de al menos 2 o 3 veces el espesor de la capa. Esto se debe a que la densidad aparente del material en formato polvo metálico es del 50-55% aproximadamente de la densidad del material procesado. Al fundirse el material en polvo rellena los huecos generados entre el contacto de las partículas de polvo (esferas) y la sección procesada se encoge (Figura 26). Por tanto, el coater reparte el polvo (15-45 μm) con un espesor de capa mayor a 30 μm , pero tras el procesamiento de la capa, la plataforma de fabricación desciende siempre el valor 30 μm , el polvo sobrante queda almacenado al lado de la plataforma de fabricación.

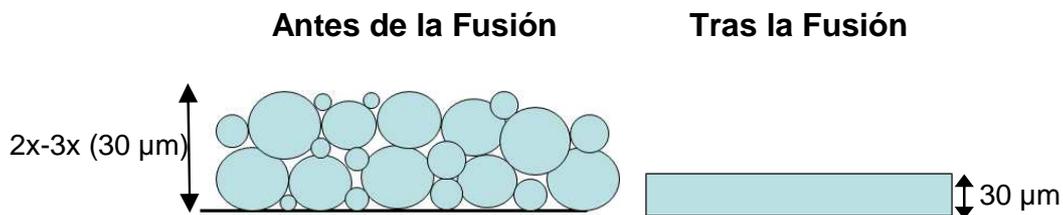


Figura 26. Izquierda, espesor de la capa de polvo metálico antes de la fusión por láser, donde existen huecos entre las partículas esféricas. Derecha, espesor de capa tras la fusión del polvo metálico.

Comentar que el haz láser de 100 W del equipo SLM, se concentran en un foco de diámetro 0,2 mm de modo que se introduce la energía suficiente para fundir el polvo metálico de la capa actual y unirla a las capas anteriores.

El proceso SLM sigue una estrategia durante la fusión de cada capa, primero se procesan los contornos de la pieza (exteriores e interiores) tras esto el láser procesa la sección

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

interna de la pieza. La sección interna de la pieza es procesada siguiendo una estrategia de damero. El área de pieza en esa capa, es dividida en cuadrados de lado 5 mm. El laser fusiona el área de un cuadrado y salta a procesar el área de otro cuadrado lejano, para no sobrecalentar una zona de la pieza, permitiendo así un enfriamiento del material en la capa de forma más uniforme y evitando así tensiones internas en el material derivadas de una diferente velocidad de enfriamiento.

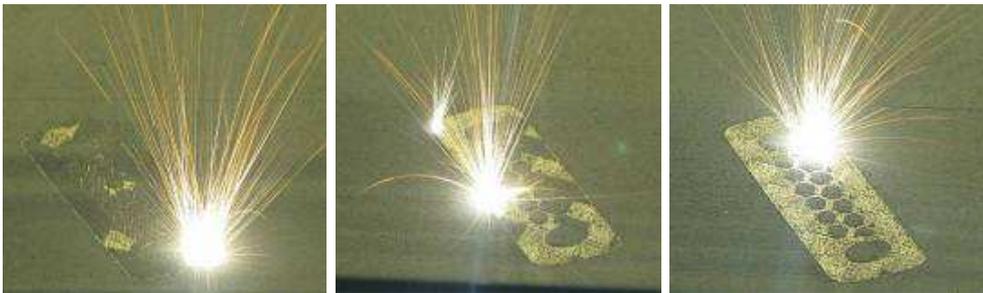


Figura 27. De izquierda a derecha, procesado de contornos de la pieza, laser saltando de un cuadrado a otro mientras fusiona la sección interna de la pieza y capa terminada.

En la sección interna de la pieza, el laser fusiona un cuadrado mediante cordones de soldadura paralelos a 45° siguiendo la diagonal del cuadrado. Los cordones de soldadura disponen de cierto solape para asegurar una buena cohesión entre ellos. Las áreas cuadradas contiguas son procesadas con inclinación a -45° , perpendiculares a los anteriores, para intentar conseguir las propiedades más isotropas posibles en el material de la pieza dentro de una misma capa (Figura 28). La siguiente capa es procesada con una estrategia de damero similar pero la disposición de los cuadrados no coincide con la capa predecesora, con el objetivo de conseguir la máxima isotropía en la dirección de construcción vertical (eje Z).



Figura 28. Imagen de una muestra de material fabricada mediante SLM. Detalle de la estrategia de pintado en damero en la última capa y los cordones de soldadura dentro de cada cuadrado. Se aprecian cuadrados (gris claro) donde el laser suelda siguiendo cordones a 45° y cuadrados (oscuros) donde hay cordones a -45° , perpendiculares a los anteriores.

Los 2 pasos anteriores, reparto y fusión del polvo, se repiten hasta que la pieza se ha completado, es decir, sobre una capa de material ya procesado se reparte una nueva capa de material que se vuelve a procesar. En cada capa el haz laser procesa una sección de la pieza diferente siguiendo el patrón del fichero 3D dividido en capas y cohesionando la nueva capa con las anteriores, de modo que el resultado final es un componente físico que representa perfectamente el modelo CAD 3D y ha sido fabricado a partir de la adición continuada de capas cohesionadas entre ellas.

Para finalizar esta sección, es necesario explicar que en el proceso SLM, la fabricación comienza sobre una placa prismática de acero. Desde la superficie plana de esta placa base las piezas van creciendo al añadirse capas. Cuando el proceso de fabricación ha terminado, las piezas quedan soldadas a la placa base, para separarlas se realiza un corte por la base de las piezas por sierra o por hilo. La placa base se rectifica en un centro de mecanizado y puede volver a ser utilizada.

2.2 Restricciones de fabricación. Diseño de experimentos

Con el objetivo de determinar unas reglas de diseño para el proceso de fabricación aditiva SLM resulta fundamental analizar y conocer los límites de cada proceso de fabricación, es decir, sus capacidades y limitaciones de fabricación. Como parte de este trabajo de investigación se han desarrollado los siguientes tests para evaluar las capacidades y limitaciones de fabricación del proceso SLM.

En esta sección se han modelado unas geometrías en 3D con diferentes elementos básicos. Estos elementos básicos han sido diseñados con varias dimensiones ó tamaños con el fin de comprobar tras la fabricación aditiva en SLM que dimensiones son críticas para cada elemento básico, y la calidad de los detalles obtenida.

Se han diseñado los siguientes elementos básicos ó geometrías básicas de diseño:

2.2.1 Agujeros verticales y horizontales

2.2.2 Superficies inclinadas

2.2.3 Edición de Soportes

2.2.4 Voladizos mono-apoyados y biapoyados

2.2.5 Detalles

2.2.6 Mecanizado

Estas geometrías se han fabricado mediante SLM en acero inox. AISI 316L, a continuación puede observarse la designación 316 LVM (Low Carbon Vacuum Melting), que únicamente hace referencia a las condiciones en las que se ha preparado la aleación. Tras el análisis de las geometrías en se han obtenido unas reglas de diseño.

2.2.1 Agujeros verticales y horizontales

Se ha diseñado una plancha en 3D con agujeros cilíndricos de distintas dimensiones en diámetro, con disposición vertical y horizontal (Figura 29).

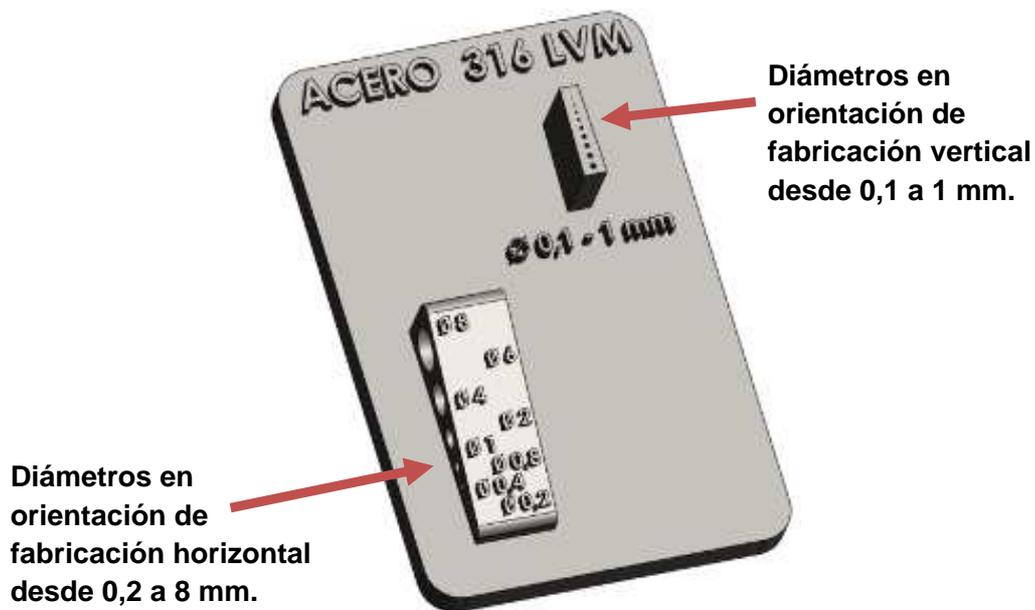


Figura 29. Imagen CAD 3D de la plancha diseñada para el análisis de diámetros.

- **Agujeros cilíndricos verticales:** se ha diseñado una batería de agujeros con diámetros desde 0,1 hasta 1 mm. No se han diseñado agujeros verticales de mayor tamaño porque se han observado componentes con diámetros de aproximadamente 300 mm, tamaño de la plataforma de fabricación SLM (Figura 30). Por tanto no existe limitación superior de fabricación pero con los diámetros diseñados se pretende conocer la limitación inferior.

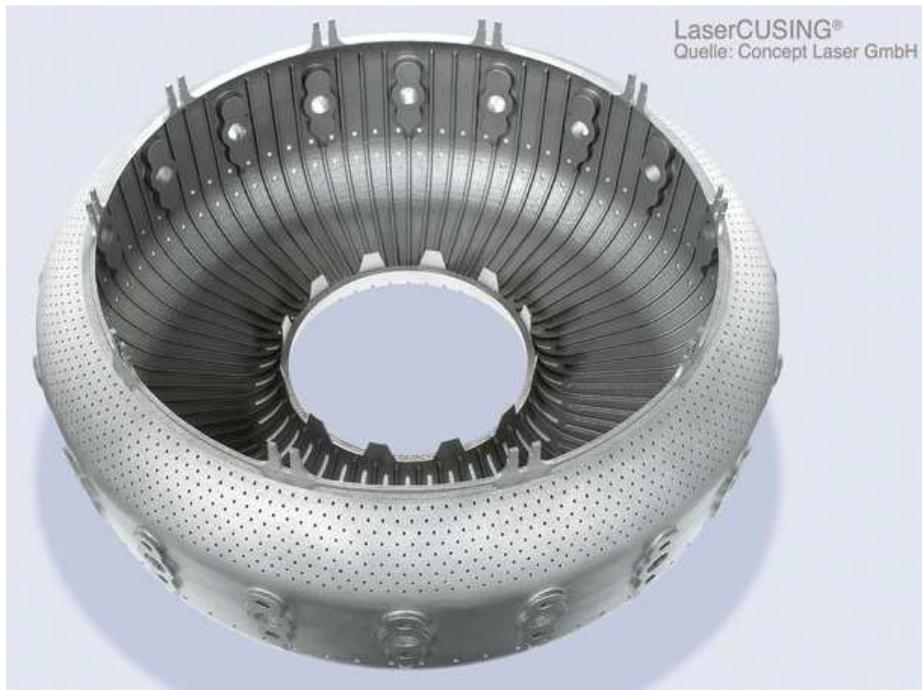


Figura 30. Componente para sector aeroespacio, fabricado en SLM de diámetro 300 mm. Cortesía Concept Laser GmbH.

- **Agujeros cilíndricos horizontales:** en este caso existe una limitación superior de fabricación y una limitación inferior con respecto a una buena definición y detalle del agujero. Se ha diseñado una batería con diámetros desde 8 hasta 0,2 mm (Figura 29).

Como se ha comentado, en el caso de agujeros cilíndricos horizontales existe una limitación de fabricabilidad a partir de una dimensión, alrededor de 8 mm de diámetro según el proveedor de la tecnología SLM⁷. Esta limitación surge del propio proceso de fabricación ya que el material de la piezas

⁷ Rene Hubert, Concept Laser's internal report for training *Design of conformal cooling*, report delivered from Concept Laser GmbH.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

se añade capa a capa (espesor de capa 30 micras), mediante la energía de un laser que funde el polvo metálico correspondiente a la sección de la pieza en cada capa.

Por ejemplo, en el caso de fabricar una pieza con un agujero horizontal (Figura 31) mediante SLM, el laser fundiría la sección de la pieza añadiendo el material por capas. El agujero de la pieza aparece al no fundir el laser la zona media de la capa en un conjunto de capas n , equivalente al diámetro ($n \cdot 30 \text{ micras} = D$ en mm). Debe tenerse en cuenta que el proceso SLM fabrica añadiendo capas de espesor 30 micras, lo que en realidad produce es un escalonado de pequeño tamaño, casi imperceptible. En la figura 32, haciendo zoom sobre la pieza, se muestran distintas instantáneas de progreso de como se fabricaría teóricamente el agujero de la pieza por capas en SLM, donde se aprecia el escalonado.

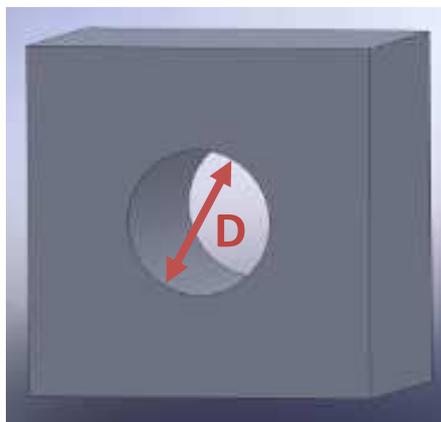


Figura 31. Diseño CAD 3D de un agujero cilíndrico horizontal.

En la última imagen de la secuencia de la figura 32 puede observarse el procesado de la última capa para cerrar el agujero. La construcción es como un voladizo bi-apoyado, donde debajo de la capa actual hay polvo metálico sin procesar. Como se ha comentado anteriormente, cuando el laser procesa la

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

capa actual parte de la energía funde esta capa y parte de la energía pasa a las anteriores ya fabricadas, en el caso de que debajo haya polvo sin procesar parte de este polvo se queda sinterizado a la última capa por efecto del exceso de energía y calor suministrados por el laser. Este polvo sinterizado produce que el espesor de esa capa no sea de 30 micras en la zona de cierre de un agujero cilíndrico, lo cual implica que no se completa un círculo perfecto y construye un círculo achatado.

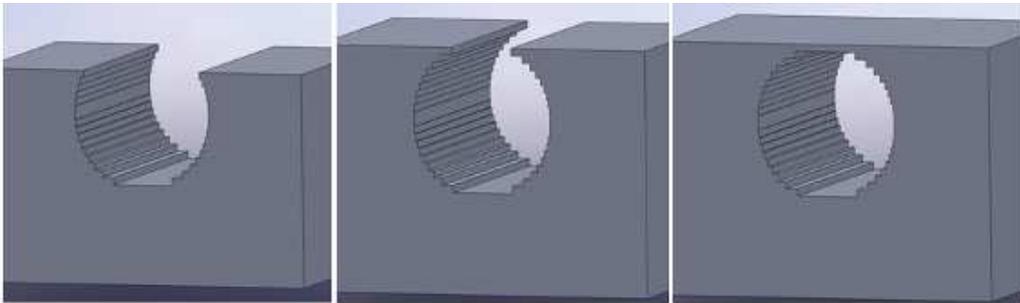


Figura 32. Imágenes CAD 3D que ilustran la secuencia de construcción de un agujero cilíndrico horizontal mediante SLM.

Esta imperfección de cierre de los agujeros, es mayor o más perceptible, cuanto mayor sea el voladizo bi-apoyado de la última capa, el cual está directamente relacionado con el diámetro del agujero horizontal.

En el caso de que este voladizo bi-apoyado sea demasiado grande, la última capa se rompería y la pieza sería defectuosa. Debe recordarse que el espesor de la capa es muy fino, 30 micras, debe auto-sostenerse mientras es procesada por el laser y al mismo tiempo sostener el polvo sinterizado situado debajo (Figura 33). Todo esto, se traduce en que no se puede superar una cierta dimensión en diámetro.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

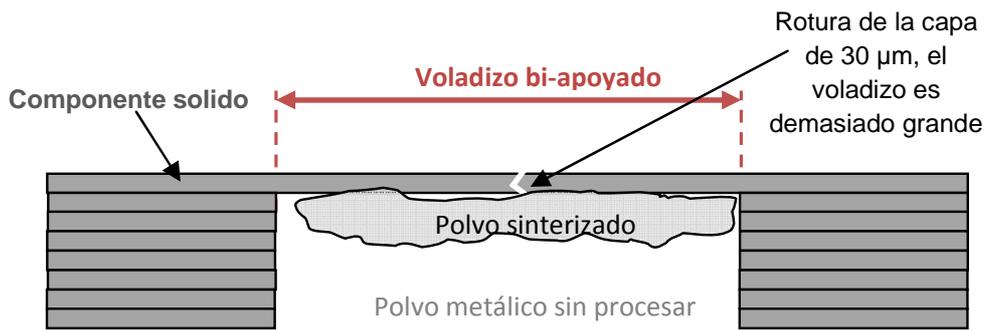


Figura 33. Esquema de construcción en capas. En el proceso SLM, el voladizo bi-apoyado no debe superar cierto valor para evitar roturas de la última capa de cierre de los orificios.

La geometría de la plancha se ha optimizado para ahorrar material. Tras esto, se ha fabricado la plancha para analizar los diámetros verticales y horizontales, con el objetivo de conocer las capacidades y limitaciones del proceso SLM (Figura 34).

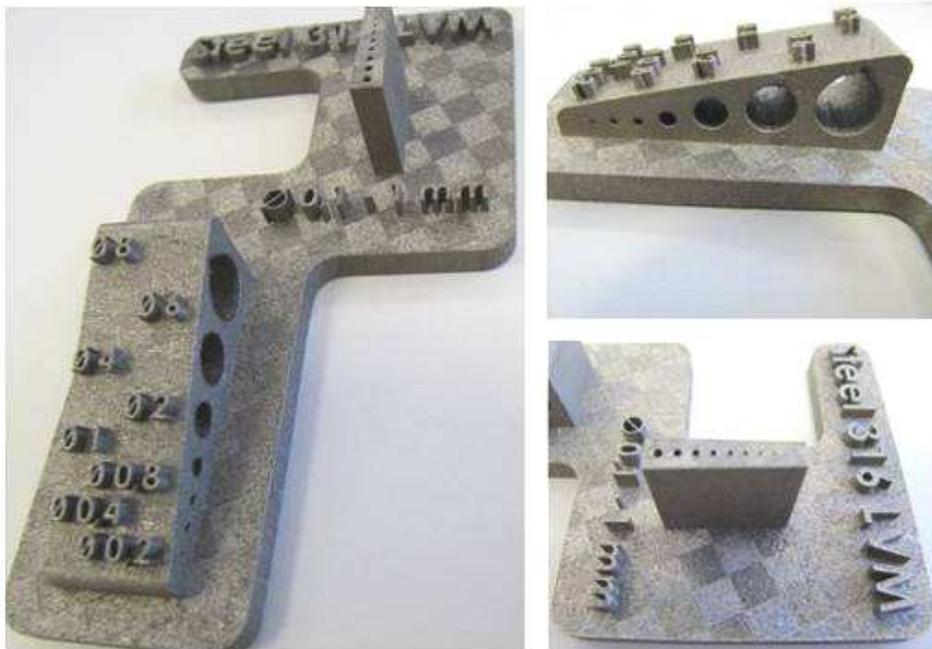


Figura 34. Izquierda, imagen general de la plancha para análisis de diámetros fabricada mediante SLM en acero inox. 316L. Derecha superior, detalle de los agujeros horizontales. Derecha inferior, detalle de los agujeros verticales.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

Para el análisis de las capacidades y limitaciones respecto a la fabricación de agujeros, se han realizado medidas de los agujeros mediante un pie de rey y agujas calibradas. También se ha observado el acabado superficial de los agujeros.

ANALISIS AGUJEROS HORIZONTALES	
Ø (mm)	OBSERVACIONES
0,2	El agujero es más pequeño y prácticamente está cerrado.
0,4	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 0,3 mm
0,8	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 0,7 mm
1	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 0,9 mm
2	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 1,9 mm
4	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 3,9 mm
6	Se ha fabricado con 5,9 mm, pero la geometría tiene un ligero descuelgue en la parte superior.
8	Se ha fabricado pero la geometría no es cilíndrica sobretodo en la parte superior.

Tabla 1. Resumen de resultados obtenidos con diámetros horizontales.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

ANALISIS AGUJEROS VERTICALES	
Ø (mm)	OBSERVACIONES
0,1	No se ha fabricado correctamente, el agujero vertical está cerrado
0,2	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 0,1 mm
0,3	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 0,2 mm
0,4	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 0,3 mm
0,5	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 0,4 mm
0,6	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 0,5 mm
0,7	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 0,6 mm
0,8	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 0,7 mm
0,9	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 0,8 mm
1	OK, aunque el tamaño del diámetro es aprox. 0,9 mm

Tabla 2. Resumen de resultados obtenidos con diámetros verticales.

Se ha observado una diferencia entre la dimensión del diámetro diseñada y la fabricada. Los agujeros cilíndricos suelen ser 0,1 mm más pequeños, esto puede ser debido a que el polvo sin procesar que está en contacto alrededor de la pieza se queda sinterizado a la pieza por el calor generado por el haz laser al fusionar la sección de la pieza. Por tanto los orificios son menores y la pieza mayor.

2.2.2 Superficies inclinadas

En el proceso SLM, es posible fabricar superficies inclinadas sin soporte por encima de 45° respecto de la placa base horizontal, según el proveedor de la tecnología SLM¹. En el caso de fabricar la pieza de la figura 35 mediante SLM, la zona crítica es la cara inclinada a 45° respecto a la horizontal, ya que se fabrica por capas, si hacemos un zoom, en realidad lo que se está fabricando mediante SLM es una figura aproximada escalonada en capas de $30\ \mu\text{m}$ de espesor (Figura 37).

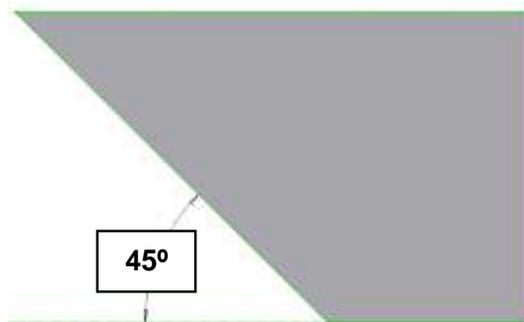


Figura 35. Diseño CAD 3D de un plano inclinado.

En la figura 36 se observa que el plano inclinado se fabrica al acumulando capas de distinto tamaño acabadas con un pequeño voladizo, el mismo mientras no se cambie la inclinación de la pared. Como ya se ha comentado debajo de cada volado existe polvo metálico sin procesar que queda sinterizado por el calor al procesar el haz laser la zona del volado.

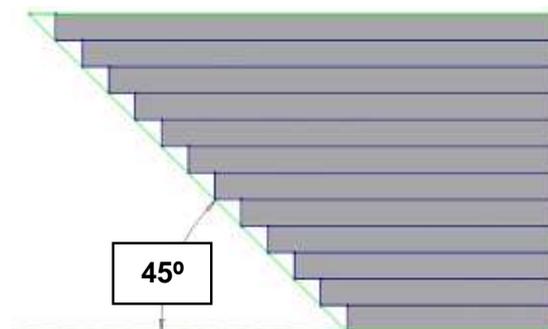


Figura 36. Imagen de un plano inclinado a 45° fabricado por capas en SLM.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

En la figura 37 se observa que en el plano inclinado a 60° , los voladizos que sobresalen en cada capa son menores que a 45° . Por tanto, debajo del voladizo de cada capa se sinteriza una menor cantidad de polvo metálico y el plano inclinado tiene un acabado superficial mejor tras la fabricación en SLM.

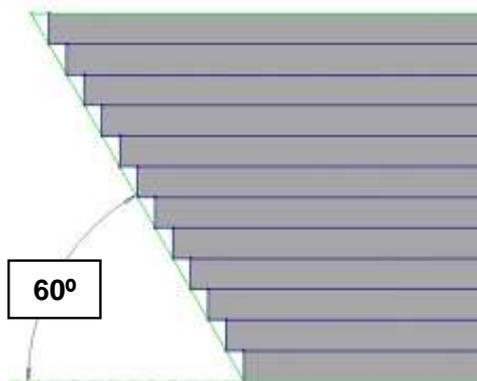


Figura 37. Imagen de plano inclinado a 60° fabricado por capas en SLM.

En el caso de ángulos inferiores a 45° sobre la horizontal, por ejemplo 30° , el volado es más grande. El volado de las capas no es soportado por el polvo sin procesar de debajo. Al contrario el polvo situado debajo del volado queda sinterizado a este, quedando esta zona muy debilitada (Figura 38). Durante la etapa de reparto de polvo, termina desprendiéndose el volado de la pieza. Esta zona de plano inclinado continúa construyéndose mal cada capa lo que al final supone una pieza defectuosa.

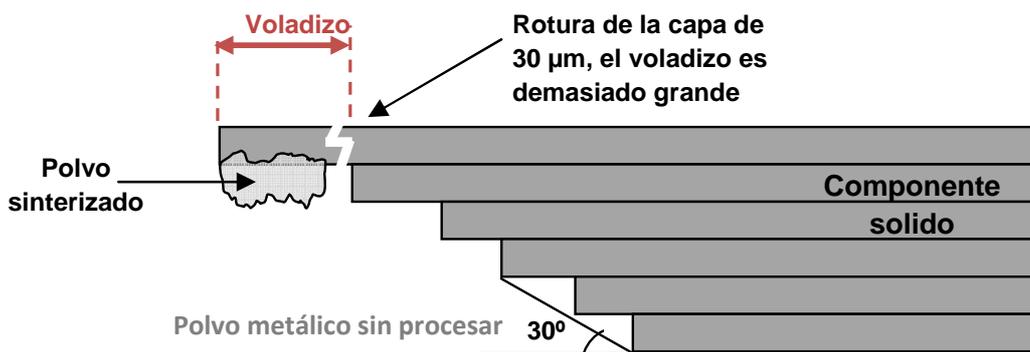


Figura 38. Imagen de un plano inclinado a 30° fabricado por capas en SLM. Los voladizos de la capa, generados por la inclinación se rompen debido a su debilidad.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

Con un ángulo mayor a 45° , por ejemplo 60° , se observa que la fabricación tiene menos problemas y riesgos, es más segura porque el volado (ó escalonado) es más pequeño, lo que se traduce también en una mejor calidad superficial.

Se ha diseñado una plancha con prismas rectangulares que tienen planos inclinados que varían entre 45° , 60° , 75° y 90° . En el interior de estos prismas se han diseñado agujeros cilíndricos de diámetro 5 mm siguiendo la misma inclinación del prisma. Estas geometrías han servido para analizar las diferentes calidades en las superficies al variar la inclinación respecto a la horizontal (Figura 39).



Figura 39. Imagen CAD 3D de la plancha diseñada para el análisis de planos y agujeros inclinados.

La geometría de la plancha se ha optimizado para ahorrar material y se han añadido textos con los diferentes ángulos de pared sobre la horizontal (Figura 40). Se ha fabricado la plancha para análisis de ángulos en acero inox. 316LVM sin añadir soportes en las caras inclinadas. Se aprecia la estrategia de damero sobre las superficies horizontales, paralelas a la plataforma de trabajo.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

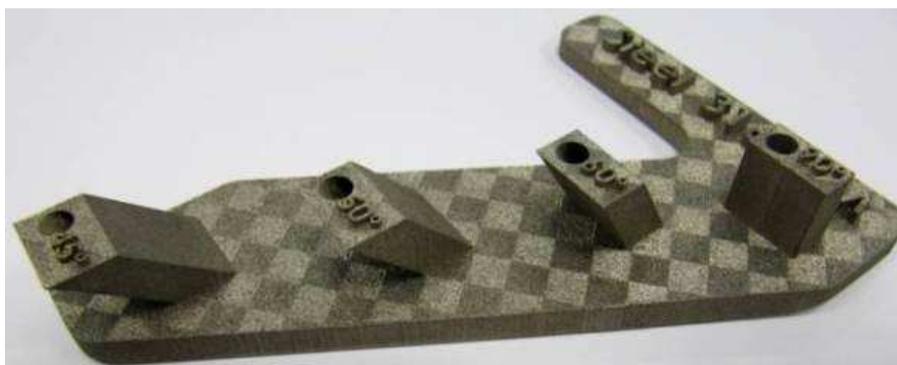


Figura 40. Imagen de la plancha para análisis de ángulos en acero inox. 316 LVM tras la fabricación por SLM.

ANALISIS SUPERFICIES INCLINADAS		
Ángulos	Cara plana inclinada inferior	Cara cilíndrica
45°	Se ha fabricado pero algunas zonas de la superficie se han desprendido. El acabado superficial de la cara inferior es bastante rugoso.	OK
50°	OK. El acabado superficial de la cara inferior es algo rugoso.	OK
60°	OK	OK
90°	OK	OK

Tabla 3. Resumen de resultados obtenidos con superficies inclinadas con diferentes ángulos.

Se ha observado que las caras cilíndricas se han construido mejor que las planas y tienen mejor acabado superficial, ya que el volado de la geometría cilíndrica es más rígido y se auto-soporta mejor que en el caso de pared plana inclinada. Se observa que

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

aparecen problemas de fabricación (desprendimientos) a 45° en la pared plana inclinada pese a ser una geometría relativamente pequeña. En fabricaciones de mayor tamaño y altura estos problemas probablemente sean mayores, ya que los desprendimientos de las capas, pequeños trozos de metal desprendido quedan dispersos por la plataforma de fabricación, produciendo principalmente dos efectos indeseables:

1. El coater (repartidor de polvo) de goma queda dañado a lo largo de diversas capas y reparte el polvo de manera incorrecta dejando surcos y líneas que se transmiten a la pieza.
2. Las virutas golpean a las piezas que hayan en la plataforma de fabricación al ser desplazadas por el coater en la operación de reparto de polvo, pudiendo dañar otras geometrías en proceso de fabricación.

Por tanto, resulta recomendable no utilizar planos inclinados sin soportes a 45° sobre la horizontal, ya que parece ser el límite fabricable, para este material y para el proceso SLM.

2.2.3 Edición de Soportes

Como ya se ha comentado en la sección 1.2, las tecnologías de fabricación aditiva utilizan soportes. Se denomina soporte a finas columnas de material que soportan o aguantan las caras planas horizontales de la pieza, como ocurre en la construcción de edificios, donde para soportar el piso superior de un edificio se utilizan puntales. En el caso concreto del proceso SLM, estas finas columnas o “puntales” aseguran la fabricación correcta de ciertas geometrías de la pieza, volados, o caras inclinadas por debajo de 45° de la horizontal. Estos soportes son retirados tras la fabricación, manualmente o mediante mecanizado porque no forman parte de la geometría final de la pieza (Sección 1.2.5). Estos soportes pueden ser diseñados en forma de finas columnas o en forma de tramas.

Para el análisis de los soportes, se han planteado una batería de 7 prismas (10x10x5 mm) que están elevados 10 mm aprox. y

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

paralelamente a la plataforma de trabajo (Figura 41). La superficie horizontal inferior de los prismas está soportada mediante distintas tramas con distinto espaciado de trama (Figura 42). Se han diseñado soportes con espacios de trama de 0,8 a 2 mm con incrementos de 0,2 mm. El mínimo recomendable según el proveedor de la tecnología es 0,8 mm¹. Así, con una trama más cerrada se asegura una mejor fabricación de la superficie horizontal donde comienza el prisma, pero resulta más complejo retirar el soporte tras la fabricación. Con una trama más abierta resulta más sencillo retirar el soporte pero existe una mayor probabilidad de defectos en las primeras capas del prisma.

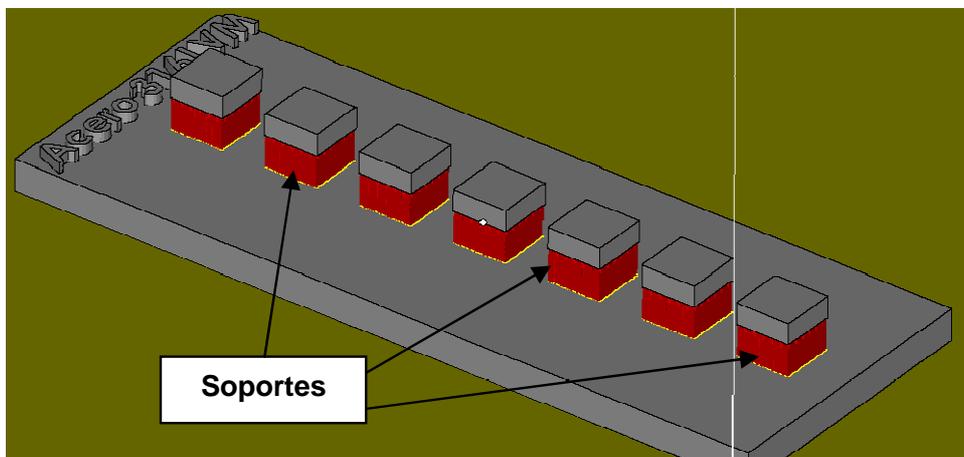


Figura 41. Imagen con prismas posicionados en altura soportados con distinto espaciado de trama (en rojo el soporte).

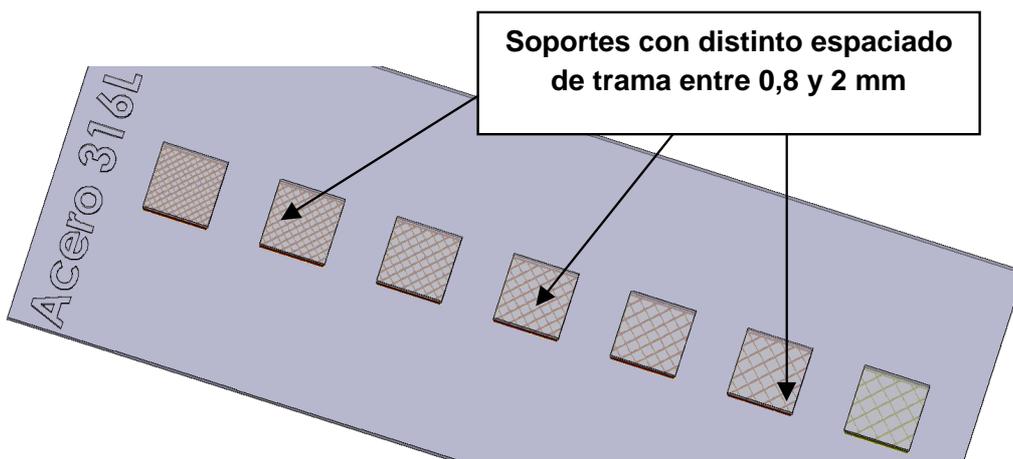


Figura 42. Imagen que muestra los prismas en transparente desde arriba con distinto entramado de soporte.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

Mediante la fabricación de esta plancha para el análisis de soportes (Figuras 43 y 44) se ha determinado un espaciado óptimo de trama que permite un compromiso entre fiabilidad durante la fabricación, buen acabado y eliminación sencilla de soporte.

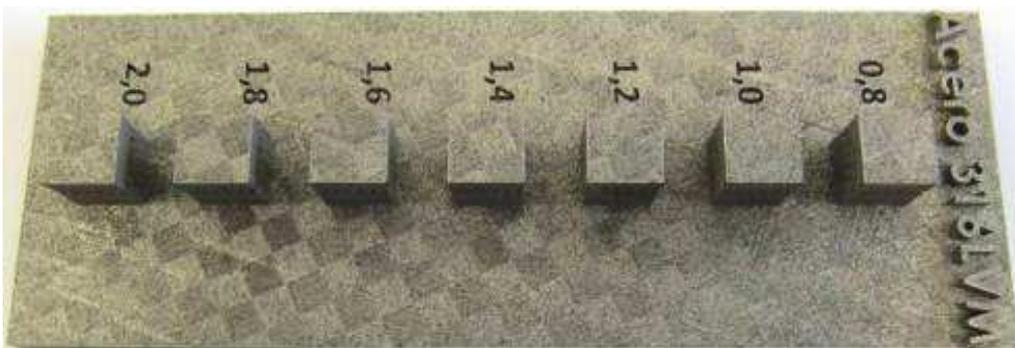


Figura 43. Imagen de la plancha fabricada para análisis de soportes en acero inox. 316 LVM.

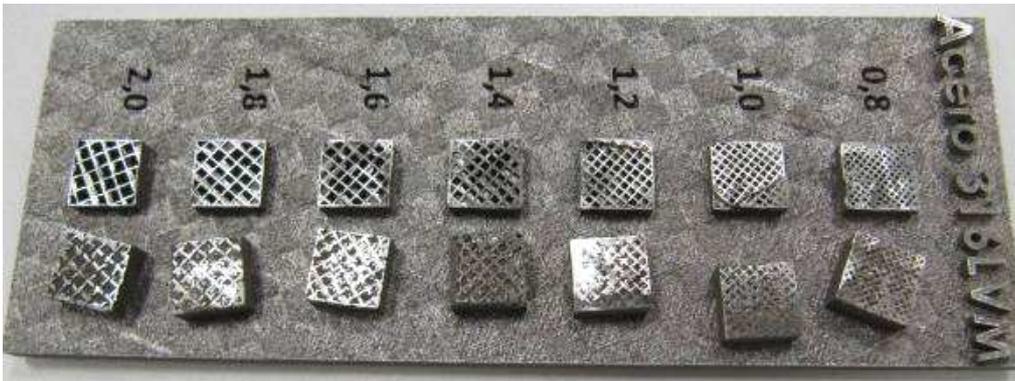


Figura 44. Imagen de los prismas y soportes tras realizar los cortes.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

ANALISIS SOPORTES	
Espaciado trama (mm)	OBSERVACIONES
0,8	OK, pero la trama es muy densa y es muy costoso la eliminación de soporte.
1	OK, pero la trama es muy densa y es muy costoso la eliminación de soporte.
1,2	OK, buen soporte, resulta un poco costosa su eliminación. Adecuado para soportar grandes superficies horizontales.
1,4	OK, buen soporte, resulta menos costosa su eliminación. Adecuado para soportar superficies horizontales de tamaño medio.
1,6	OK, buen soporte, resulta menos costoso la eliminación del soporte. Adecuado para soportar pequeñas superficies.
1,8	Desprendimiento, soporte insuficiente, la superficie inferior del prisma no es plana.
2	Desprendimiento, soporte insuficiente, la superficie inferior del prisma no es plana.

Tabla 4. Resumen de resultados obtenidos del tamaño de trama.

2.2.4 Voladizos mono-apoyados y bi-apoyados

El proceso SLM permite la fabricación de pequeños volados, sin la necesidad de soportes. Existen los volados mono-apoyados (apoyados en un lateral) y los bi-apoyados (Figura 33).

Se han diseñado una plancha con una batería de voladizos con distintas dimensiones, tanto para los apoyados en un lateral, como los bi-apoyados (Figura 45). Las dimensiones de los volados laterales varían entre 0,1 y 0,6 mm y los bi-apoyados varían entre 0,3 y 0,9 mm. Según el proveedor de la tecnología SLM, el máximo recomendable en el caso de volado lateral se encuentra entre 0,3 y 0,4 mm y en el caso de bi-apoyado sería 0,7 mm¹.

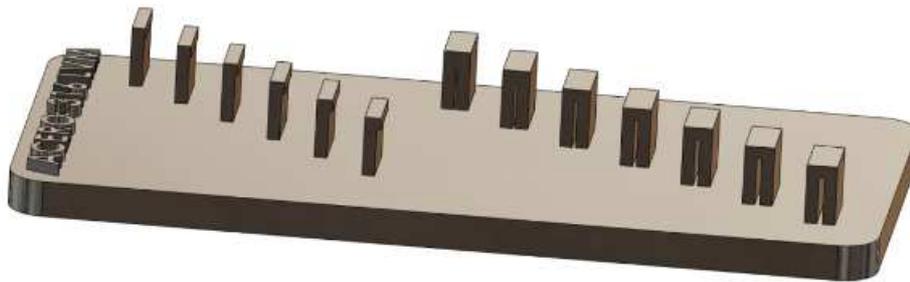


Figura 45. Imagen de la plancha para análisis de voladizos con volados laterales y bi-apoyados.

Es importante mencionar que las geometrías no se ponen en línea para que el coater haga una entrada progresiva sobre las piezas, en este caso volados laterales y bi-apoyados. Una entrada progresiva al repartir el polvo, evita un desgaste rápido del coater y permite cubrir con una capa de polvo uniforme las piezas que se están fabricando con el proceso SLM.

La geometría de la plancha se ha rediseñado para ahorrar material (Figura 46). Se ha fabricado la plancha para análisis de ángulos en acero inox. 316LVM sin añadir soportes en los volados.

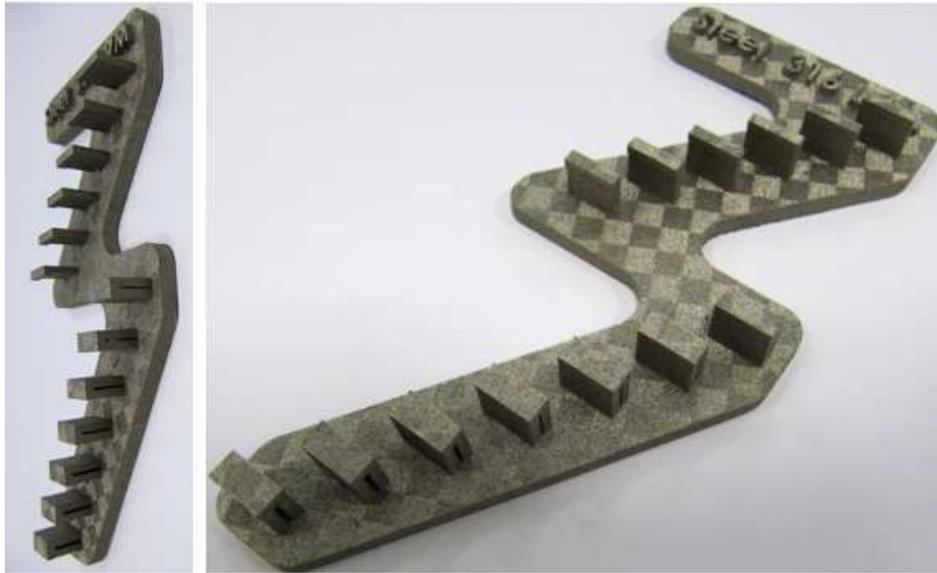


Figura 46. Diferentes vistas de la plancha para análisis de voladizos en acero inox. 316 LVM.

ANALISIS VOLADOS LATERALES	
Dimensión (mm)	OBSERVACIONES
0,1	OK
0,2	OK pero la superficie empieza a ser rugosa
0,3	Se ha fabricado pero la superficie es rugosa
0,4	Se ha fabricado pero la superficie es rugosa, la superficie volada no es completamente plana.
0,5	Se ha fabricado pero la superficie es muy rugosa, la superficie volada no es completamente plana.
0,6	Desprendimiento, soporte insuficiente, la superficie inferior del prisma no es plana.

Tabla 5. Resumen de resultados obtenidos para los volados laterales.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

ANALISIS VOLADOS BIAPOYADOS	
Dimensión (mm)	OBSERVACIONES
0,3	Se ha fabricado correctamente
0,4	Se ha fabricado correctamente
0,5	Se ha fabricado correctamente
0,6	Se ha fabricado correctamente
0,7	Se ha fabricado correctamente
0,8	Se ha fabricado correctamente
0,9	Se ha fabricado correctamente, aunque se aprecia que la superficie inferior es más rugosa y empieza a no ser plana.

Tabla 6. Resumen de resultados obtenidos para los volados bi-apoyados.

2.2.5 Detalles

Para analizar las capacidades del proceso SLM para la realización de detalles, se han diseñado sobre una plancha una batería de finas columnas y otra con finas paredes (Figura 47). Mediante este diseño se puede comprobar el límite inferior de detalles con la tecnología. Los tamaños de los detalles varían entre 0,2 y 1 mm, en intervalos de 0,2 mm. Se ha escogido el valor inferior de 0,2 mm, que corresponde con el mínimo teórico posible, ya que el diámetro del haz laser es 0,2 mm.

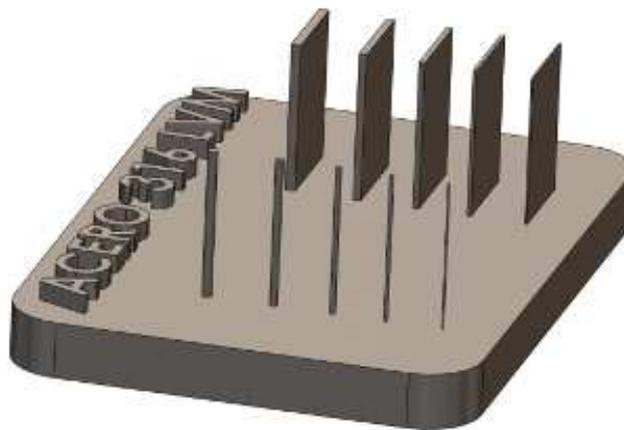


Figura 47. Imagen de la placa para el análisis de las capacidades en detalles del proceso de fabricación SLM.

Previa la fabricación de la plancha por SLM en acero inox. 316LVM, se ha añadido textos al diseño con las dimensiones de los detalles que también han sido estudiados (Figura 48). El espesor del texto es 0,2 mm.



Figura 48. Imágenes de la placa en acero inox. 316 LVM, que muestran las geometrías de detalles mínimos fabricadas por la tecnología SLM.

ANALISIS DETALLES PARA COLUMNAS FINAS	
Espesor (mm)	OBSERVACIONES
0,2	Se estaba fabricando pero la geometría se ha partido durante el proceso.
0,4	La etapa de reparto de polvo ha doblado la geometría.
0,6	Se ha fabricado correctamente.
0,8	Se ha fabricado correctamente.
1	Se ha fabricado correctamente.

Tabla 7. Resumen de resultados obtenidos para los detalles tipo columnas.

ANALISIS DETALLES PARA PAREDES FINAS	
Espesor (mm)	OBSERVACIONES
0,2	Se estaba fabricando pero se ha partido durante el proceso
0,4	Se ha fabricado correctamente
0,6	Se ha fabricado correctamente
0,8	Se ha fabricado correctamente
1	Se ha fabricado correctamente

Tabla 8. Resumen de resultados obtenidos de los detalles para diferentes espesores de pared.

Como conclusión parece que el proceso es capaz de fabricar pequeños detalles de espesor 0,2 mm, ya que se aprecian restos iniciales de los detalles columna y pared con este espesor. Añadir que se han fabricado correctamente los textos con el espesor mínimo de 0,2 mm. Por tanto si el detalle está suficientemente rigidizado y no es demasiado alto el proceso tiene la capacidad de fabricarlo con el espesor mínimo posible (0,2 mm equivalente al diámetro del haz laser).

2.2.6 Mecanizado: Espesor a mecanizar para eliminar la rugosidad superficial

El objetivo de este estudio ha sido conocer el espesor superficial mínimo a mecanizar para llegar a obtener una superficie lisa y sin poros, llegando de esta forma al material 100% denso. Este conocimiento permite diseñar la crez de material en algunas zonas del componente que será fabricado mediante SLM, posteriormente se realiza un rectificado de zonas específicas por ejemplo: agujeros, conexiones que necesiten buen ajuste, etc. Para la *sección 2.4 Restricciones del material*, se han fabricado 3 cilindros de acero inox. 316 LVM en orientación vertical mediante tecnología SLM (Figura 49). Estas probetas cilíndricas son utilizadas para mecanizar probetas de tracción y evaluar las propiedades mecánicas en dirección perpendicular a las capas, orientación de fabricación vertical, pero previamente también han permitido conocer el espesor a mecanizar para eliminar la rugosidad superficial.

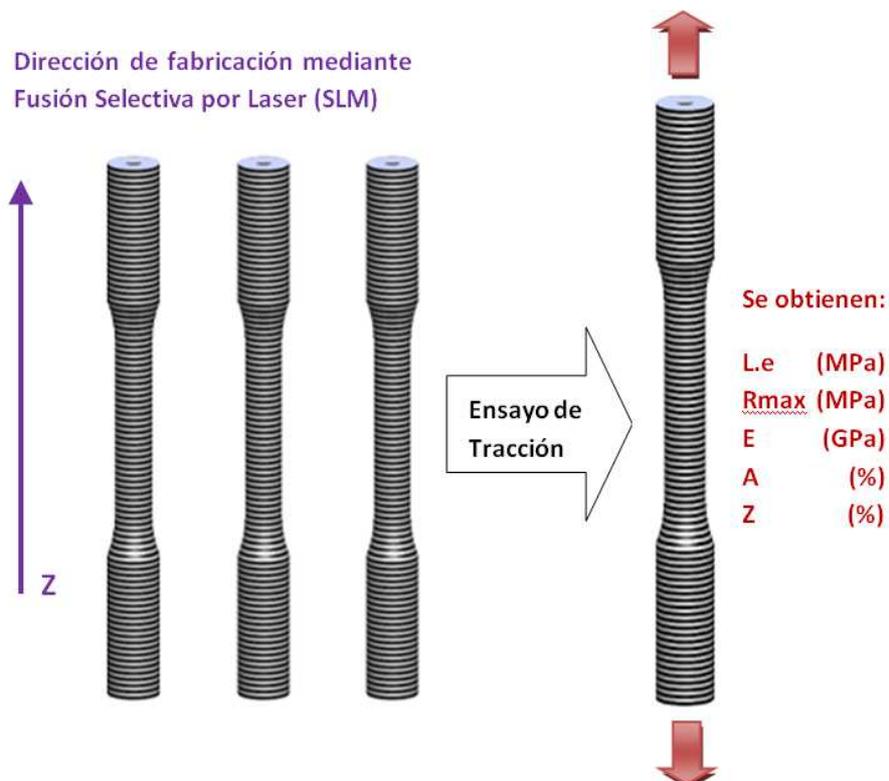
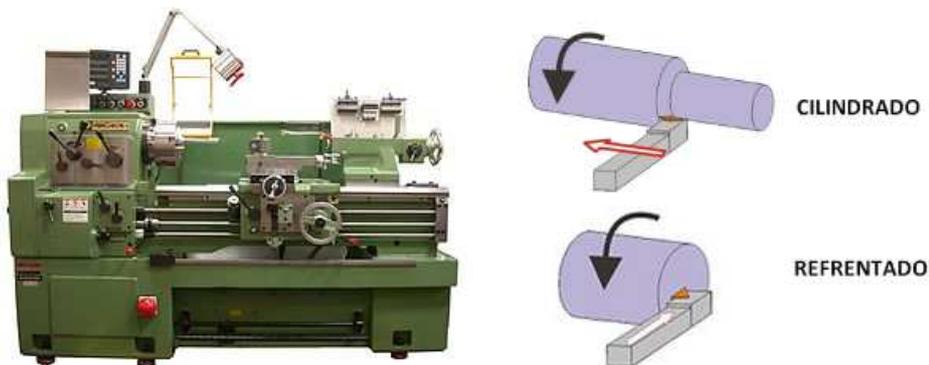


Figura 49. Imágenes de la dirección de fabricación y ensayo a tracción.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

Se montaron en el torno las probetas cilíndricas fabricadas mediante la tecnología SLM con el material acero inox. 316 LVM en orientación vertical (Figuras 50 y 51). Para cada probeta, se realizó un torneado decima a decima para conocer el espesor mínimo a mecanizar/eliminar hasta alcanzar material 100% denso. A continuación se resume el procedimiento seguido con imágenes para conocer el espesor mínimo para eliminar la porosidad superficial.



Figuras 50 y 51. Izquierda, torno paralelo moderno. Derecha, operaciones fundamentales de torneado.

PROBETA 1:

Derecha, montaje de la primera probeta entre puntos.

Medidas iniciales:

Medida 1: Diámetro = 16,00 mm

Medida 2: Diámetro = 15,96 mm



Media diámetro = 15,98 mm

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

1ª Pasada:

Se eliminan 0,1 mm en diámetro, es decir, un espesor superficial de 0,05 mm.

Observaciones:

Por algunas zonas se ha eliminado la rugosidad superficial y en otras no. Esto se debe al error de cilindridad cometido por el proceso de fabricación SLM.



2ª Pasada:

Se eliminan otros 0,1 mm en diámetro, es decir, un espesor superficial de 0,05 mm. En total se han eliminado 0,2 mm, (superficialmente 0,1 mm).

Observaciones:

Prácticamente se ha eliminado la rugosidad superficial típica obtenida por este proceso de fabricación.



Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

3ª Pasada:

Se mecaniza 0,1 mm en diámetro. En total se han eliminado 0,3 mm en diámetro, (superficialmente 0,15 mm).

Observaciones:

Se ha eliminado la rugosidad superficial típica obtenida por este proceso de fabricación, quizás haya algún poro superficial, aunque no se ha apreciado.



PROBETA 2:

Derecha, montaje de la segunda probeta.

Medidas iniciales:

1. Diámetro = 16,00 mm
2. Diámetro = 15,90 mm

Media diámetro = 15,95 mm

1ª Pasada:

Se eliminan 0,1 mm en diámetro, es decir, un espesor superficial de 0,05 mm.

Observaciones:

Se ha eliminado el 50% de la rugosidad superficial.



Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

2ª Pasada:

En total se han eliminado 0,2 mm, (superficialmente 0,1 mm).

Observaciones:

Se ha eliminado el 95% de la rugosidad superficial.



3ª Pasada:

En total se han eliminado 0,3 mm en diámetro, (superficialmente 0,15 mm).

Observaciones:

Se ha eliminado el 100% de la rugosidad superficial.



PROBETA 3:

Medidas iniciales:

1. Diámetro = 15,95 mm
2. Diámetro = 16,00 mm

Media diámetro = 15,95 mm

Se han repetido los pasos anteriores con la 3ª probeta. En este caso, se han necesitado solo 2 pasadas de 0,1 mm para limpiar completamente la superficie, es posible que esta probeta tenga un error de cilindridad menor que 0,1 decima y con dos pasadas haya sido suficiente para eliminar la rugosidad superficial.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

Se pueden obtener las siguientes conclusiones de este apartado mecanizado:

- Es necesario mecanizar al menos 0,15 mm superficialmente para eliminar la rugosidad superficial.
- De las 3 pasadas de 0,1 mm en diámetro, la primera suele ser para eliminar el error de tolerancia de forma, cilindridad en esta geometría.
- En SLM, se recomienda añadir una crez ó sobre-espesor mínimo de 0,3 mm a las geometrías en las zonas que se pretendan mecanizar para conseguir buen acabado dimensional y superficial.

2.3 Restricciones de diseño

En este apartado se realiza un análisis de las restricciones de fabricación obtenidas tras las pruebas realizadas en los anteriores apartados. Estas restricciones de fabricación del proceso SLM, son traducidas a reglas a tener en cuenta durante el diseño de piezas y componentes para ser fabricadas correctamente mediante este proceso.

2.3.1 Reglas de diseño para agujeros

1. En cuanto a canales y agujeros cilíndricos horizontales:
 - Se recomienda diseñar agujeros cilíndricos comprendidos entre 0,4 mm y 6 mm de diámetro, para obtener un buen acabado y sin riesgos durante el proceso de fabricación.
 - Diámetros iguales o superiores a 8 mm en agujeros puede producir problemas durante la fabricación tales como: errores de cilindridad acentuados, desprendimientos de material de la superficie superior de

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

cierre del agujero que rayaran otras zonas de la pieza durante el proceso provocando más defectos. Si es necesario un agujero de diámetro igual o mayor a 8 mm resulta recomendable fabricar por SLM uno de 5 ó 6 mm y realizar un mecanizado posterior partiendo de la posición del ya existente.

2. Con respecto a los agujeros cilíndricos verticales:
 - Se ha comentado que no existe limitación de fabricación superior para diámetros verticales, excepto el área de trabajo del equipo que suele ser 250x250 mm.
 - El límite inferior parece ser 0,2 mm.
 - No es posible fabricar agujeros de diámetro 0,1 mm con el equipo SLM utilizado en este estudio. Sin embargo es importante mencionar que están apareciendo nuevos equipos con mejores resoluciones, que utilizan espesores de capa menores (aprox. 15 μm) y diámetros del haz laser alrededor de 40 μm . Es posible que estos equipos puedan realizar estos detalles o incluso menores.
3. Se ha observado una diferencia entre la dimensión del diámetro diseñada y la fabricada. Los agujeros cilíndricos suelen ser 0,1 mm más pequeños. Por tanto los orificios son menores y la pieza mayor, existen alternativas para solventar esta diferencia:
 - Sumar esta diferencia (0,1 mm) a los diseños de los agujeros para obtener la dimensión fabricada deseada, es decir, diseñar $\text{Ø}6,1$ mm si se necesita un $\text{Ø}6$ mm.
 - Si es necesario precisión y buen acabado superficial en el agujero, se recomienda diseñar el diámetro requerido o incluso 0,1 mm inferior y repasar el agujero mediante

mecanizado. Por ejemplo, si fuese necesario, un agujero de $\varnothing 6$ mm con buen acabado, se recomienda diseñar $\varnothing 5,9$ ó $\varnothing 5,8$ mm.

2.3.2 Reglas de diseño para planos inclinados

4. No resulta recomendable utilizar planos inclinados sin soportes a 45° sobre la horizontal, ya que parece ser el límite fabricable, para este material y para el proceso SLM.
5. Resulta recomendable diseñar todos los planos del componente con inclinación superior a 45° respecto a la horizontal ó tener en cuenta que el componente pueda orientarse ó apoyarse para la fabricación por SLM sobre otras caras de modo que queden con una inclinación comprendida entre 50° y 90° .

2.3.3 Reglas de diseño para soportes

6. El entramado de soporte recomendable varía entre 1,2 – 1,4 – 1,6 mm, dependiendo del tamaño de la superficie horizontal a soportar. Con mayores superficies es recomendable entramados menores para evitar riesgos durante la fabricación. Aunque el diseñador de componentes mecánicos no suele añadir soportes, normalmente esta tarea recae en el operador de máquina SLM que prepara y orienta el fichero en la bandeja de fabricación, es importante que conozca las alternativas existentes e indique el nivel de acabado que necesita en esa superficie y el resultado que puede obtener finalmente en la superficie soportada de la pieza al retirar estos soportes.

2.3.4 Reglas de diseño para volados

7. En cuanto a volados laterales, la dimensión máxima saliente fabricable, con menores probabilidades de riesgo durante la fabricación, varía entre 0,1 y 0,3 mm.
8. Con respecto a volados bi-apoyados varía entre 0,3 y 0,8 mm.
9. Para las 2 tipologías anteriores, en el caso de valores mayores, se recomienda añadir una crez de material entre 0,2 y 0,3 mm a la superficie volada y realizar un rectificado posterior.

2.3.5 Reglas de diseño para detalles

10. Los detalles mínimos fabricables pueden obtenerse con una dimensión de 0,2 mm pero deben estar suficientemente rigidizados, por ejemplo textos, no muy altos. En el caso más desfavorable, estructuras más débiles como columnas y paredes finas este valor recomendado es mayor entre 0,4 y 0,6 mm dependiendo de la altura fabricada mediante SLM.

2.3.6 Espesor a mecanizar para eliminar la rugosidad superficial

11. En zonas que necesiten buen acabado dimensional y superficial, se recomienda añadir una crez ó sobre-espesor mínimo de 0,3 mm y realizar operaciones de mecanizado tras la fabricación en SLM.

A continuación se presenta un cuadro resumen con los valores recomendados para el diseño de componentes que serán fabricados mediante SLM y con acero inox. 316 LVM.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

CARACTERISTICA DISEÑO	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO	OBSERVACIONES
DIÁMETROS VERTICALES	0,2 mm	Bandeja fabricación	El valor mínimo debe repasarse con una aguja para eliminar el polvo atrapado en el canal.
DIÁMETROS HORIZONTALES	0,4 mm	6 mm	El valor máximo fabricable es 8 mm pero con problemas, la geometría final debe repasarse porque no es cilíndrica.
PLANOS INCLINADOS	45°	-	El valor mínimo de 45° puede no ser fabricable dependiendo de la posición de la cara inclinada con el repartidor de polvo. Recomendable inclinación > 50°.
DETALLES	0,4 mm	-	Es posible fabricar paredes de 0,2 mm si la geometría se encuentra rigidizada por otras paredes.
VOLADOS LATERALES	0,1 mm	0,2 mm	Se podría fabricar hasta 0,6 mm pero la superficie inferior es muy rugosa, podría no fabricarse dependiendo de la posición respecto al repartidor de polvo.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

VOLADOS BIAPOYADOS	0,3 mm	0,8 mm	La superficie inferior del volado no es completamente plana.
SOPORTES	1,2 mm	1,6 mm	Para conservar la geometría soportada se recomienda el menor valor.
CREZ MECANIZADO	0,2 mm	0,3 mm	Se recomiendan valores de 0,3 o de 0,4 mm para tener suficiente margen de seguridad.

Tabla 9. Cuadro resumen con los valores de diseño recomendados para la tecnología SLM y acero inox. 316 LVM.

2.4 Restricciones del material. Consideraciones.

El proceso SLM (Fusión Selectiva por Laser) fabrica adicionando capas y fundiendo el polvo metálico de cada capa por la acción de un laser. El material de la pieza no es procesado en un solo paso, si no que es procesado de manera discontinua capa a capa. Esto produce una diferencia en las propiedades del material, según la dirección de fabricación (Figura 49). Así, las propiedades obtenidas en dirección de la capa son distintas que en dirección perpendicular a ellas (Figura 52). Suponiendo que la pieza a fabricar por SLM fuera un cilindro y este fuese estirado, sus propiedades mecánicas serían distintas en función de la dirección de fabricación. Las propiedades mecánicas en el plano de la capa (plano paralelo a XY) deben ser iguales tanto si el material trabaja en el eje x o en el eje y, debido a la estrategia de damero que utiliza el equipo SLM, que asegura un comportamiento más isótropo (Figura 28).

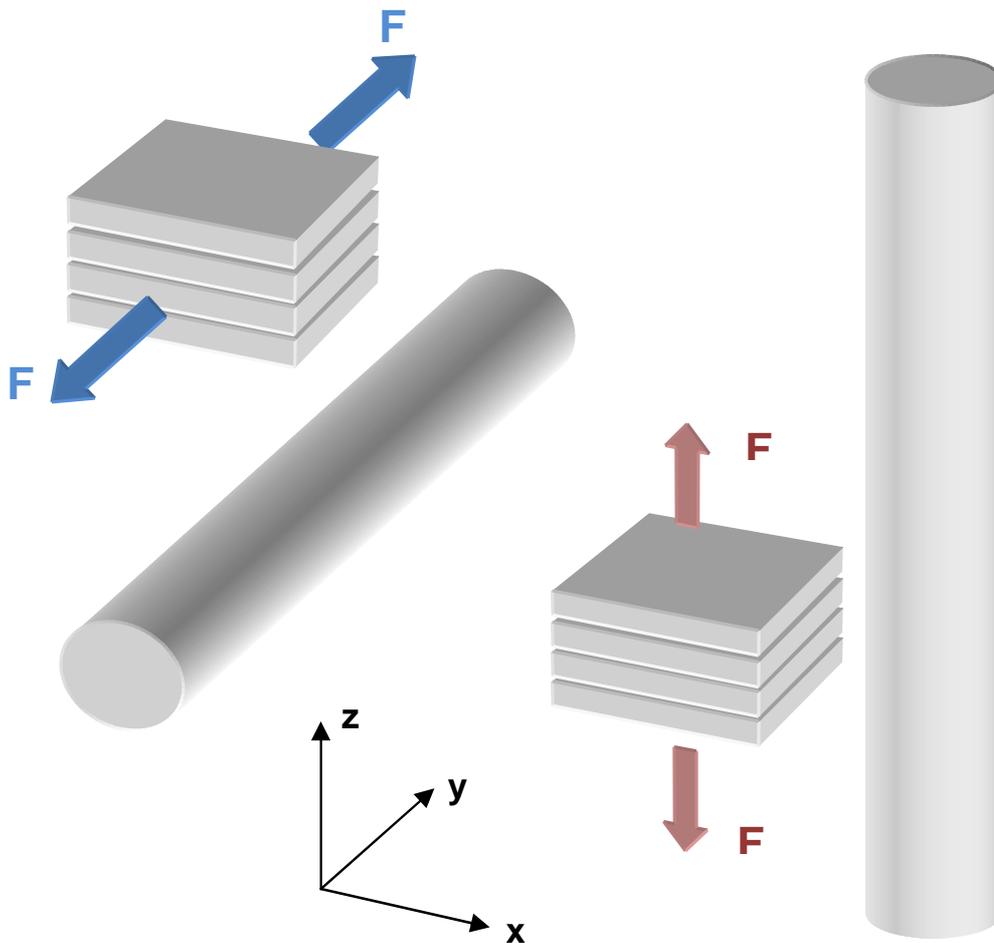


Figura 52. Las propiedades mecánicas del material para un mismo cilindro son distintas en función de la dirección de fabricación. En dirección eje Z la resistencia a la tracción la opone la cohesión entre capas (cilindro vertical). En cambio en dirección eje Y, la resistencia la oponen las capas de material (cilindro horizontal).

En el siguiente punto se comprueban las propiedades mecánicas para las dos direcciones de fabricación para el material acero inox 316 LVM procesado por SLM. Conocer las diferentes propiedades mecánicas del material resulta crucial para el diseño de componentes mecánicos por SLM, puesto que mientras que se realiza el diseño en 3D se deben tener en cuenta las capacidades y limitaciones del proceso SLM, seguidamente elegir la dirección de fabricación más óptima y tras esto realizar un cálculo estructural

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

mediante MEF teniendo en cuenta las diferentes propiedades del material según la orientación de fabricación del componente.

2.4.1 Validación de las propiedades mecánicas de la aleación Acero Inox. 316 LVM

Con el objetivo de comprobar las propiedades mecánicas del material, han sido fabricadas 7 probetas de tracción, 4 de ellas en orientación vertical y 3 de ellas en horizontal (Figura 53). Para prevenir posibles problemas ó fallos durante la fabricación SLM o mecanizado de la probeta, se ha fabricado 1 probeta extra vertical. Al posicionarse los cilindros verticalmente, la duración de la fabricación SLM es larga, añadir un cilindro extra apenas alarga la duración de la fabricación pero tener que repetirla retrasaría demasiado el ensayo de tracción.

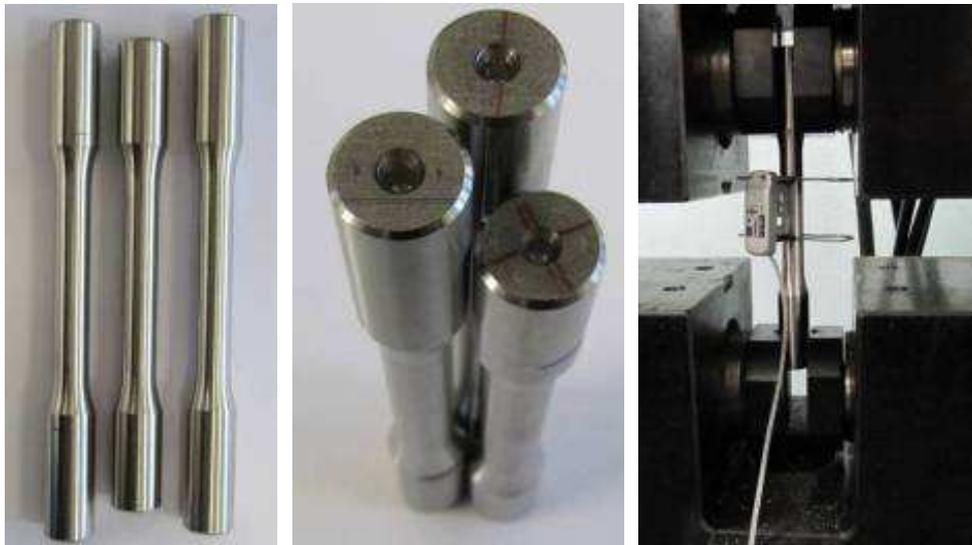


Figura 53. Izquierda y centro, probetas de Acero Inox. 316 LVM mecanizadas. Derecha, imagen tomada durante el ensayo de tracción de las probetas de acero inox. 316LVM fabricadas por SLM.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

A continuación se presenta gráficos del ensayo de tracción comparando los resultados de las 3 probetas horizontales (Figura 54), de las 4 probetas verticales (Figura 55) y finalmente de las 7 probetas⁸, verticales y horizontales (Figura 56). Notar que las curvas acaban antes de completar el ensayo debido a que el extensómetro, dispositivo que registra el alargamiento de la probeta, debe ser retirado previamente a la rotura de la probeta de tracción para evitar dañarlo.

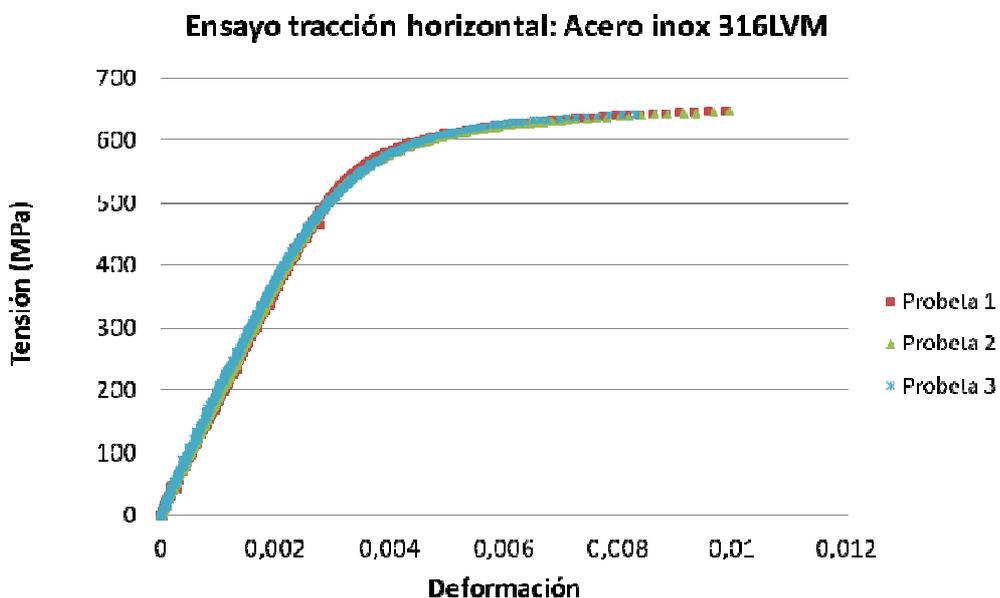


Figura 54. Grafica del ensayo de tracción de las 3 probetas de tracción de Acero Inox. 316 LVM con fabricación horizontal.

⁸ Proyecto BIOMETAL. Informe técnico interno de AIMME. Estudio de aleaciones metálicas para el sector sanitario procesadas mediante fabricación aditiva “BIOMETAL”, 2010-12. Proyecto financiado por IMPIVA.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

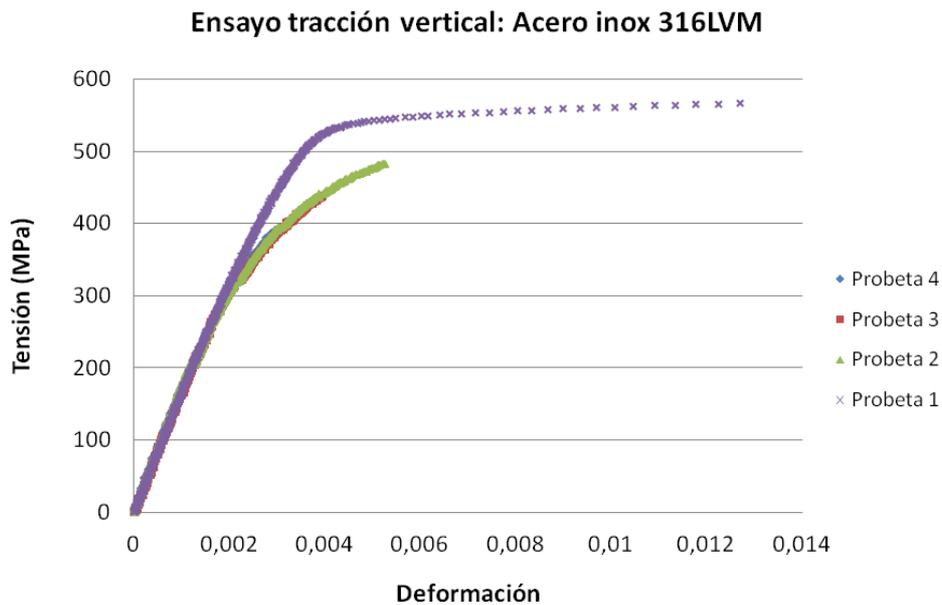


Figura 55. Grafica del ensayo de tracción de las 3 probetas de tracción de Acero Inox. 316 LVM con fabricación vertical.

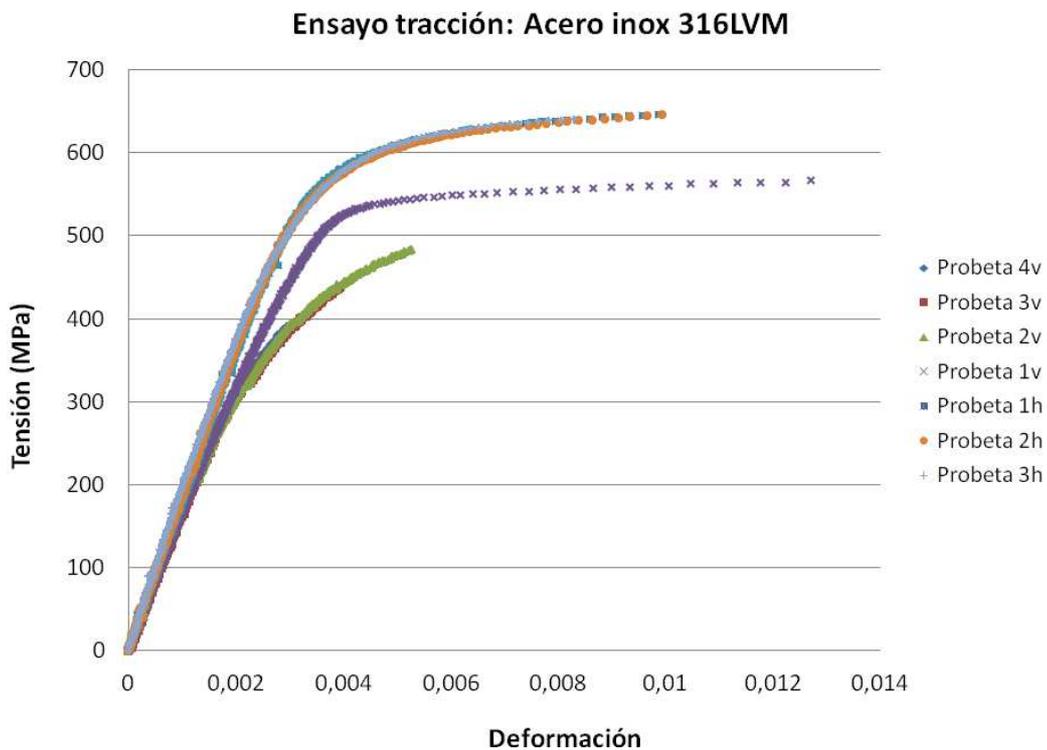


Figura 56. Grafica del ensayo de tracción de las 6 probetas de tracción de Acero Inox. 316 LVM con fabricación horizontal y vertical.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

PROPIEDADES MECANICAS ACERO AISI 316 LVM					
MUESTRA	L.e (MPa)	R (MPa)	E (GPa)	A (%)	Z (%)
1v	461,00	630,00	166,00	10,00	11,00
2v	459,00	611,00	175,76	-	6,00
3v	472,00	594,00	175,76	-	4,00
4v	546,00	640,00	175,76	9,50	8,00
Media verticales	484,5	618,8	172,5	9,8	7,3
1h	611,38	731,66	179,08	24,00	34,00
2h	602,36	728,63	183,61	21,00	30,00
3h	611,23	728,67	190,04	24,50	37,00
Media horizontales	608,3	729,7	184,5	23,2	33,7
Media Total	537,6	666,3	178,0	17,8	18,6

Leyenda: L.e: Limite elástico, R: carga de rotura, E: Modulo de Young, A: Alargamiento, Z: estricción.

Tabla 10. Resumen de las propiedades mecánicas para las probetas fabricadas en orientación vertical y horizontal con SLM en Acero Inox. 316 LVM.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

Con los resultados obtenidos mostrados en la tabla 10 y comparando con la norma para este material ASTM F138⁹, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El estado del material tras la fabricación con SLM no es comparable con ninguno de los estados de suministro contemplados por esta norma y para este material macizo: Hot worked, Annealed, Cold worked, Extra-hard. Hay que añadir que, las propiedades mecánicas obtenidas tras el proceso SLM se encuentran en valores intermedios entre el estado Annealed (Recocido) y el estado Cold worked (Trabajo en frío de endurecimiento por acritud). Esto le permite ofrecer unas altas propiedades resistentes sin disminuir excesivamente el alargamiento y la tenacidad del material.
- Como se ha comentado previamente, las propiedades mecánicas obtenidas mediante el proceso SLM se encuentran en un punto intermedio entre los estados Recocido y Trabajado en frío, concretamente:
 - Las propiedades resistentes obtenidas son mayores que en el estado recocido pero el alargamiento obtenido es menor que en el estado recocido.
 - En cambio, las propiedades resistentes obtenidas son menores que en estado Trabajado en frío pero el alargamiento obtenido por SLM es mayor que en este estado.
- Se observa una diferencia en el comportamiento del material según la dirección de fabricación de la probeta horizontal y vertical por SLM (Tabla 11).

⁹ ASTM F138-08, *Standard Specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673)*¹, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

- Las propiedades resistentes (L.e y R) en la orientación de fabricación horizontal (esfuerzo en dirección de las capas) son mayores en un 20% aprox. en el caso de las probetas fabricadas frente a la vertical (perpendicular a las capas).
- El modulo de Young (E) son ligeramente superiores (un 7% aprox.) en el caso de fabricación horizontal frente a vertical.
- La elongación A (%) es mayor 1.37 veces y la estricción Z (%) es también mayor 3.7 veces aprox. en el caso de las probetas horizontales con respecto al mismo material fabricado en vertical.

MUESTRA	L.e (MPa)	R (MPa)	A (%)	Z (%)	E (GPa)
Media Horizontal	608,33	729,65	23,17	33,67	184,24
Media Vertical	484,50	618,75	9,75	7,25	172,50
Diferencia (%)	25,56 %	17,92 %	137,61 %	364,37 %	6,8 %

Tabla 11. Diferencia en % de las propiedades mecánicas de las probetas fabricadas en orientación vertical y horizontal con SLM en Acero Inox. 316 LVM.

2.5 Metodología final

Teniendo en cuenta todo lo anterior, las restricciones de fabricación, traducidas a reglas de diseño, y las restricciones del material acero inox. 316LVM procesado por SLM, en este apartado se explican los pasos generales para diseñar o rediseñar un componente de forma óptima, es decir, que tenga el mínimo material para soportar las condiciones de funcionamiento y sea fabricable mediante SLM con el mínimo de post-procesos posibles (retirado de soportes, rectificadas, etc). De esta forma se obtendrá un componente mecánico más ligero y optimizado para su función con el menor coste y tiempo posibles. Los pasos son los siguientes:

2.5.1 Proceso de diseño optimizado por MEF y para fabricación por SLM

- 1. Especificaciones y documentación técnica:** el diseñador entiende los requerimientos y función del componente y el tipo de interacción del componente mecánico a otros componentes adyacentes, tornillos, tuercas, ejes, engranajes, etc.
- 2. Los anclajes y conexiones a otros componentes,** son el punto de partida del nuevo componente, estos suelen definir automáticamente ciertas zonas del nuevo componente, estas interacciones son fijas y estándares por tanto rara vez pueden ser modificables, por ejemplo la posición de los agujeros y el diámetro de estos, zonas roscadas etc.
- 3. Diseño conceptual del cuerpo del componente,** este quedara definido por una geometría que une los diferentes anclajes. Conviene recordar que es necesario cambiar la filosofía tradicional de diseño, no partimos de un bloque o tocho de material donde eliminaremos material mediante operaciones de arranque de viruta

hasta conseguir la geometría del componente, al contrario partimos de la nada y vamos colocando el material donde es necesario, el diseñador debe pensar que puede añadir el material siguiendo la forma que crea conveniente entre anclajes y que no está limitado por las operaciones lineales o de revolución de los programas de diseño CAD 3D paramétricos, tales como: corte de revolución, extrusión corte, asistente para taladro, etc.

4. Orientación de fabricación del componente: Teniendo en cuenta las restricciones de fabricación del proceso SLM se elige una orientación de fabricación favorable, teniendo en cuenta en este orden los siguientes puntos:

4.1 La geometría debe orientarse de modo que necesite la **mínima cantidad de soporte** de las superficies del componente. Es necesario recordar que todas las superficies con ángulo de inclinación entre 0° y 45° necesitan soportes. La inclusión de soporte ayuda pero no garantiza una correcta fabricación del componente, además del inconveniente de su posterior eliminación y rectificado o pulido de las superficies. Un componente puede necesitar mucho soporte en una orientación y nada de soporte con otra orientación e inclinación de la geometría.

4.2 Se debe orientar de modo que todos los **planos inclinados** de la pieza tengan un ángulo sobre la horizontal **mayor a 60°** , ya que se obtienen mejores acabados.

4.3 Se debe orientar de modo que los agujeros de la pieza de diámetro mayor a 7 mm se fabriquen de forma vertical.

4.4 Se debe intentar que la orientación de la **pieza** sea **lo más baja posible**, puesto que al disminuir el número de capas a añadir, la duración de la fabricación en

SLM se acorta, puesto que se pierde menos tiempo en el reparto de capas.

4.5 Si el componente puede ser orientado de diversas formas cumpliendo lo anterior se escogerá aquella orientación que disponga las capas de material en la misma dirección de los esfuerzos que debe soportar.

5. Diseño de detalle del componente: Con la orientación de la pieza ya seleccionada se comienza el diseño del componente. Se deben realizar operaciones mediante software CAD 3D para añadir el material partiendo de las conexiones del componente con otros componentes. La geometría final puede tener secciones curvas o circulares de forma que no existan concentradores de tensiones. Las operaciones recomendables, de programas de diseño CAD 3D, son el barrido, recubrir, añadir redondeos, etc.

5.1 Sugerencias para el **diseño de tuberías:**

- a) Pueden seguir el camino más corto con cualquier forma, lo que implica usar el mínimo material.
- b) Pueden seguir un camino suave para producir las mínimas pérdidas de carga del fluido.
- c) Una tubería puede ramificarse en 2, 3 o n conductos siempre que se cumplan 2 reglas básicas, la suma de la sección de las ramificaciones debe ser igual a la sección del conducto principal y que las ramificaciones tengan longitudes similares.
- d) La forma del conducto puede cambiar de circular a elíptica progresivamente.

- e) Se recomiendan secciones circulares o elípticas siempre que el radio sea menor de 3,5 mm (Figura 57).

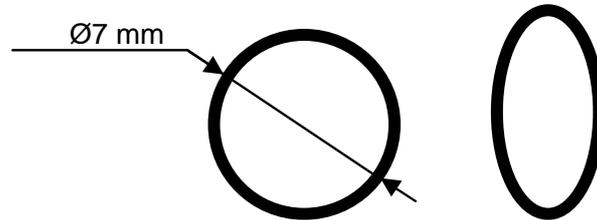


Figura 57. Secciones recomendables en el diseño de conductos que serán fabricados por el proceso SLM.

- f) No se recomienda hacer tramos rectos conectados por codos, ya que producen caminos más largos (mayor cantidad de material) y mayores pérdidas de carga debidas a los codos.

5.2 Diseño de espesores uniformes. Se recomiendan espesores uniformes en toda la geometría, empezando por los anclajes del componente, por ejemplo si la conexión es mediante un pasador o tornillo, el espesor alrededor del agujero debe ser un círculo no un cuadrado (Figura 58).

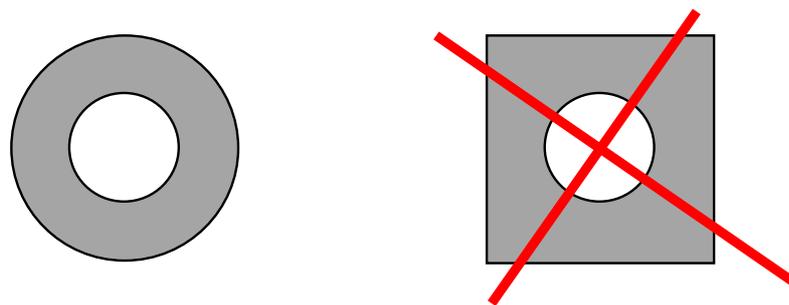


Figura 58. Recomendación de espesores uniformes y proporcionales a las geometrías requeridas. Ejemplo de adición del material justo alrededor de un agujero, el material de las esquinas no trabaja (derecha).

5.3 Si tras la orientación del componente quedan algunos planos inclinados se deben diseñar con **ángulos inclinados mayores a 50°** respecto a la horizontal. Si esto no es posible, puesto que alguna zona requiere un ángulo menor, por ejemplo 30°, resulta recomendable macizar la zona y posteriormente mecanizar ese plano frente a añadir soportes, por diferentes motivos (Figura 59):

- i. La retirada manual de soportes puede resultar costosa en tiempo.
- ii. Fabricar una zona maciza tiene una menor probabilidad de desprendimientos de material que la superficie con soportes.
- iii. En ambos casos la superficie soportada o macizada del componente debe ser rectificada.

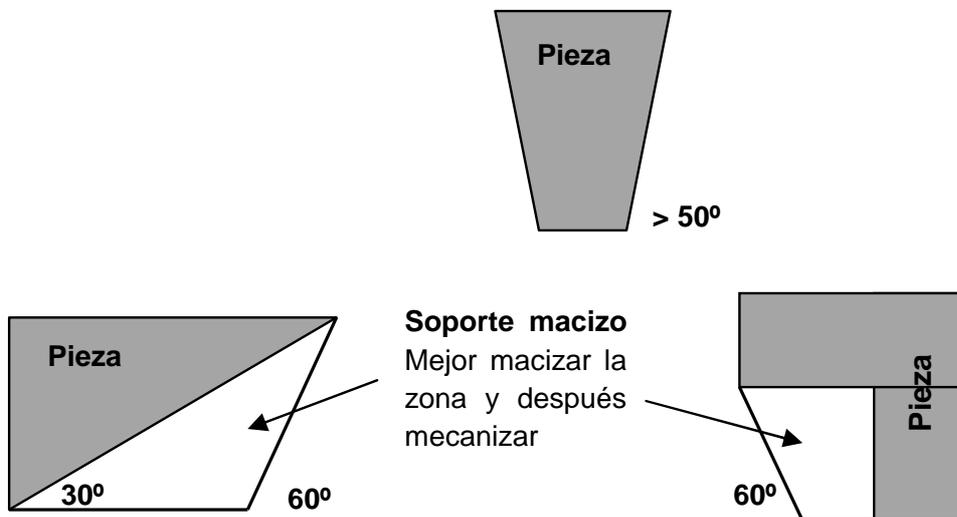


Figura 59. Arriba, diseñar si es posible superficies con ángulos > 50°. Debajo, es recomendable macizar una pequeña zona y realizar un rectificado tras la fabricación por SLM.

5.4 Adición de redondeos y transiciones suaves redondeadas entre cambios de sección de la pieza, ya que evitan los concentradores de tensiones y mejoran la vida a fatiga del componente. Tras el cálculo MEF de comprobación se reforzarán ciertas zonas y se eliminará material de las que están menos tensionadas.

5.5 Reducción del tamaño de los agujeros horizontales a 7 mm. Si existen agujeros horizontales debe reducirse su diámetro hasta 7 mm, tras la fabricación mediante SLM se pueden agrandar mediante mecanizado.

5.6 Adición de crez de material para roscas. Los agujeros roscados deben realizarse 1 ó 2 mm menores para ser rectificadas por mecanizadas, tras esto se realizará el roscado a la métrica necesaria.

5.7 Adición de crez de material para zonas de la pieza con requerimientos de precisión, por ejemplo planitud, cilindricidad, buen acabado superficial, tolerancias, etc. Estas son posibles de obtener por operaciones de mecanizado (rectificado), tras la fabricación mediante SLM. Se recomienda añadir una crez de 0,3 a 0,5 mm de material en las superficies que deban ser rectificadas.

5.8 Adición de texto (por ejemplo la designación del componente, material, etc.) en caras superiores, ángulos respecto la horizontal mayores a 90°. Es recomendable la extrusión saliente del texto frente a un bajo relieve para evitar concentración de tensiones o zonas de inicio de grieta por fatiga o corrosión.

5.9 Adición de base para el corte de la pieza. En SLM resulta necesario diseñar un suplemento o base de 2 mm de material para la separación de la pieza fabricada de la plataforma de fabricación, la pieza

queda soldada a una placa de acero, mediante una sierra, corte por hilo, etc. (Figura 60).

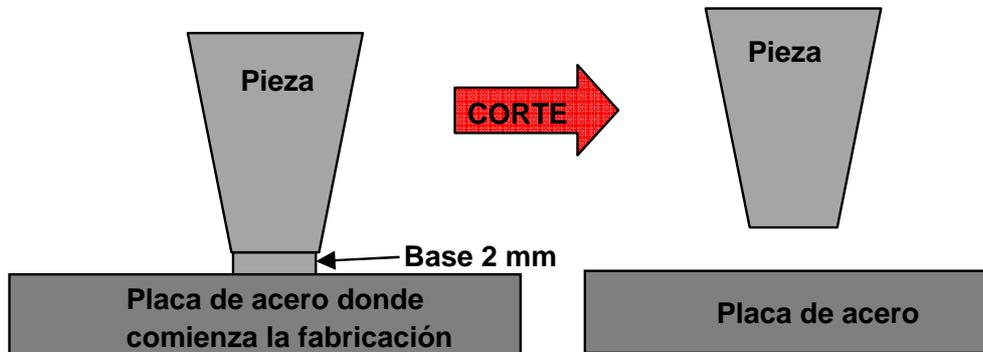


Figura 60. Izquierda, Pieza fabricada por SLM soldada a la placa de acero (elemento desmontable del equipo). Derecha, la pieza se separa de la placa mediante corte y la base de 2 mm.

- 6. Análisis MEF comprobación nivel de tensiones, desplazamientos, deformaciones, etc.** En esta etapa mediante software CAE (ANSYS, Abaqus, Nastran, etc) se realiza un mallado de la geometría del componente, se editan las propiedades mecánicas del material, en este caso acero inox. 316LVM, comprobadas en la *sección 2.4.1*. Finalmente se aplican los esfuerzos y las condiciones de contorno de trabajo sobre la geometría del componente y se resuelve el cálculo computacional mediante el MEF.

El análisis de la distribución de tensiones a lo largo de la geometría del componente nos indicará que zonas están más tensionadas (zonas a reforzar en el diseño del componente) y que zonas están menos (zonas donde es posible aligerar el componente). El objetivo debe ser obtener un diseño con un nivel de tensiones similar a lo largo de toda la geometría del componente, lo que nos ofrecerá un Factor de Seguridad uniforme a lo largo de la pieza, es decir no habrá zonas excesivamente reforzadas y otras débiles, por donde previsiblemente romperá el

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

componente. Es importante analizar también la distribución de desplazamientos y deformaciones para evitar valores excesivos. Mediante la información obtenida se realizan cambios en el diseño (refuerzo y/o aligeración de distintas zonas) y se vuelve a realizar el cálculo MEF, tras varias iteraciones el diseño estará prácticamente optimizado (Figura 61).

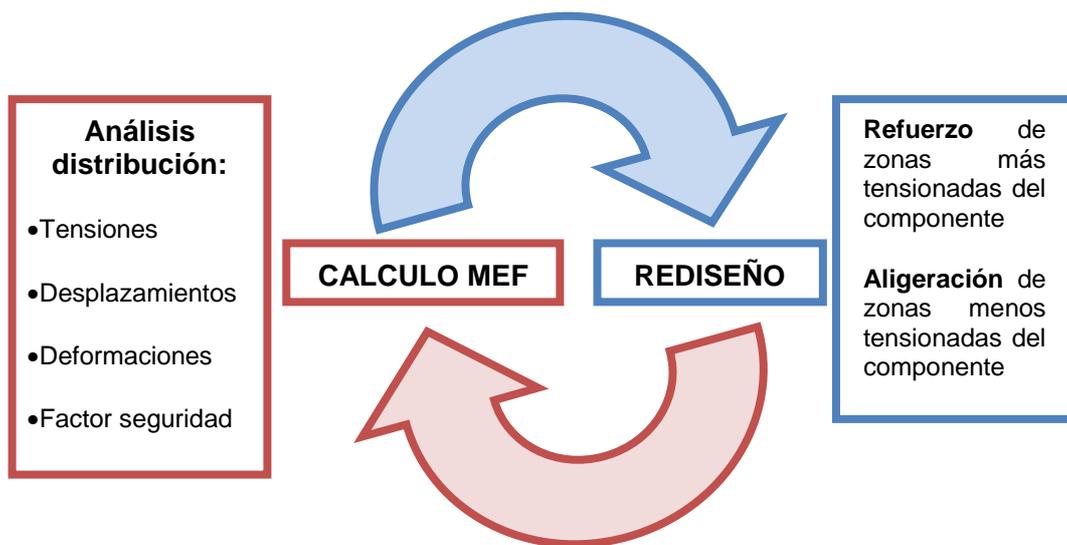


Figura 61. Izquierda, Pieza fabricada por SLM soldada a la placa de acero (elemento desmontable del equipo). Derecha, la pieza se separa de la placa mediante corte y la base de 2 mm.

- 7. Fabricación del diseño final del componente mecánico optimizado.** La geometría del componente optimizada por cálculo MEF y rediseño teniendo en cuenta las capacidades y restricciones de fabricación del proceso SLM, puede ser enviada al equipo SLM para su fabricación, siguiendo los pasos explicados en el apartado 1.2 *ETAPAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN ADITIVA*, exportación a formato STL, orientación y adición de soportes, etc.

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación

Aunque no se ha utilizado en el desarrollo de este trabajo, resulta interesante mencionar la existencia de herramientas MEF de **optimización topológica** que permiten la obtención de geometrías cercanas a la final (preformas) de un producto diseñadas a partir de las cargas y condiciones de contorno.

La **optimización topológica** es una aproximación matemática que optimiza la distribución del material en un espacio de diseño, para unas determinadas cargas y condiciones de contorno, de manera que el diseño resultante cumpla con un conjunto de objetivos prefijados (Figura 62). Usando optimización topológica, los ingenieros pueden encontrar el mejor concepto de diseño que cumple con los requerimientos de diseño. La optimización topológica ha sido implementada a través del uso del método de los elementos finitos (MEF) para el análisis junto con alguna de las diversas técnicas de optimización disponibles.

La optimización topológica es usada en el proceso de diseño a nivel de concepto para llegar a una propuesta de diseño conceptual. Este diseño conceptual ó preforma es más tarde refinado, en la etapa de diseño de detalle, para asegurar su funcionamiento y fabricabilidad (Figura 63). Este método de diseño permite ahorrar tiempo en las iteraciones de diseño y por tanto reduce la etapa de desarrollo y diseño del producto y sus costes asociados, al mismo tiempo que se mejora la eficiencia y rendimiento del producto.

En algunos casos, las propuestas obtenidas con optimización topológica, aunque optimas, pueden resultar costosas ó inviables de fabricar. Estos retos pueden ser superados mediante el uso de restricciones de fabricación en la formulación del problema de optimización topológica. Al utilizar restricciones de fabricación, la optimización produce diseños de ingeniería que prácticamente satisfacen los requisitos de fabricación. En algunos casos las tecnologías de FA son utilizadas para producir formas optimizadas complejas que de otra manera necesitarían de restricciones de fabricación.

Es importante mencionar que la optimización topológica produce geometrías que en muchas ocasiones no pueden ser fabricadas mediante técnicas tradicionales, en este sentido las pocas limitaciones de las tecnologías de fabricación aditiva hacen que éstas sean una alternativa muy adecuada para la fabricación de las geometrías propuestas por las técnicas de optimización topológica.

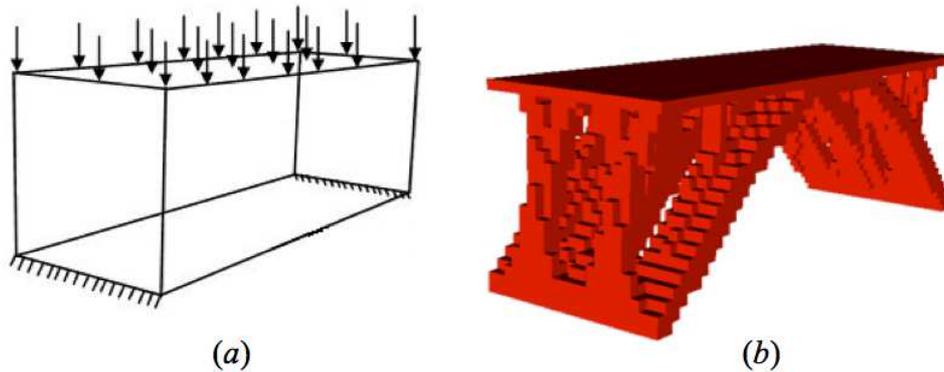


Figura 62. Ejemplo de aplicación de optimización topológica a un espacio de diseño para obtener una topología óptima para soportar las caras y restricciones. Fuente: <http://www.ce.jhu.edu/jquest/TopOptProgram/>

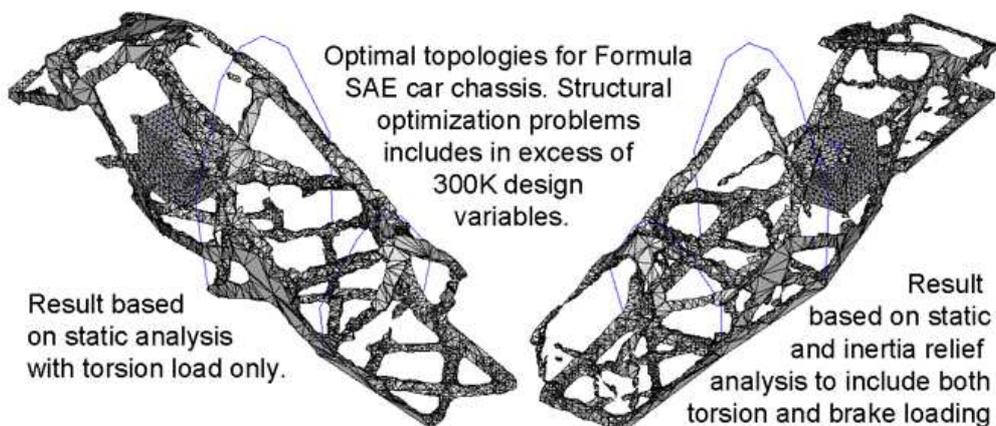
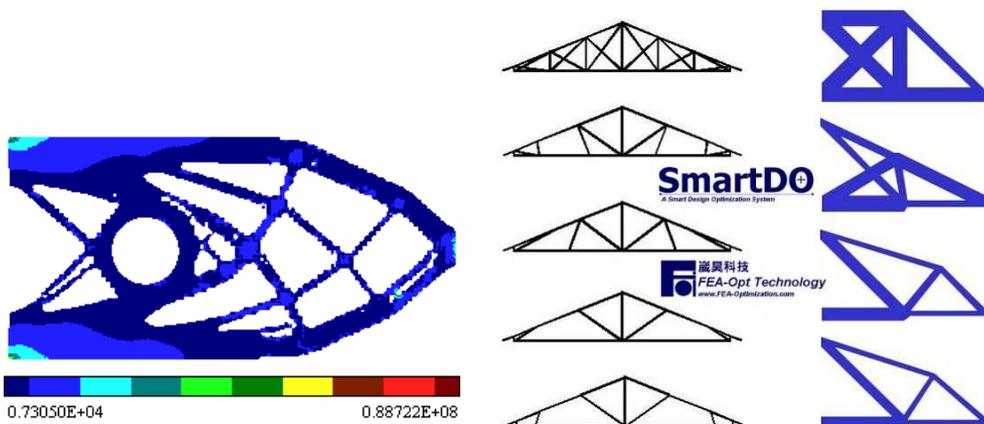


Figura 63. Ejemplos de topologías óptimas para chasis de la Formula SAE. Izquierda, resultado obtenido con análisis estático con carga de torsión. Derecha, resultado de chasis para análisis estático, con efectos de inercia y torsión. Fuente University of Columbia - Missouri: http://web.missouri.edu/~smithdoug/complab/resproj/sd_top_opt.html

Capítulo 2. Desarrollo de la metodología de diseño óptimo teniendo en cuenta análisis MEF y restricciones de fabricación



http://sal-cnc.me.wisc.edu/index.php?option=com_content&task=view&id=30&Itemid=98

http://www.fea-optimization.com/SmartDO/index_e.htm

Figura 64. Ejemplos de aplicación de optimización topológica para obtener perfiles estructurales óptimos. Fuentes: University of Wisconsin (izquierda), empresa de software de optimización topológica en Taiwan (derecha).

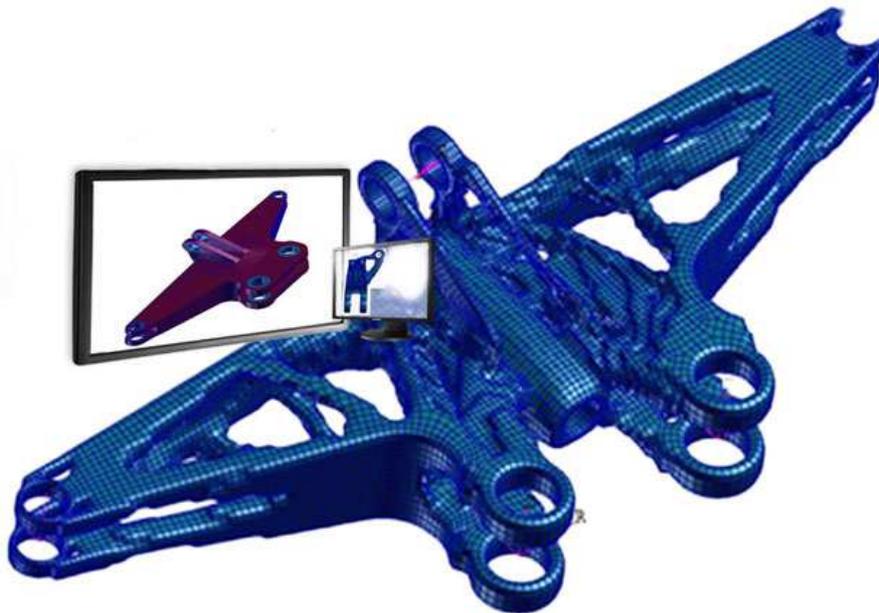


Figura 65. Ejemplo de aplicación de optimización topológica para obtener un diseño estructural óptimo. Fuente: http://www.compumod.com.au/disciplines_structuralOptimisation.php

3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Con el objetivo de poner en práctica y ejemplificar la metodología de diseño descrita en el apartado 2.5, se ha seleccionado un caso industrial para ser rediseñado y mejorado según cálculo MEF y ser fabricado mediante SLM en material acero inox. 316L. Se trata de un inyector de aceite para lubricar una zona concreta de un equipo industrial.

3.1 Diseño inicial

Se partió de un diseño inicial (Figura 66), donde el inyector estaba formado por 2 componentes que se posicionaban mediante 2 tetones, estas 2 piezas se fijaban mediante 2 tornillos y tuercas.

Estos componentes del ensamblaje han sido diseñados para fabricación por mecanizado, partiendo de un bloque de material, ya que las se aprecian las típicas operaciones lineales de diseño fácilmente realizables por mecanizado, tales como: corte, extrusión, tramos rectos con codos, etc. que generan caras planas y pocas operaciones de mecanizado, lo que implica menos horas de máquina y un precio más económico por pieza. Se aprecia que el diseño está sobredimensionado, la cantidad de material que no trabaja en la pieza y que por tanto sobra es elevada (Figura 67). Además de que la cantidad de material sobrante, este diseño tiene distintos inconvenientes:

- Pérdida de tiempo durante el montaje del ensamblaje manual.
- Necesidad de piezas estándar (2 tornillos y 2 tuercas) para el montaje y fijación del ensamblaje.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

- La canalización no es completamente estanca, el fluido podría salir por la junta entre las 2 piezas.
- La fijación no es uniforme a lo largo del ensamblaje, las 2 fijaciones mediante tornillo y tuerca están situadas aproximadamente a la entrada del fluido. Existe mayor probabilidad de fugas de aceite en la salida, ya que el diámetro de salida es menor y por tanto el fluido ejercerá una mayor presión en esa zona.

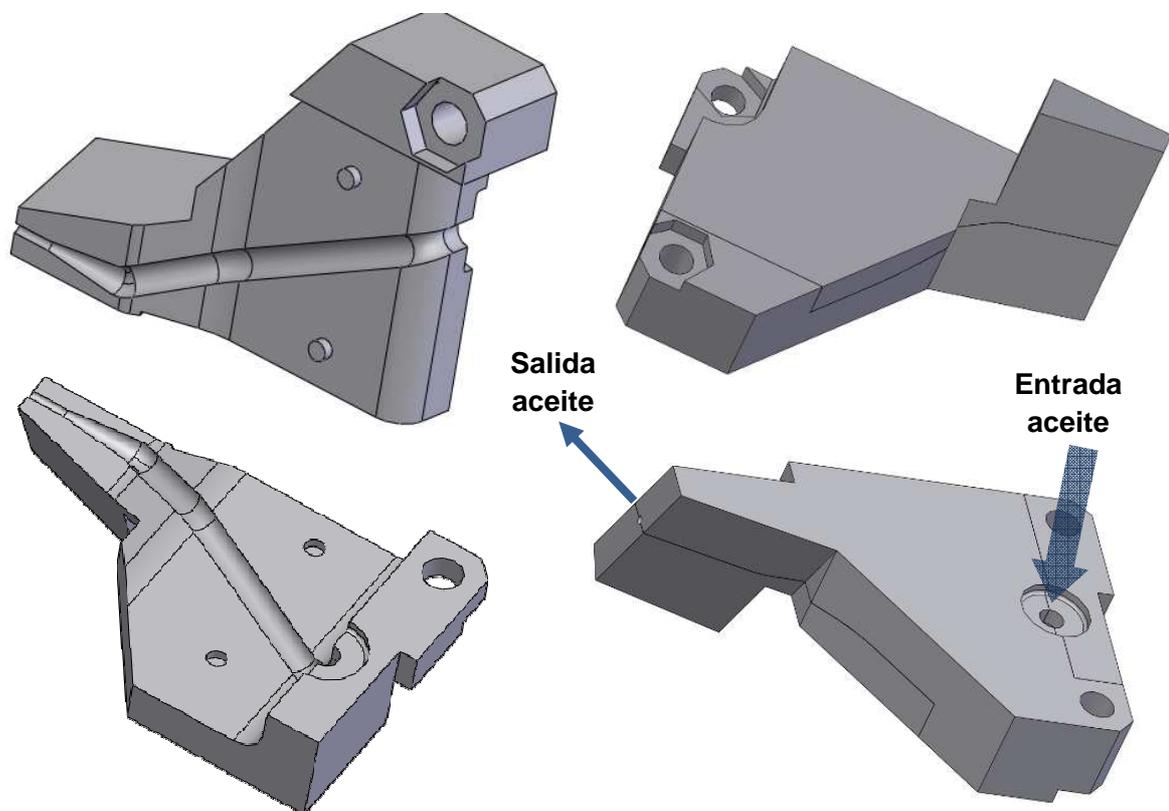


Figura 66. Izquierda, componentes por separado que forman una canalización para el aceite. Derecha, vistas del montaje con entrada y salida de aceite.

VOLUMEN Y MASA UTILIZADOS

- Volumen = 13,7 cm³
- Masa acero = 106,86 gramos

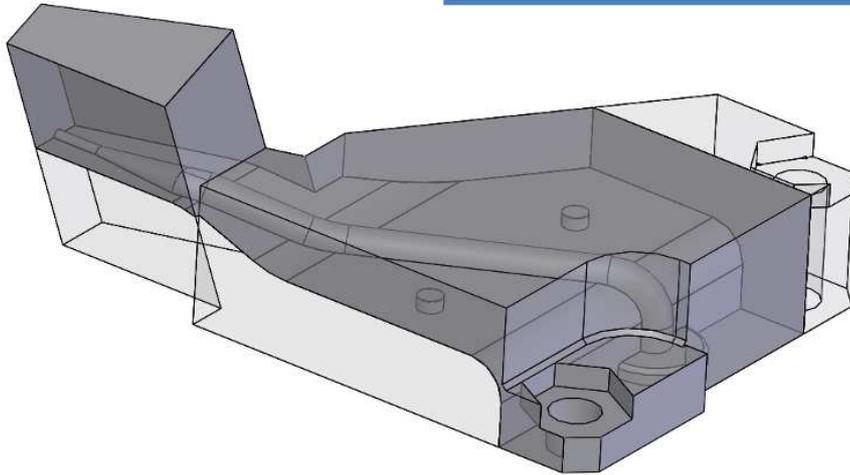


Figura 67. Imagen 3D transparente del ensamblaje para formar el inyector de aceite, donde se aprecia la cantidad de material sobrante en cada componente.

En conclusión y concretamente para este diseño generar el canal mediante 2 piezas resulta una solución costosa y compleja de fabricar. Se aprecia que una gran cantidad de material sobrante en este diseño. Resulta probable que aparezcan fugas por la junta del ensamblaje durante el funcionamiento. Por tanto, debido a la canalización es recomendable diseñar el producto en una sola pieza.

3.2 Alternativa de diseño 2

Se realiza un nuevo diseño, donde el canal queda incluido dentro de una sola pieza, evitando el problema de posibles fugas por la junta de montaje y asegurando la estanqueidad. Para un diseñador mecánico que no utilice la metodología de diseño del apartado 2.5, la geometría final podría ser la de la Figura 68, donde se aprecia una canalización de tramos rectos con un codo combinada a un bloque prismático de material con los alojamientos para las tuercas hexagonales. Pese a que este diseño no es fabricable por mecanizado esta geometría está diseñada desde el punto de vista de un diseñador mecánico, a partir de un bloque y operaciones sencillas, es decir no se ha hecho un diseño para Fabricación Aditiva por SLM. Se debe remarcar que a esta geometría del componente le sobra material, atendiendo a las solicitaciones mecánicas y la cantidad de material utilizada es excesiva.

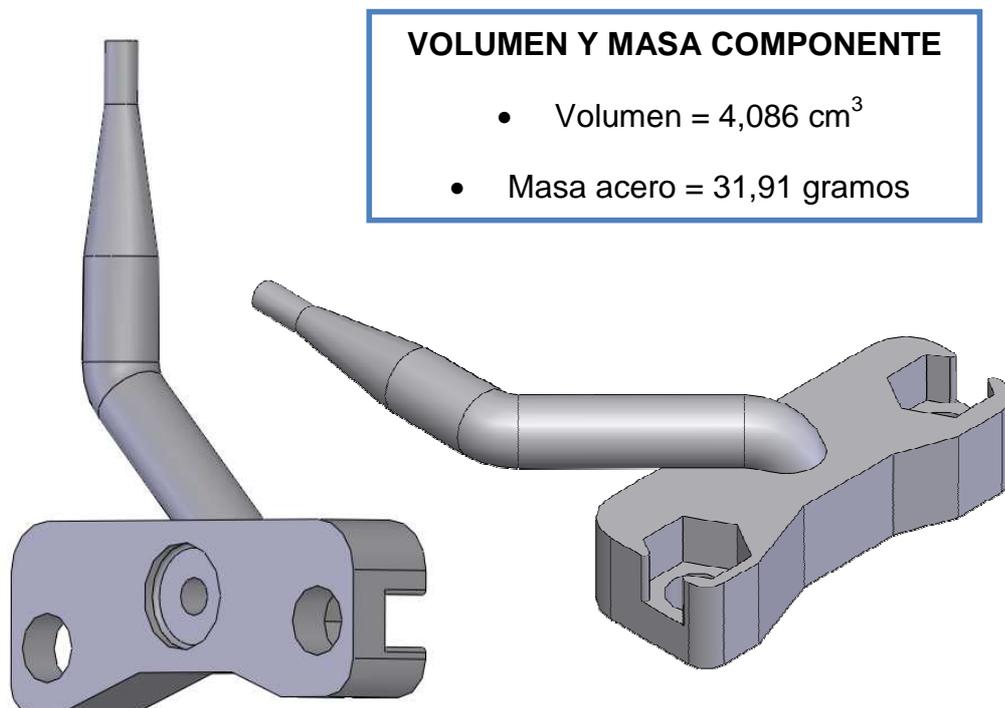


Figura 68. Imágenes 3D de la 2ª alternativa de diseño del componente inyector de aceite. Vistas isométrica y trasera.

3.2.1 Cálculo estático estructural por MEF

Con el objetivo de analizar este diseño del componente se ha realizado un cálculo estático por el MEF. Se han aplicado las siguientes cargas y condiciones de contorno:

3.2.1.1 Cargas

Se ha aplicado una presión constante en la superficie del conducto de valor = 10 bar = 1 MPa. Aunque la realidad es que la presión a lo largo del conducto puede disminuir, se ha escogido mantenerla constante al máximo valor por ser una condición más desfavorable para el componente.

Presión de aceite = 10 bar = 1 MPa

3.2.1.2 Condiciones de contorno

Empotramiento

- En los agujeros cilíndricos para los tornillos.

Condiciones de simetría

- En la cara plana trasera del componente donde se encuentra roscado a otro componente.
- En las caras hexagonales del componente donde se alojan las tuercas. Se ha considerado una situación intermedia para estas superficies, dado que no se encuentran libres ni empotradas, ya que la fijación con tuerca no se trata de un ajuste forzado.

En la figura 69 puede apreciarse en que superficies se han aplicado las cargas y condiciones de contorno:

- Aplicación de una presión constante de 10 bares en las superficies internas del conducto (en azul).

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

- Condiciones de empotramiento (en rojo) en los agujeros.
- Condiciones de simetría (en verde) en las caras hexagonales de la tuerca y la superficie plana contra la que se atornilla el componente.

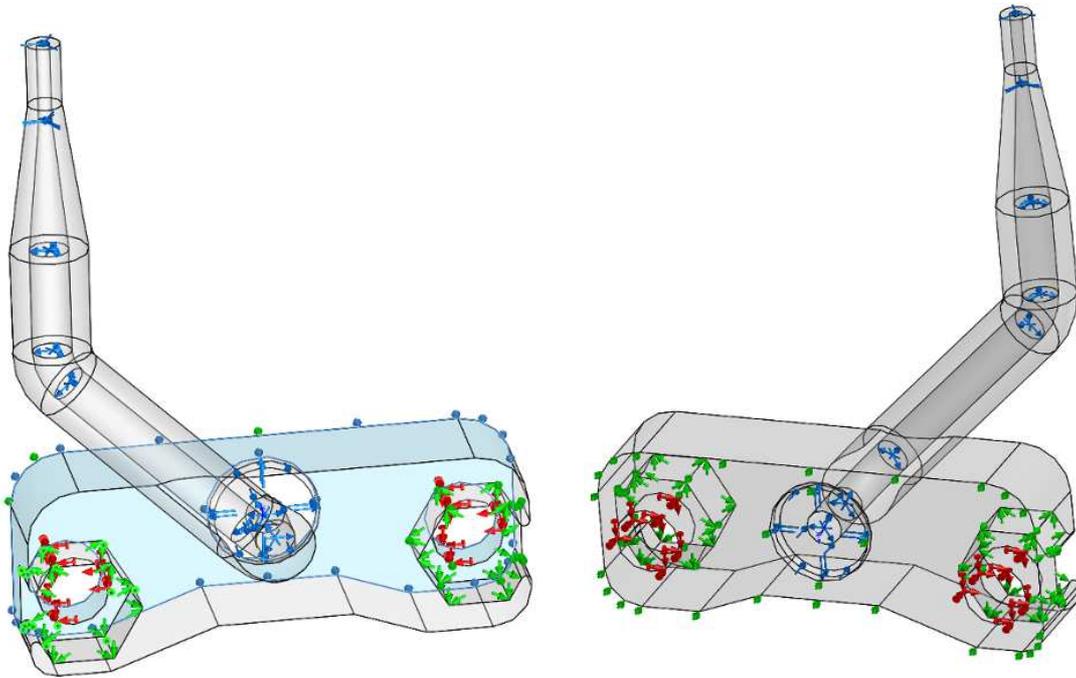


Figura 69. Imágenes frontal y trasera del componente donde se muestra la aplicación de una presión constante y las condiciones de contorno.

3.2.1.3 Material

En la tabla de materiales que ofrece el programa de cálculo por el MEF, se ha seleccionado la aleación 316LVM de entre todos los materiales, las propiedades del material Acero inox. 316LVM han sido editadas teniendo en cuenta las propiedades mecánicas obtenidas en el proceso SLM para este material (Sección 2.4.1).

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Se han utilizado los valores de L.e, Resistencia Máxima a Rotura y Modulo de Elasticidad evaluadas mediante las probetas fabricadas en la sección 2.3.1 (ver Tabla 12).

PROPIEDADES MECANICAS ACERO AISI 316 LVM				
L.e (MPa)	R (MPa)	E (GPa)	A (%)	Z (%)
537,6	666,3	178,0	17,8	18,6

Tabla 12. Valores promedio en el cálculo MEF para las propiedades mecánicas del Acero inox. 316 LVM procesado por SLM.

Se ha utilizado el coeficiente de Poisson del acero 316L disponible en la biblioteca de materiales de SolidWorks, ya que no se disponía de medios técnicos para evaluarlo sobre las probetas de tracción fabricadas con SLM ni datos bibliográficos para acero 316L procesado por proceso SLM.

Una vez, se han aplicado las cargas, condiciones de contorno y las propiedades del material, se ha mallado la geometría 3D (Figura 70).

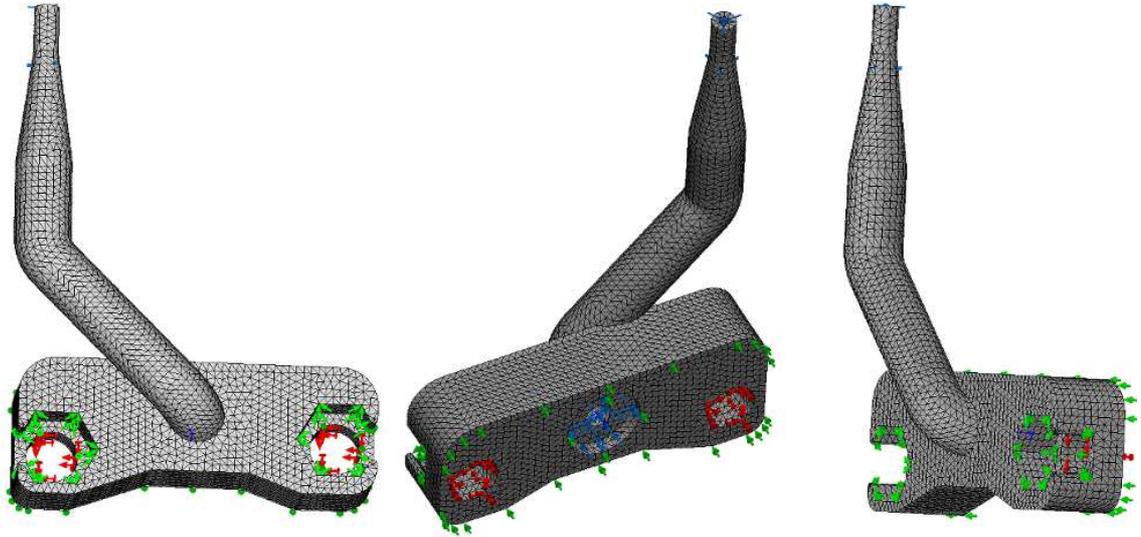


Figura 70. Distintas imágenes de la malla aplicada al componente.

3.2.1.4 Resultados

Tras la resolución del cálculo MEF con la malla y condiciones anteriores se han obtenido los siguientes resultados (Figuras 71-74):

- **Distribución de tensiones de Von Mises:**

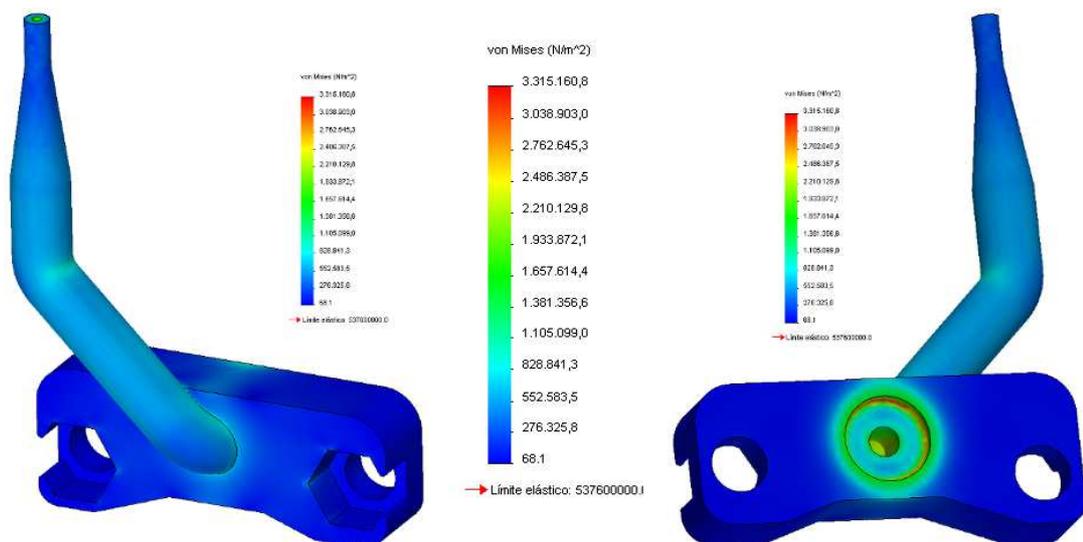


Figura 71. Distribución de tensiones del componente inyector aceite.

▪ **Distribución de deformaciones:**

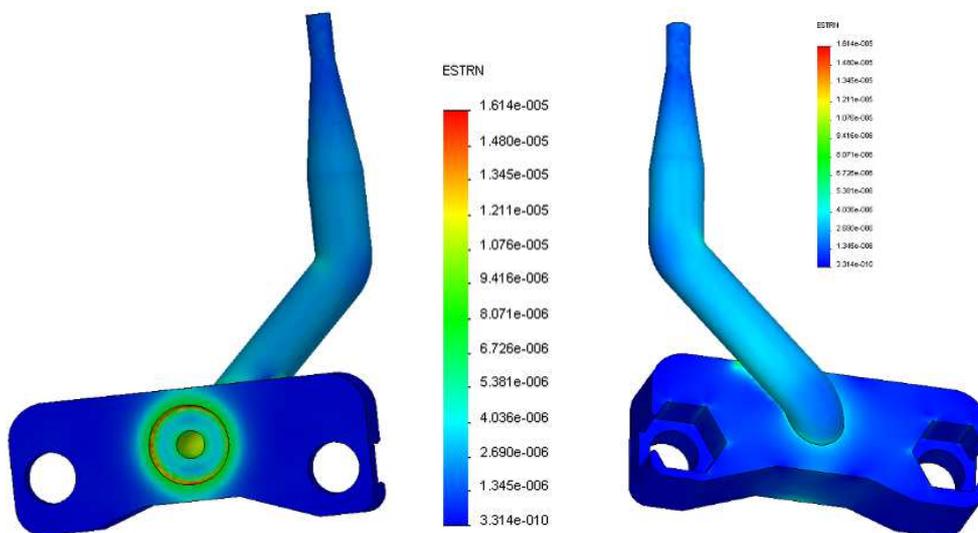


Figura 72. Imágenes de la distribución de deformaciones del componente inyector aceite.

▪ **Distribución de desplazamientos:**

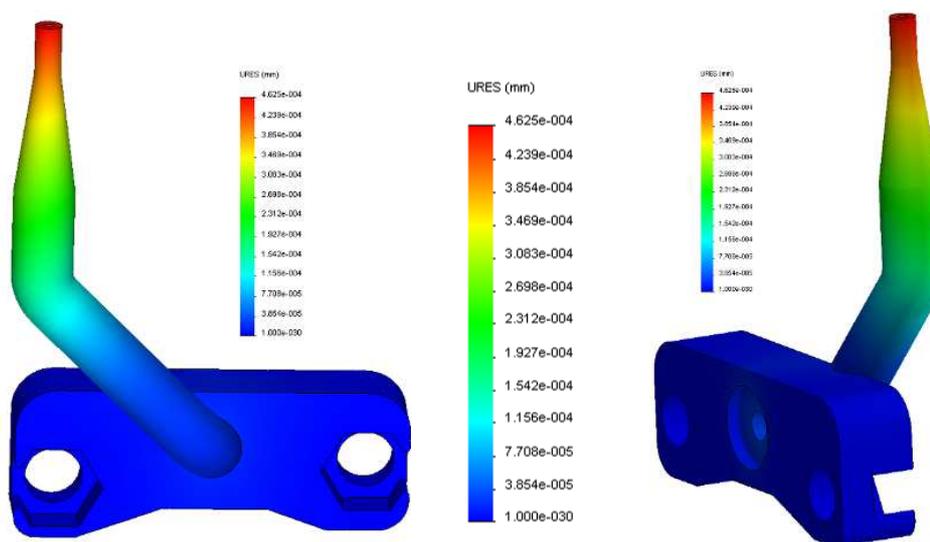


Figura 73. Imágenes de la distribución de desplazamientos en el componente inyector.

▪ **Distribución del Factor de Seguridad:**

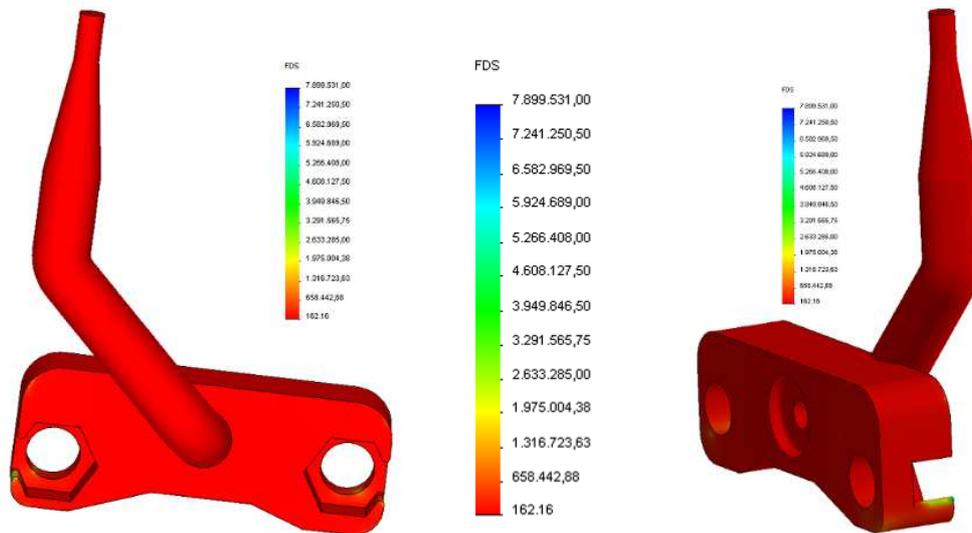


Figura 74. Distribución del Factor de Seguridad del componente.

Observaciones:

- En la distribución de tensiones de Von Mises puede observarse que este diseño de componente soporta de forma holgada las solicitaciones a las que se encuentra sometido. Prácticamente toda la pieza se encuentra sometida a una tensión menor de 1 MPa azul, lo que indica que la mayoría del material no trabaja y por tanto hay una gran cantidad de volumen sobrante en este diseño. Es necesario remarcar que el L.e del material es igual a 537,6 MPa.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} < \sigma_Y$$

Donde:

- $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, son las tensiones principales en el punto considerado.
- σ_Y , la tensión de límite elástico del material.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

- La distribución del Factor de Seguridad a lo largo del componente corrobora la anterior conclusión, puesto que el mínimo valor del FDS es 162, es decir el material en ese punto de la pieza tendría que soportar 162 veces más tensión para que se produzca la fluencia.

$$FDS = \frac{\sigma_{Le}}{\sigma_{Von Mises}} > 1$$

Como se había previsto, las σ 's no van a ser un aspecto crítico debido al bajo nivel de las cargas a soportar por el componente comparado con las propiedades mecánicas del material. Aunque se realiza el análisis para ilustrar la metodología de diseño desarrollada, por lo tanto se reducirán espesores y en general la cantidad de material y se uniformizarán las tensiones del componente mediante una mejora geométrica. Comentar que, los aspectos críticos de dimensionamiento pueden deberse más a manipulación del componente que a las solicitaciones del servicio.

3.2.2 Análisis del diseño mediante MEF

En los siguientes apartados se va a realizar un análisis del diseño del componente teniendo en cuenta los resultados obtenidos tras el cálculo MEF estático estructural y teniendo en cuenta las reglas de fabricabilidad desarrolladas en el capítulo 2.

Como punto de partida para el próximo diseño se estudian, las iso-superficies de tensión en el componente. Haciendo un barrido del rango de tensiones a las que se encuentra sometido el componente pueden visualizarse que volúmenes o zonas del componente se encuentran por encima de determinado valor de tensión de Von Mises.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Al mismo tiempo el cálculo MEF permite conocer que volumen en % del componente se encuentra sometido al valor de Tensión seleccionado o soportando tensiones superiores (Figura 75).

A continuación se presenta una secuencia de instantáneas donde se ha ido disminuyendo el valor de la tensión para ver qué zonas del componente están trabajando a un determinado valor de Tensión de Von Mises o valores superiores (ver Figuras de 76 a 85). Aunque cuantitativamente no se trata de un buen ejemplo por el nivel máximo de σ 's, cualitativamente ilustra de forma adecuada la metodología de diseño desarrollada en la Sección 2.5.

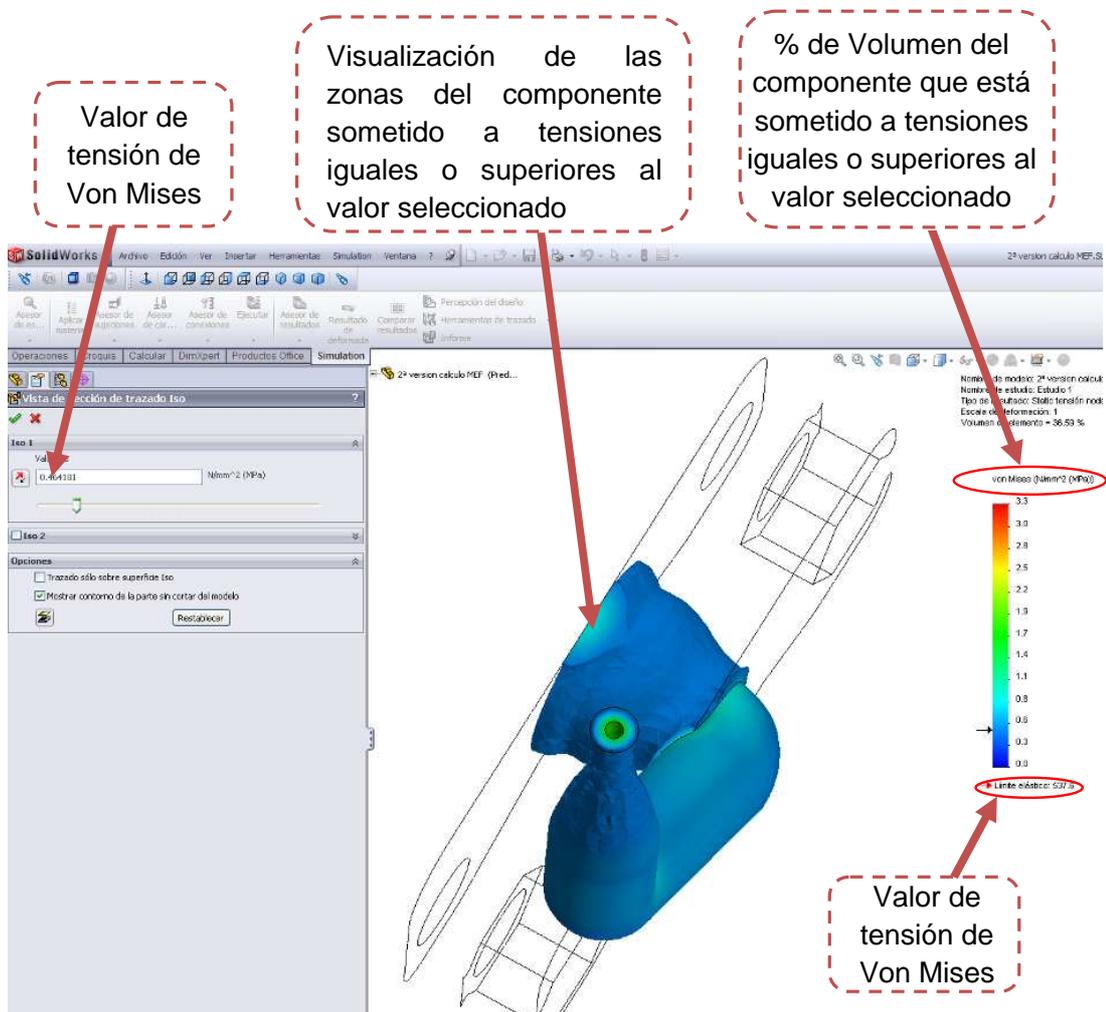


Figura 75. Ejemplo del método empleado para analizar las zonas del componente sometidas a una tensión de Von Mises igual o superior a un valor seleccionado.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Nombre de modelo: 2ª version calculo MEF
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 0.17 %

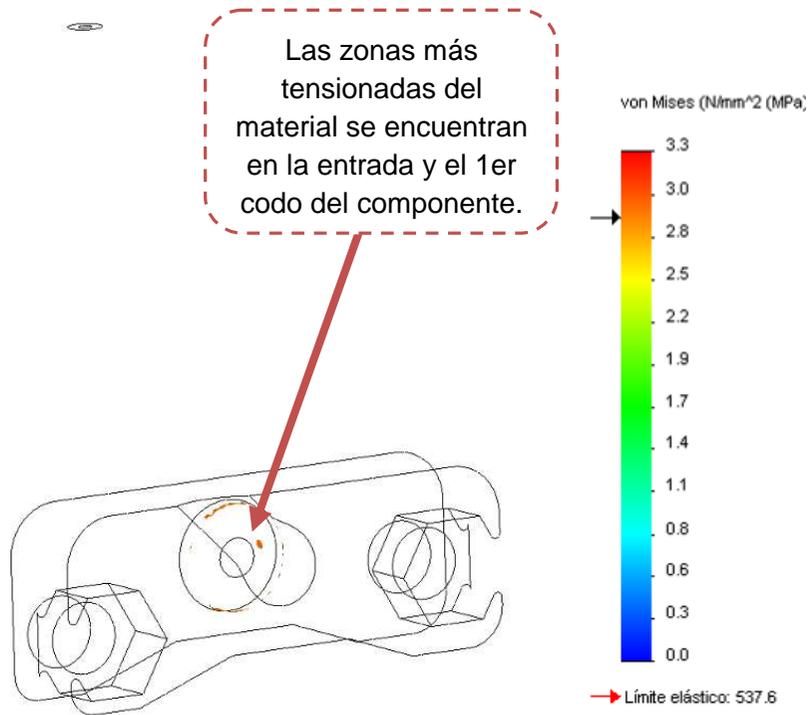


Figura 76. Imagen con zona del componente sometida a 2.9 MPa.

Nombre de modelo: 2ª version calculo MEF
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 1.89 %

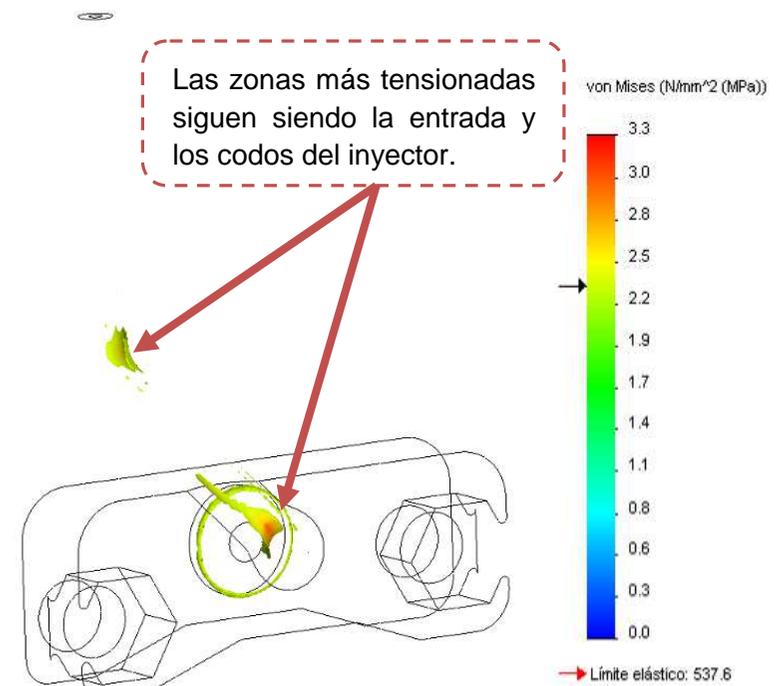


Figura 77. Imagen con zonas del componente sometidas a 2.4 MPa.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Nombre de modelo: 2ª version calculo MEF
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 6.47 %

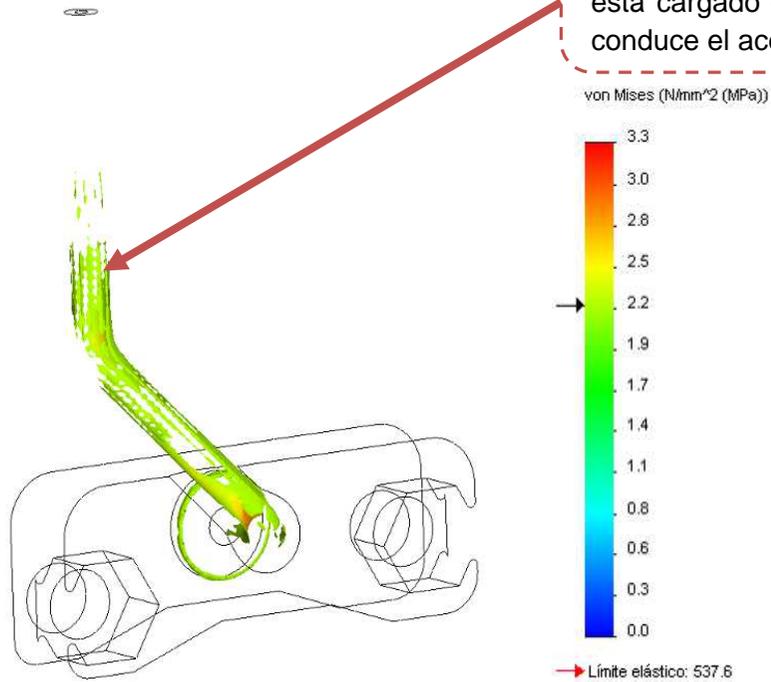


Figura 78. Imagen con zona del componente sometida a 2.2 MPa.

Nombre de modelo: 2ª version calculo MEF
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 11.22 %

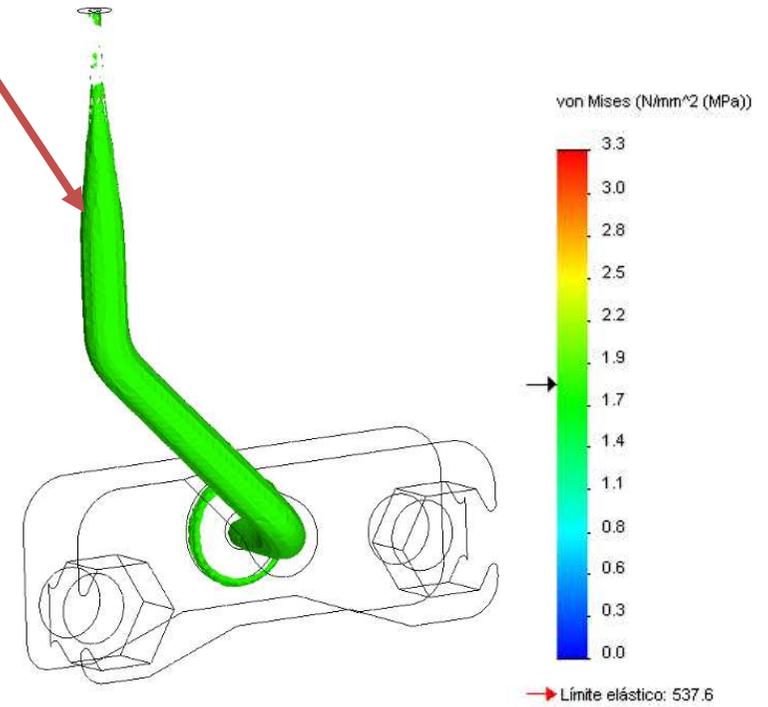
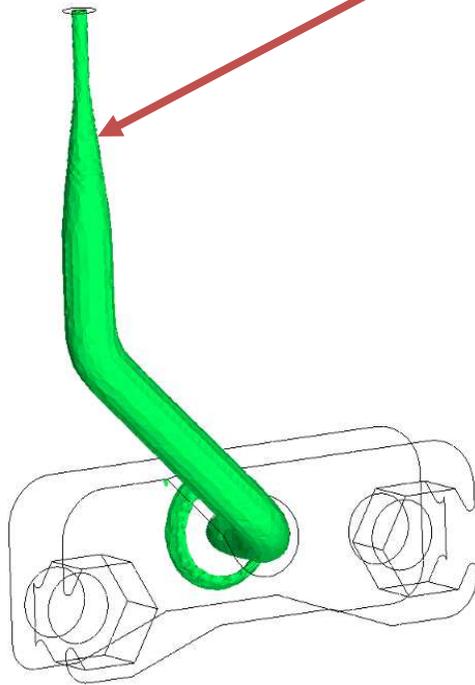


Figura 79. Imagen de la zona del componente sometida a 1.8 MPa.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Nombre de modelo: 2ª version calculo MEF
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 12.97 %



Se observa que a este nivel de tensiones solo está cargado el canal, que conduce el aceite a presión

Nombre de modelo: 2ª version calculo MEF
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 25.96 %

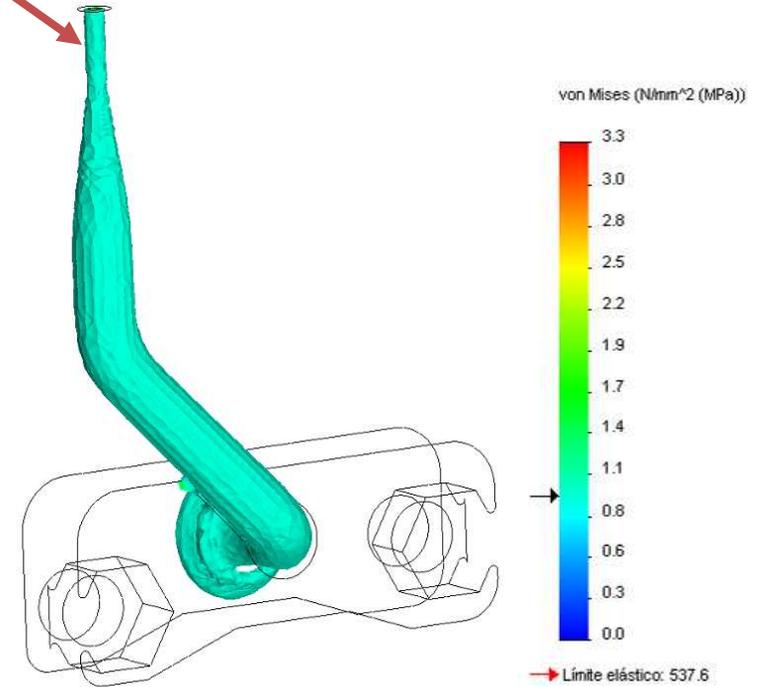


Figura 80. Imagen de la zona del componente sometida a 1.4 MPa.

Figura 81. Imagen de la zona del componente sometida a 0.9 MPa.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Nombre de modelo: 2ª version calculo MEF
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 34.95 %

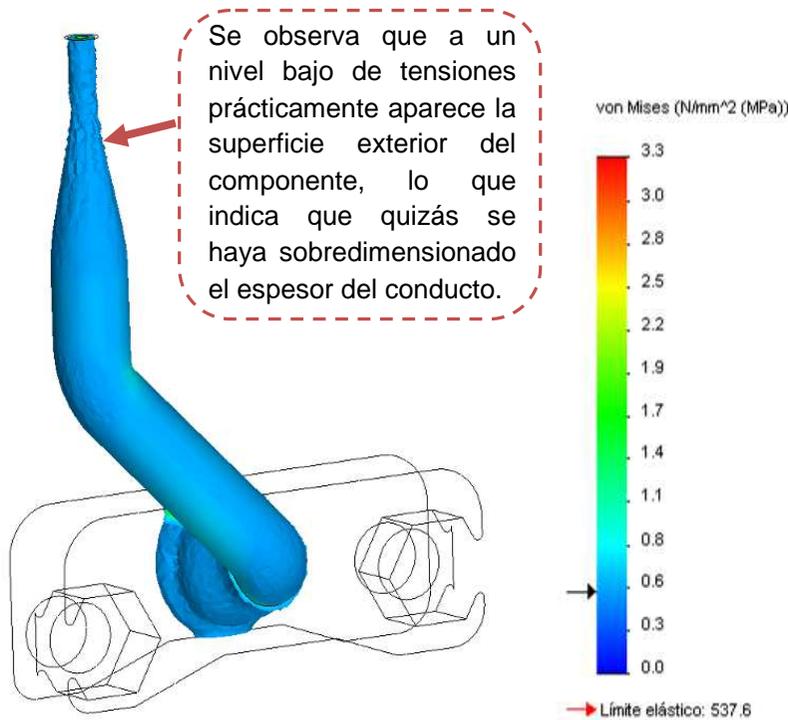


Figura 82. Imagen de la zona del componente sometida a 0.6 MPa.

Nombre de modelo: 2ª version calculo MEF
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 55.38 %

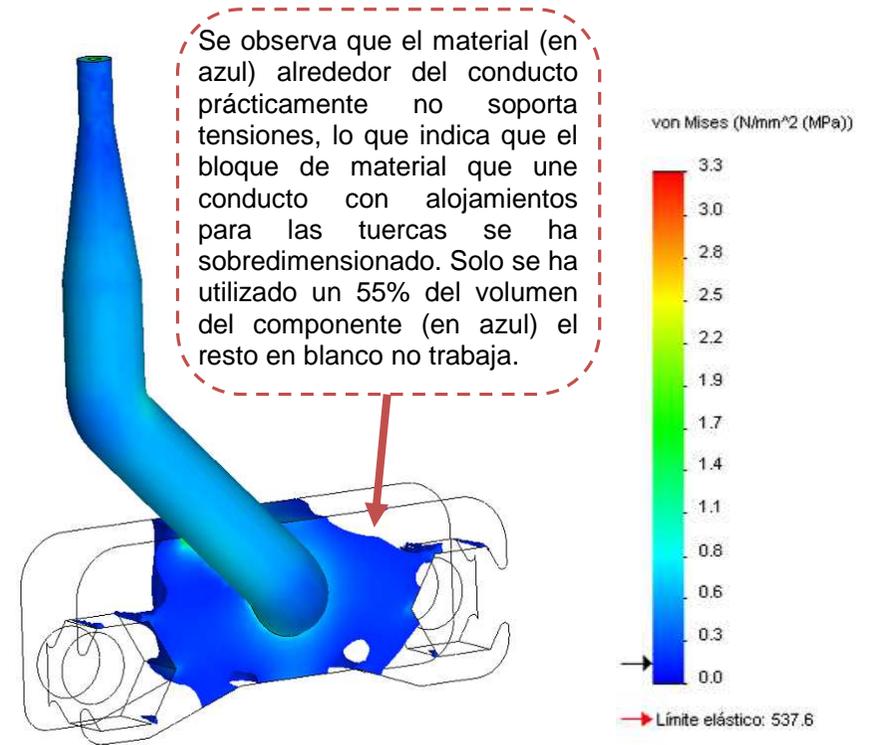


Figura 83. Imagen de la zona del componente sometida a 0.1 MPa.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Nombre de modelo: 2ª version calculo MEF
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 81.06 %

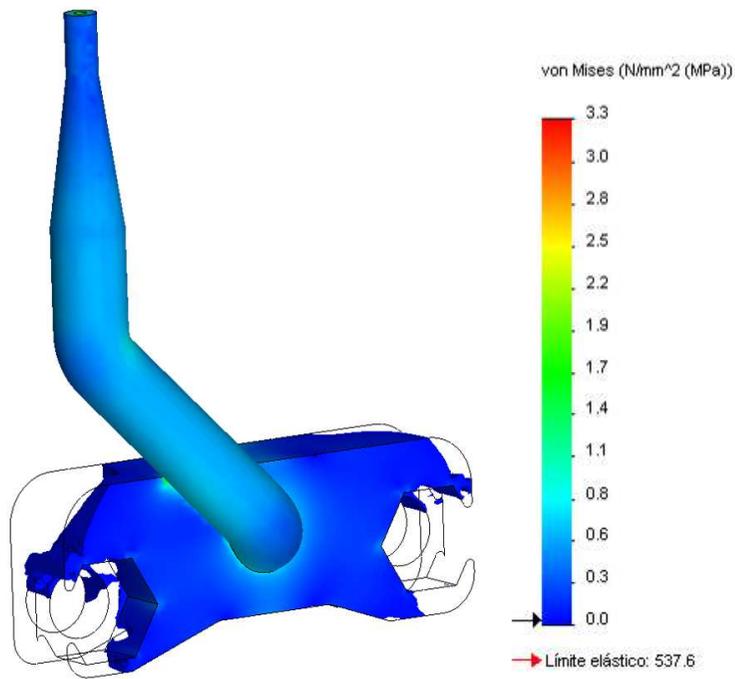


Figura 84. Imagen de la zona del componente sometida a 0.03 MPa.

Nombre de modelo: 2ª version calculo MEF
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 95.83 %

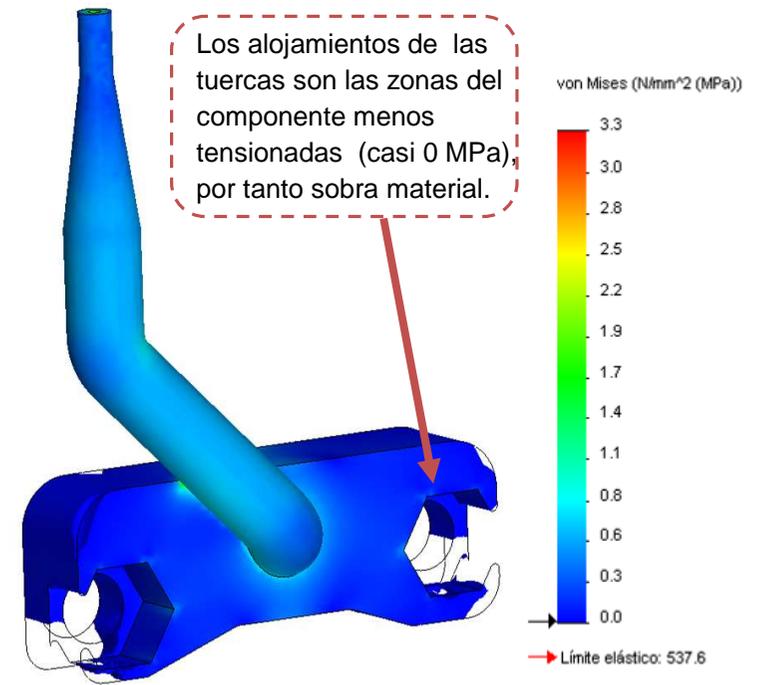


Figura 85. Imagen de la zona del componente sometida a 0.01 MPa.

3.2.3 Análisis de fabricabilidad para SLM

Se debe remarcar que la fabricación por SLM tendría problemas, ya que se debería inclinar la pieza 45° para evitar las caras planas en voladizo de los alojamientos de las tuercas (Figura 86).

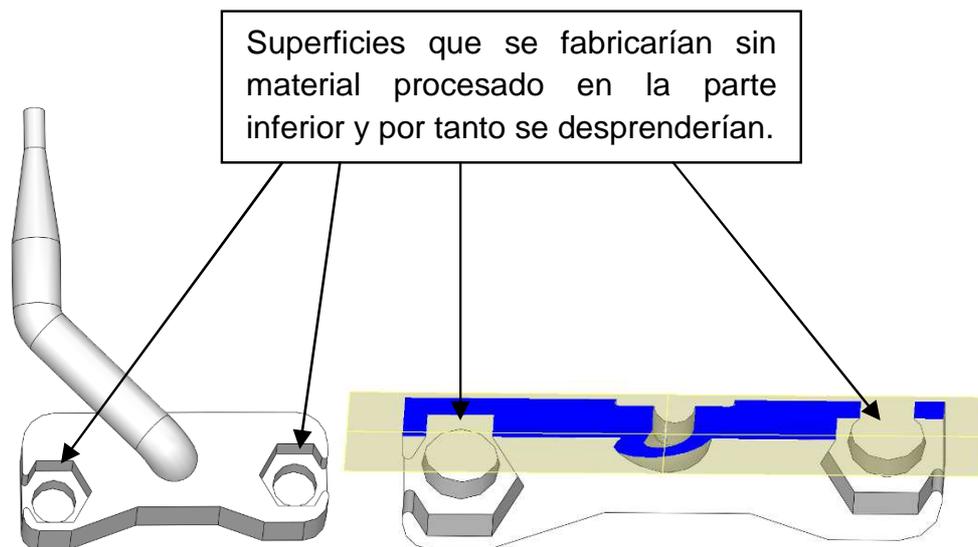


Figura 86. Imagen de las zonas de alojamiento de las tuercas que no son fabricables por SLM.

Por tanto, la geometría debería inclinarse 45° para intentar evitar la fabricación de superficies voladas que exceden los límites del proceso de fabricación SLM, aun así existirían problemas en la zona de los alojamientos, puesto que la cara e quedaría con inclinación de 15° (Figura 87) y comenzaría a fabricarse sobre material en polvo sin procesar, que no tiene la capacidad de soportar la pieza. Produciéndose desprendimientos de algunas zonas del componente. Estos fragmentos libres sobre el área de trabajo van rayando y dañando la pieza por choques al ser empujados por el coater al repartir las sucesivas capas.

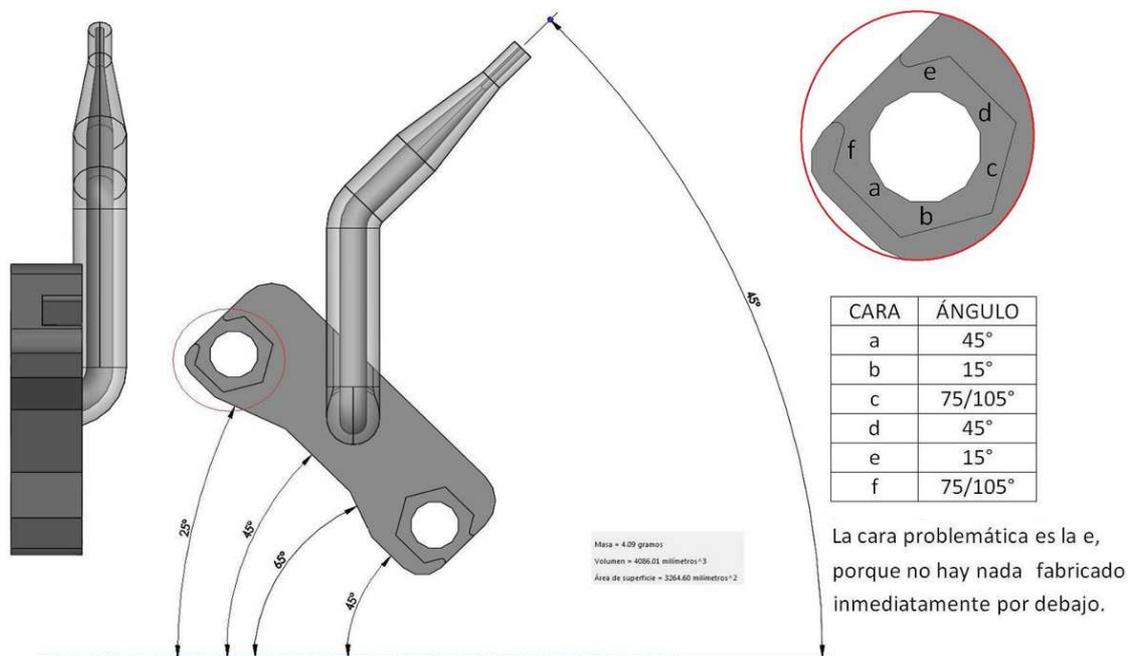


Figura 87. Orientación del componente con menores problemas de fabricación por SLM.

3.2.4 Consideraciones para la mejora del diseño según el análisis MEF y fabricabilidad para SLM

3.2.4.1 Conclusiones obtenidas tras el análisis del diseño y el cálculo estático estructural por MEF

Se ha comprobado que los valores de las tensiones, a las que está sometido el componente, son muy bajas y por tanto no son peligrosas para la integridad estructural del componente. Asumiendo que cuantitativamente las tensiones no son críticas, se pretende uniformizarlas mediante un rediseño del componente para ilustrar cualitativamente la metodología de diseño en la sección 2.5.

- **Idea 1:** Suavizar la curvatura del codo de la entrada (Figuras 76 y 77) para suavizar el efecto de concentrador de tensiones, de esta manera las tensiones disminuirán.
- **Idea 2:** Se debe reforzar la zona de la entrada del aceite al conducto, ya que se aprecian las tensiones más elevadas.
- **Idea 3:** Suavizar la curvatura del segundo codo para mejorar la trayectoria de la canalización ó conducto. Este cambio en la geometría mejorará a su vez la fluidodinámica del proceso.
- **Idea 4:** Disminución del espesor de pared de la canalización puesto que la superficie exterior del canal (en azul) se encuentra a un nivel muy bajo de tensiones, 0,5 MPa aproximadamente.
- **Idea 5:** Se ha sobredimensionado el cuerpo que conecta el conducto y que alberga los alojamientos de las tuercas, estas permiten fijar el componente. Prácticamente no está soportando tensión (0,03 – 0,01 MPa) según el cálculo MEF. El espesor de este cuerpo debe reducirse lo máximo posible como mínimo hasta el valor del espesor del conducto, que se encuentra sometido a valores de tensión mayores en el rango entre 2 y 1 MPa, aunque estos valores máximos de tensiones son bajísimos y no son críticos estructuralmente para el componente. Se deben uniformizar espesores, evitando cambios bruscos de sección que podrían ocasionar concentradores de tensiones.

3.2.4.2 Conclusiones obtenidas tras el análisis de fabricabilidad para SLM

- **Idea 6:** Las zonas de los alojamientos de las tuercas pueden producir problemas de fabricación, sobretudo la cara superior de cierre del hexágono, esta se debe eliminar. Es suficiente para evitar el giro de la tuerca y permitir la fijación con el resto de caras.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

- **Idea 7:** Se deben cumplir las restricciones de diseño para una correcta fabricación por SLM obtenidas en la *Sección 2.3* y la metodología de diseño (*Sección 2.5.*). Ejemplos:
 - Diseñar las caras con una inclinación superior a 45° para evitar problemas de fabricación, la geometría se va fabricando de forma auto-soportada.
 - Respetar los espesores mínimos de sección del componente.
 - Se deben cumplir las limitaciones para diámetros verticales por ejemplo en los agujeros del componente para los tornillos y para la entrada del aceite.
 - Añadir la mínima cantidad de soportes y de base para la separación de la pieza de SLM por métodos de corte sierra.

- **Idea 8:** Como se va a disminuir el espesor del cuerpo de la pieza, la sección inferior de la pieza puede reducirse al mínimo, por ejemplo empezar con un chaflán de espesor mínimo, para facilitar manualmente la separación de la placa fabricación mediante el empuje de la pieza (efecto bisagra).

3.3 Alternativa de diseño 3: Diseño del componente mejorado mediante el análisis MEF y para fabricación por SLM

En el diseño del componente inyector de aceite analizado mediante cálculo MEF se va aplicar la metodología de diseño desarrollada (*Sección 2.5.1.*) para obtener un diseño mejorado atendiendo las solicitaciones mecánicas y para el proceso de fabricación SLM.

3.3.1 Aplicación de la metodología de diseño

- 1. Especificaciones y documentación técnica:** mediante el cálculo MEF previo se comprende la función del componente, las zonas de la pieza tensionadas y no tensionadas y por tanto donde sobra material y donde hay que reforzar.
- 2. Los anclajes y conexiones a otros componentes y las entradas y salidas de los conductos** son el punto de partida del nuevo componente, estos suelen definir automáticamente ciertas zonas del nuevo componente, estas interacciones son fijas y estándares por tanto rara vez pueden ser modificables, por ejemplo la posición de los agujeros y el diámetro de estos, zonas roscadas etc. En este caso práctico, los anclajes y conexiones del componente y la entrada y salida del aceite se deben mantener fijas y se toman de punto de partida del diseño.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

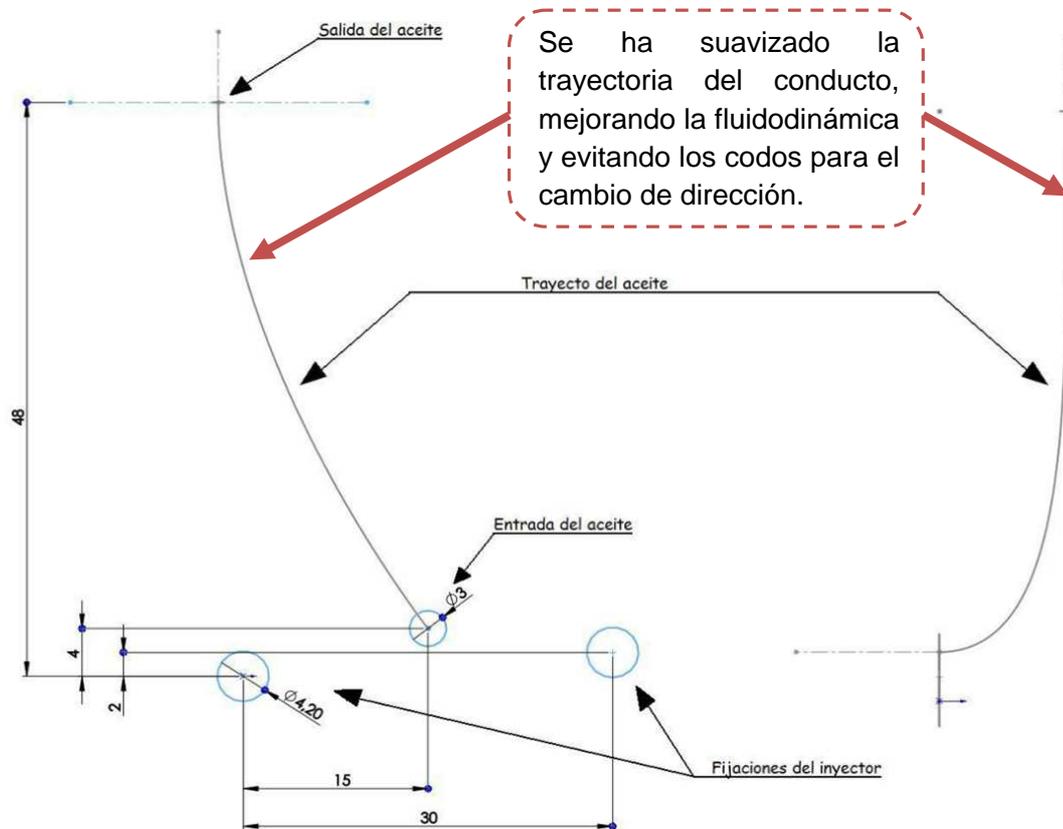


Figura 88. Esquema de situación de agujeros y conducto.

A continuación se presenta en distintas imágenes el proceso de diseño del componente mejorado. Mientras se realizan las sucesivas operaciones de diseño mecánico del componente se va aplicando los puntos correspondientes de la metodología de diseño. Al mismo tiempo se aplican las conclusiones de mejora por MEF y de fabricabilidad por SLM obtenidas tras el análisis del diseño anterior (ver Figuras de 89 a 101). Como ya se ha comentado, aunque cuantitativamente no se trata de un buen ejemplo por el nivel máximo de σ 's, cualitativamente ilustra de forma adecuada la metodología de diseño desarrollada en la Sección 2.5.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

PASO 1: Los anclajes y conexiones del componente y la entrada y salida del aceite se deben mantener fijas y se toman de punto de partida del diseño.

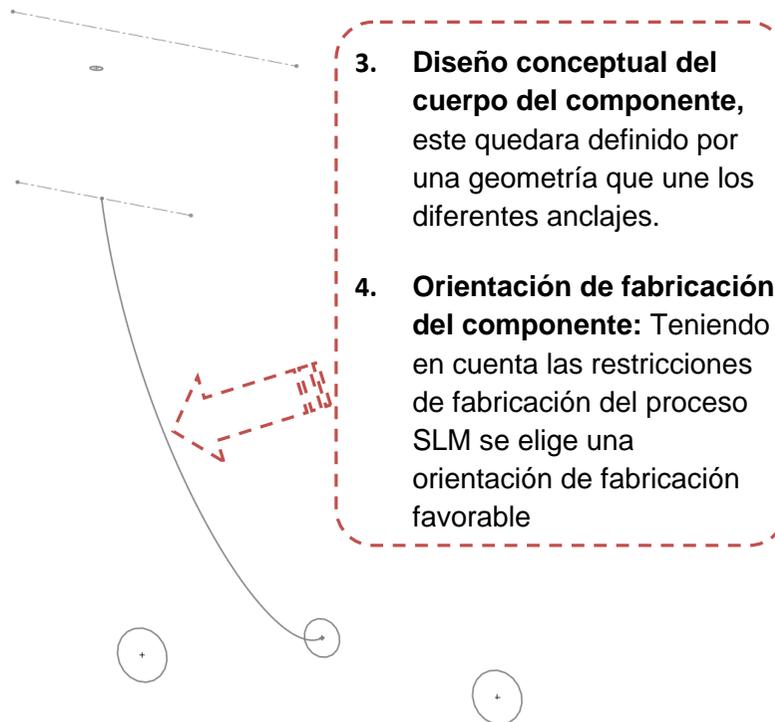


Figura 89. Esquema de los anclajes y conexiones del componente y la entrada y salida del aceite.

PASO 2: Los anclajes y conexiones del componente y la entrada y salida del aceite se deben mantener fijas y se toman de punto de partida del diseño. En este paso se diseña el conducto a partir de la entrada posición y diámetro fijo. El conducto sigue una trayectoria curva suave que permite ahorrar material y favorece la fluidodinámica al evitar los cambios de dirección con los codos.

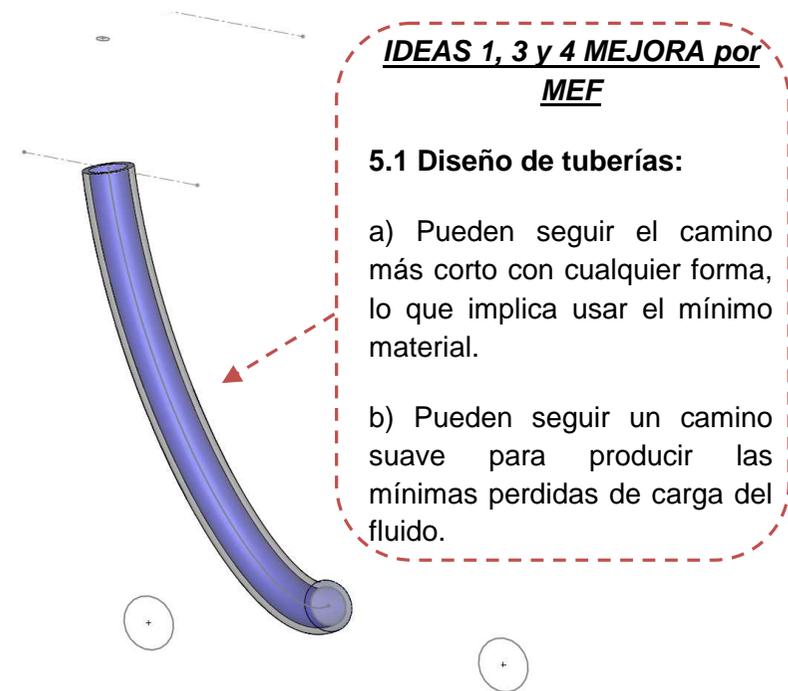


Figura 90. Esquema del inyector y diseño del conducto del aceite.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

PASO 3: Se diseña la salida del conducto que cambia de forma progresivamente, disminuyendo las pérdidas de carga. Las condiciones aplicadas han sido tangencia con el conducto anterior y normal al plano de salida.

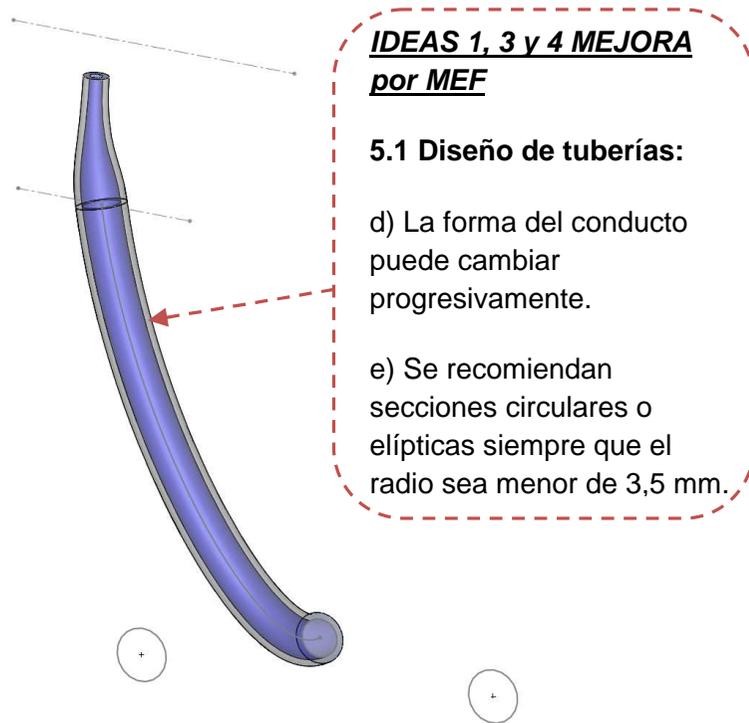


Figura 91. Esquema del inyector, diseño del orificio de salida del conducto del aceite.

PASO 4: En este paso, se ha incluido el cuerpo base que une el conducto con los alojamientos de los anclajes.

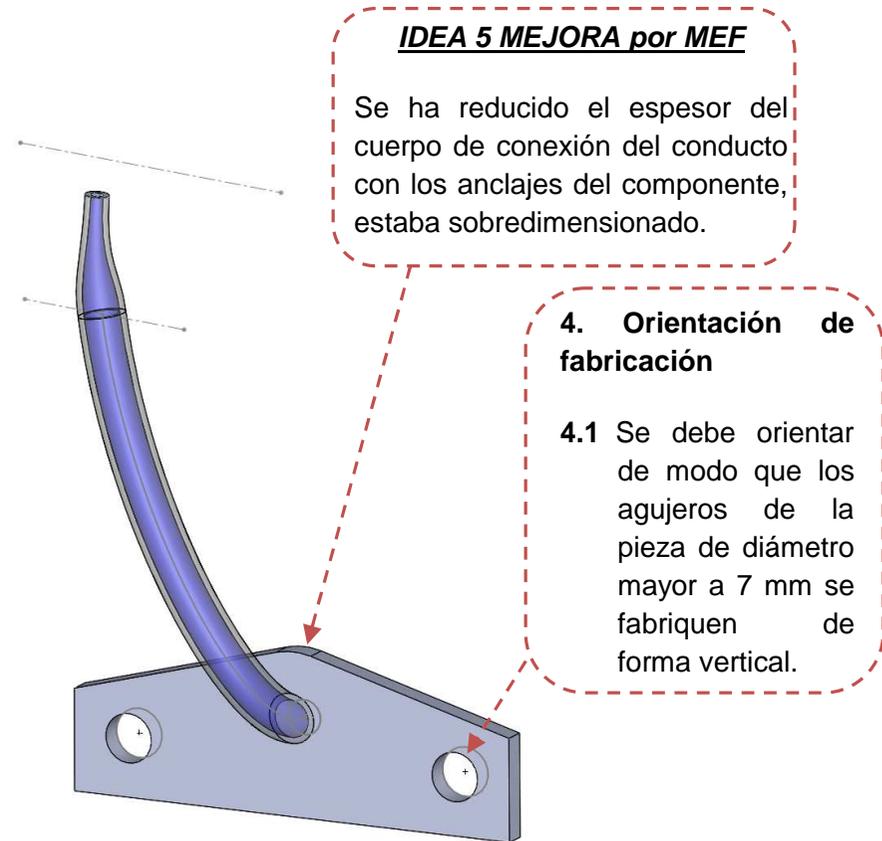


Figura 92. Preforma del componente inyector de aceite (conducto + cuerpo).

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

PASO 5: Se diseñan los hexágonos para crear los alojamientos de las tuercas.

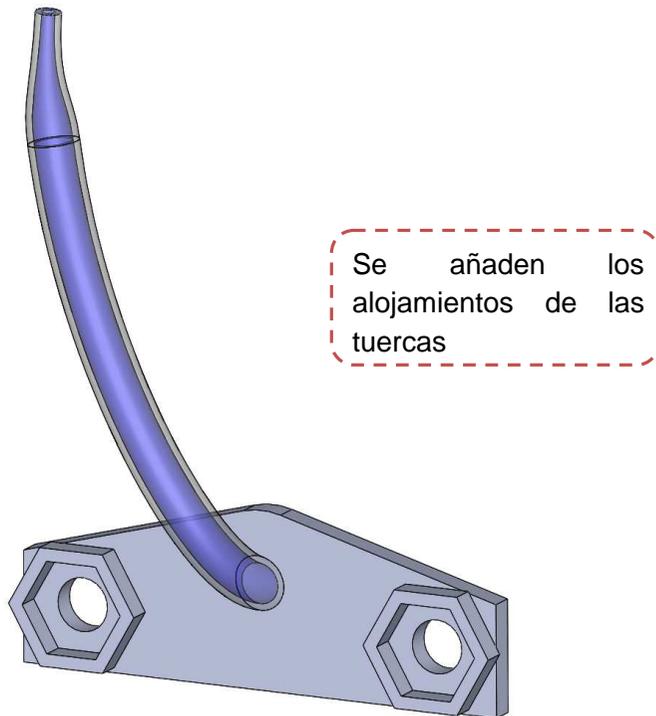


Figura 93. Preforma del componente inyector de aceite (conductor + cuerpo + alojamiento tuercas).

PASO 6: Se eliminan las zonas con problemas de fabricabilidad por SLM, superficies en voladizo superiores.

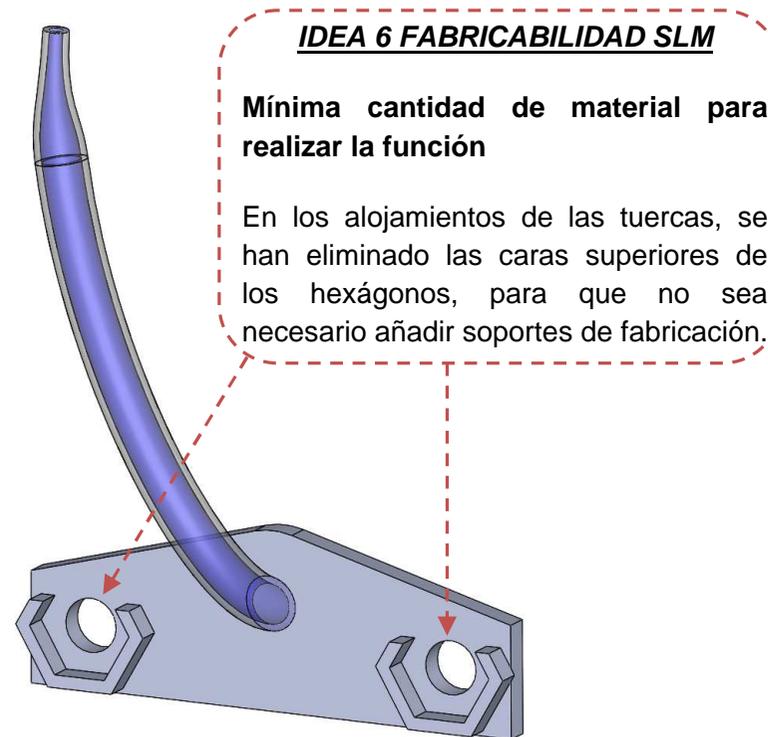


Figura 94. Evolución del diseño de detalle del componente.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

PASO 7: Se añade un suplemento inferior a la pieza que comienza desde un espesor muy fino lo que permitirá separarla fácilmente de la placa base de fabricación manualmente.

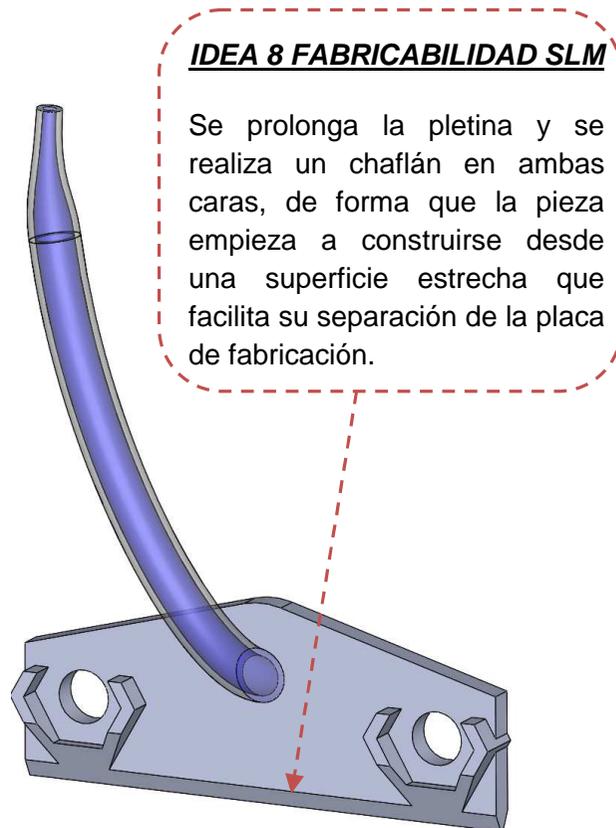


Figura 95. Diseño de detalle del componente con geometría en chaflán para facilitar fabricación y separación de la placa.

PASO 8: Se recortan laterales sobrantes para reducir la cantidad de material.

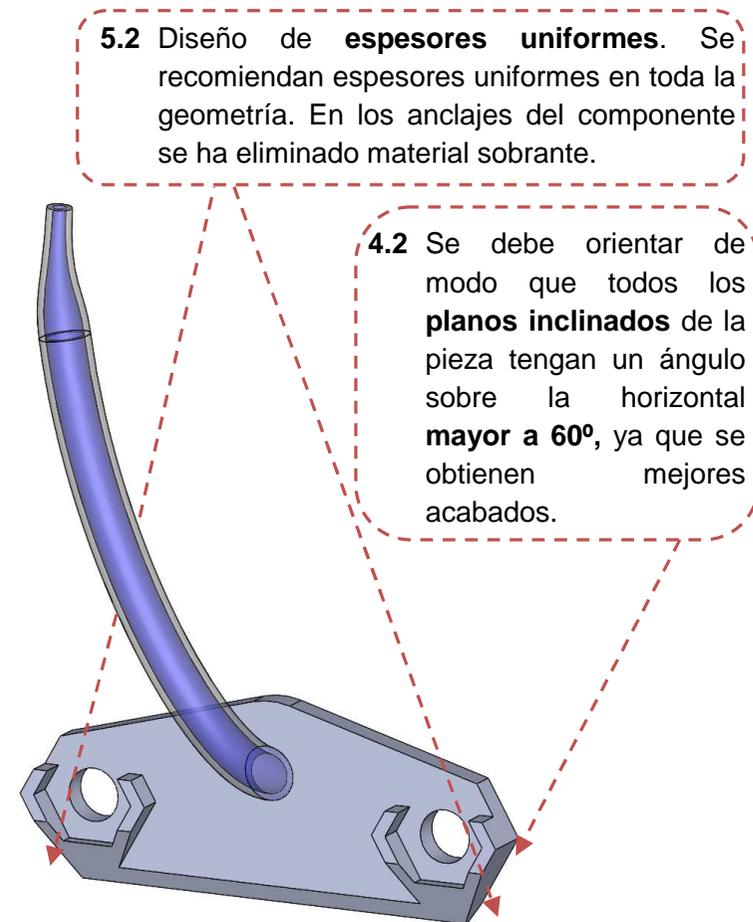


Figura 96. Diseño de detalle del componente. Eliminación de zonas sobrantes de la geometría.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

PASO 9: En este paso se elimina geometría de la pieza, porque solo con las otras superficies del alojamiento se realiza la función.

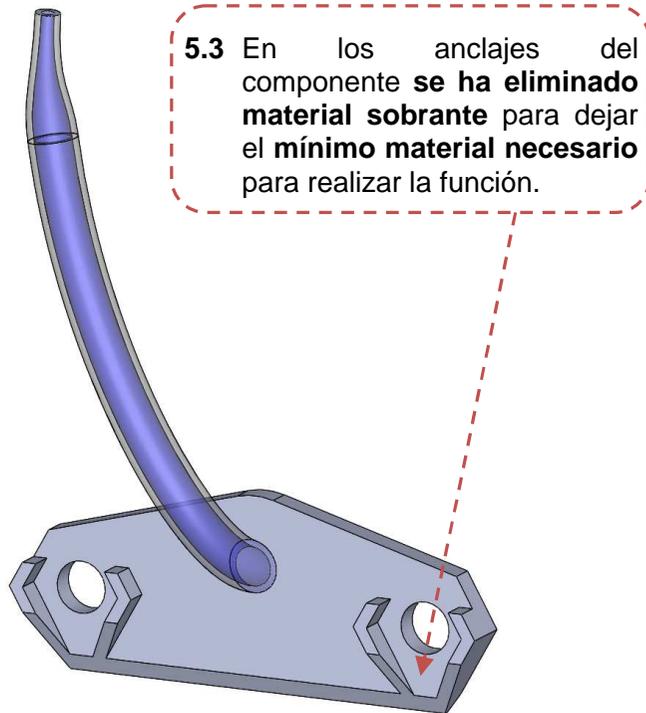


Figura 97. Diseño de detalle del componente.
Eliminación de zonas sobrantes de la geometría.

PASO 10: se ha diseñado la entrada posterior del inyector y se ha reforzado el codo inicial añadiendo material pero cumpliendo las inclinaciones mínimas respecto la horizontal para asegurar la correcta fabricación por SLM sin necesidad de soporte.



Figura 98. Diseño de detalle del componente.
Refuerzo para favorecer fabricación sin soportes.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

PASO 11: Se aplican redondeos a las caras perpendiculares para evitar concentradores de tensiones y disminuir el desgaste del elemento repartidor de polvo (cepillo goma) durante la fabricación.

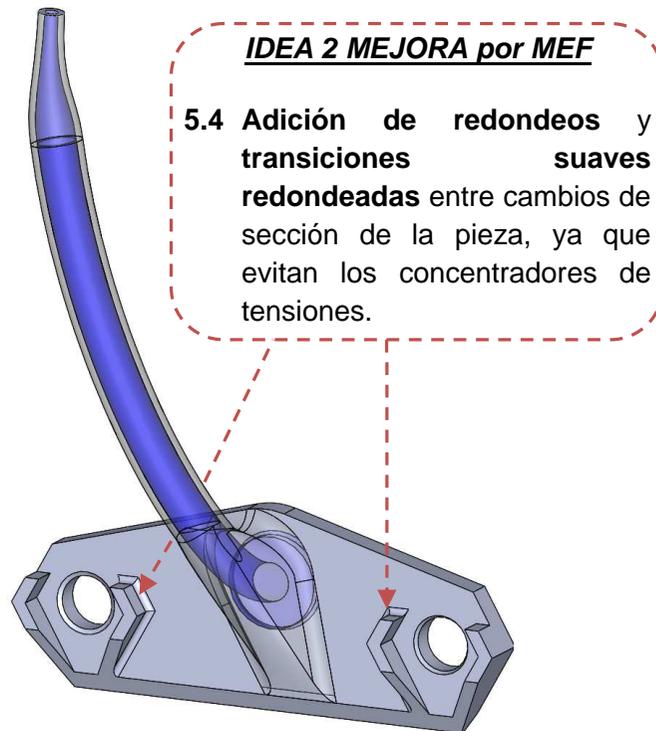


Figura 99. Diseño de detalle del componente. Adición de redondeos para eliminar concentradores tensiones

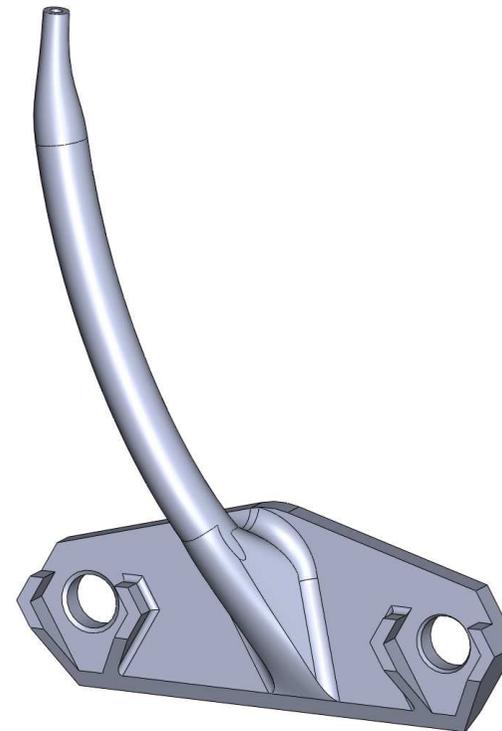


Figura 100. Imagen del componente diseñado según el proceso de diseño mejorado por MEF y para fabricación por SLM.

3.3.2 Diseño mejorado del inyector de aceite según MEF y fabricación por SLM

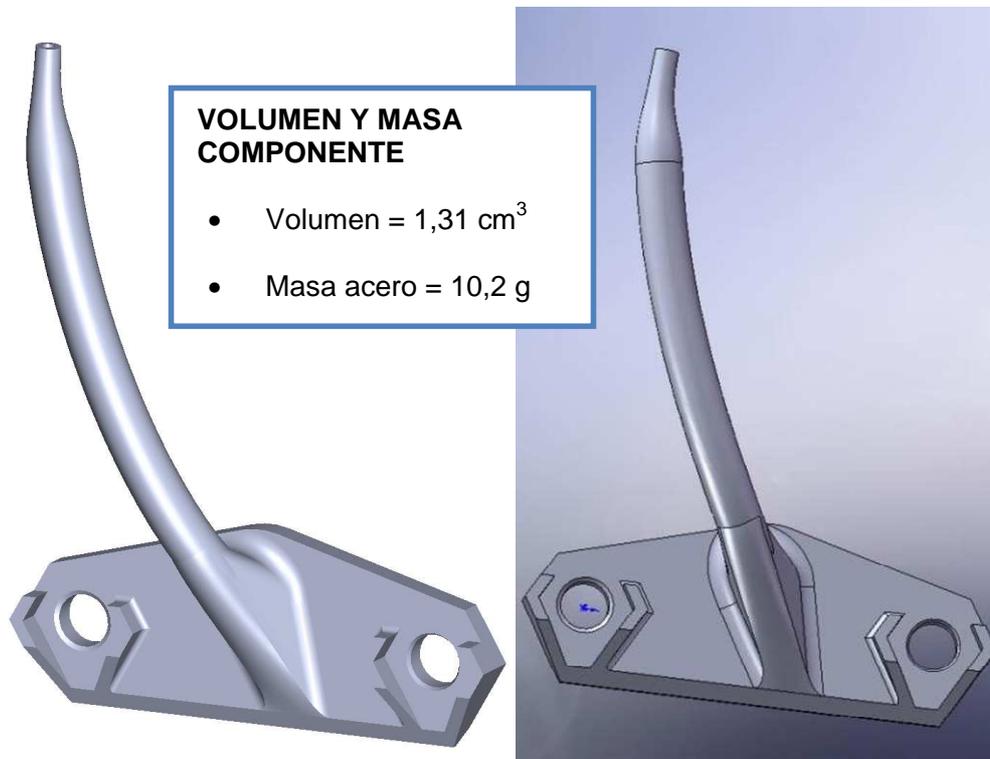


Figura 101. Imágenes 3D de la 3ª alternativa de diseño del componente inyector de aceite con información del volumen y masa.

3.3.3 Cálculo estático estructural por MEF

Con el objetivo de analizar este diseño mejorado del componente se ha realizado un cálculo estático por el MEF. Se han aplicado las siguientes cargas y condiciones de contorno:

3.3.1.1 Cargas

Presión de aceite = 10 bar = 1 MPa.

3.3.1.2 Condiciones de contorno

Empotramiento

- En los agujeros cilíndricos para los tornillos.

Condiciones de simetría

- En la cara plana trasera del componente donde se encuentra roscado a otro componente.
- En las caras hexagonales del componente donde se alojan las tuercas. Se ha considerado una situación intermedia para estas superficies, dado que no se encuentran libres ni empotradas, ya que la fijación con tuerca no se trata de un ajuste forzado.

En la figura 102 puede apreciarse en que superficies se han aplicado las cargas y condiciones de contorno:

- Aplicación de una presión constante de 10 bares en las superficies internas del conducto (azul).
- Condiciones de empotramiento (rojo) en los agujeros.
- Condiciones de simetría (verde) en las caras hexagonales de la tuerca y la superficie plana contra la que se atornilla el componente.

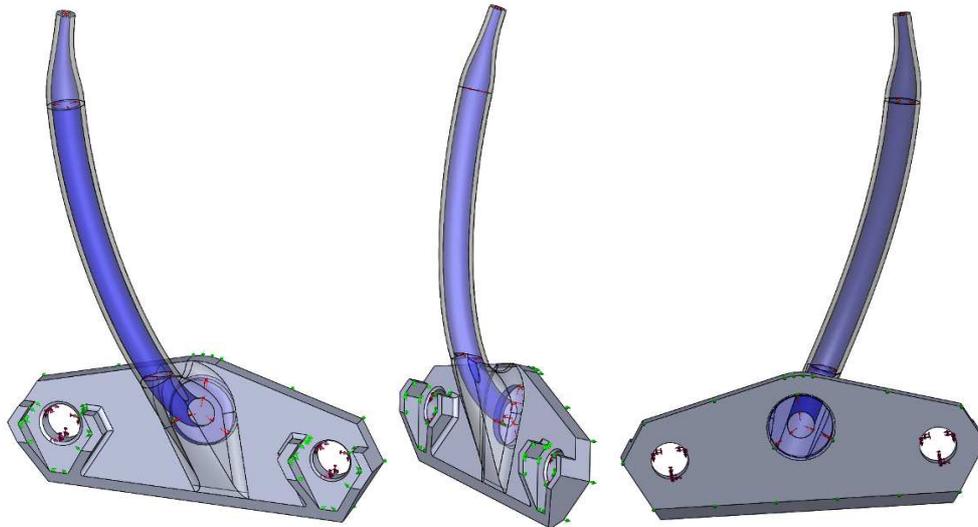


Figura 102. Imágenes frontal, lateral y posterior del componente donde se muestra la aplicación de cargas y condiciones de contorno.

3.3.1.3 Material

En la tabla de materiales del programa de cálculo MEF, se ha seleccionado la aleación 316LVM creada anteriormente con las propiedades mecánicas obtenidas con el proceso SLM. Tras aplicar las cargas, condiciones de contorno y las propiedades del material, se ha mallado la geometría 3D mejorada (Figura 103).

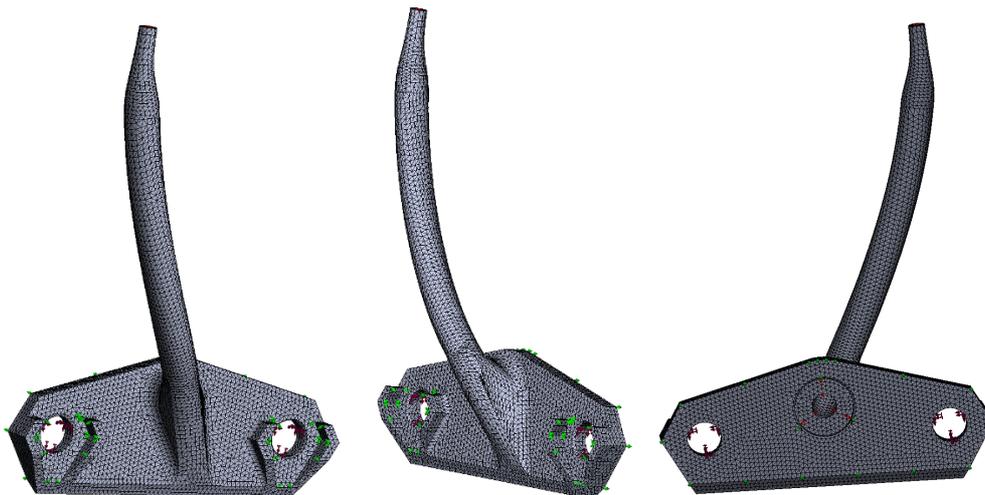


Figura 103. Distintas imágenes de la malla aplicada al componente.

3.3.1.4 Resultados

Se han obtenido los siguientes resultados (Figuras 104 a 107):

- **Distribución de tensiones de Von Mises:**

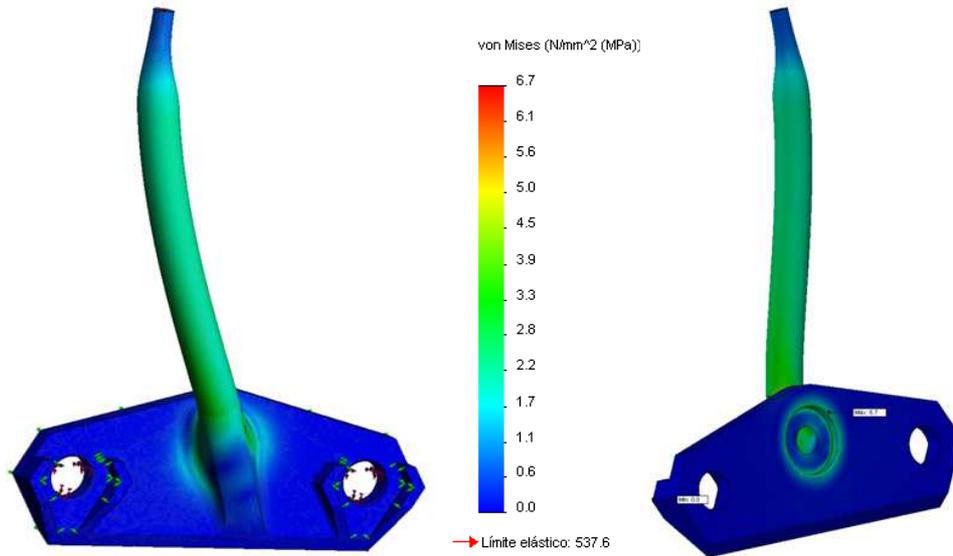


Figura 104. Imágenes de la distribución de tensiones del componente.

- **Distribución de deformaciones:**

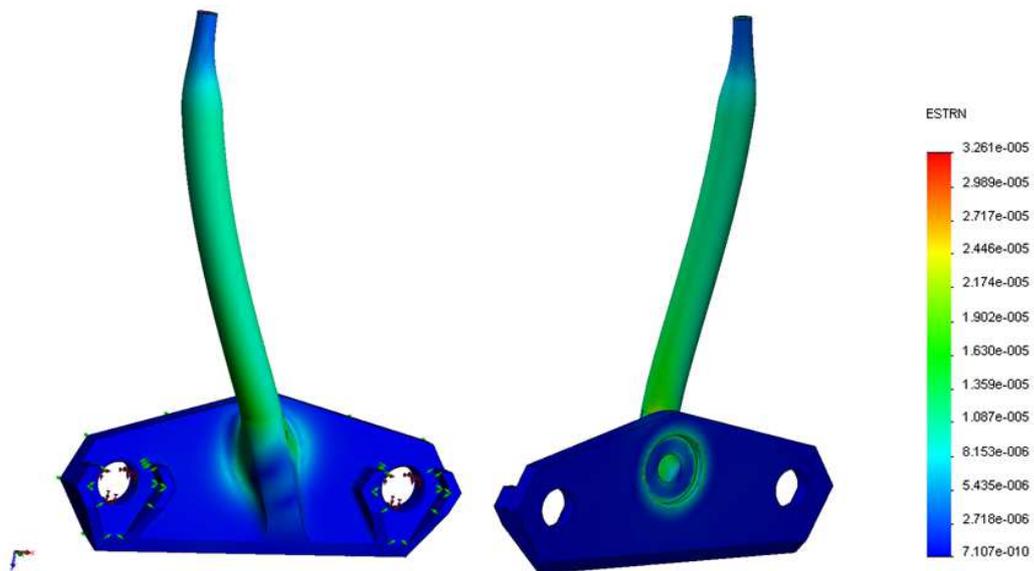


Figura 105. Distribución de deformaciones del componente.

▪ **Distribución de desplazamientos:**

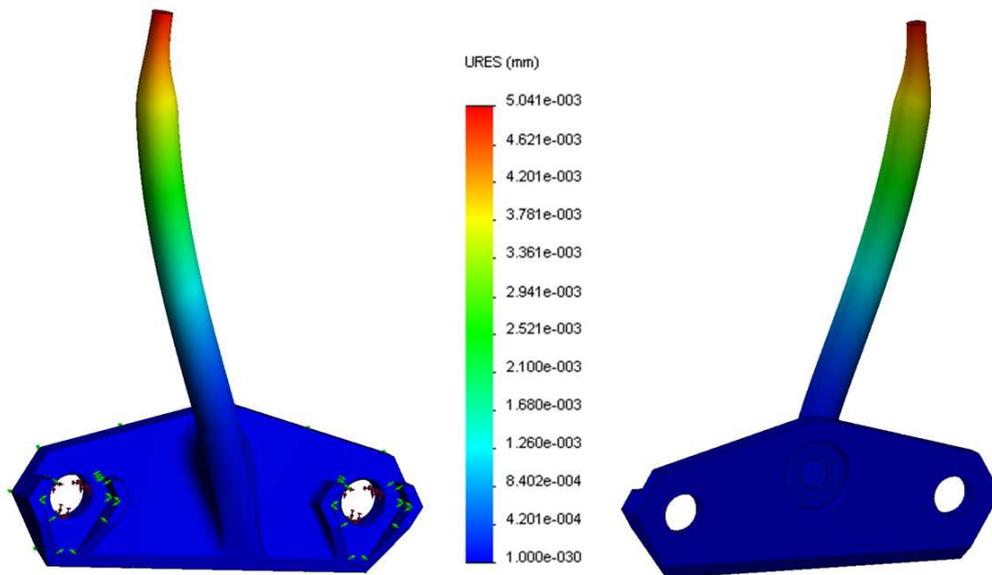


Figura 106. Imágenes de la distribución de desplazamientos en el componente.

▪ **Distribución de Factor de Seguridad:**

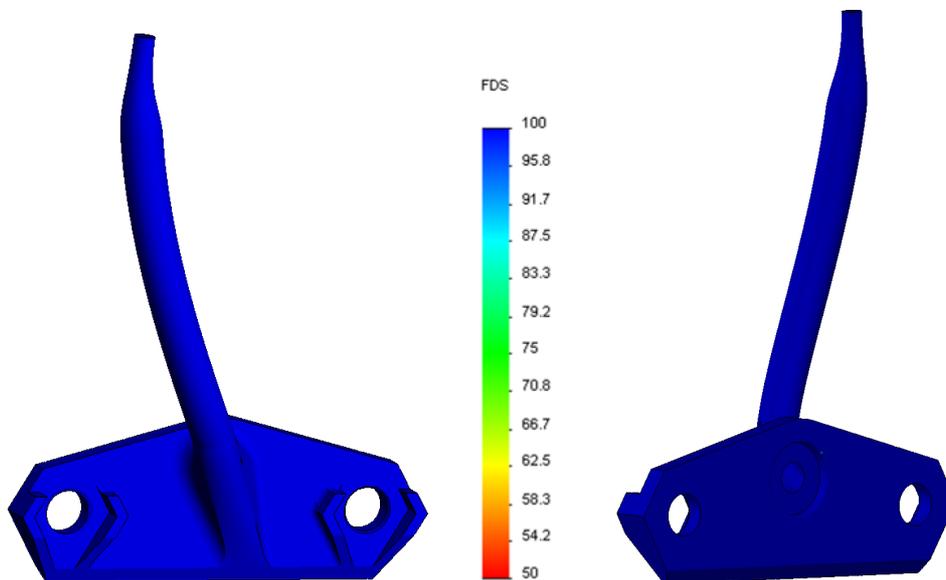


Figura 107. Imágenes de la distribución del Factor de Seguridad en el componente.

Observaciones:

- Se ha reducido el volumen y masa de material en un 68% entre esta propuesta de diseño del componente ($1,31 \text{ cm}^3$ y $10,2 \text{ g}$) y la anterior ($4,086 \text{ cm}^3$ y $31,91 \text{ g}$).
- En la distribución de tensiones de Von Mises puede observarse que este diseño de componente soporta de forma holgada las solicitaciones a las que se encuentra sometido. Prácticamente toda la pieza se encuentra sometida a una tensión entre 1 y 4 MPa, excepto un punto de la entrada que registra el valor máximo de tensión y deformación 6,7 MPa (Figura 108).

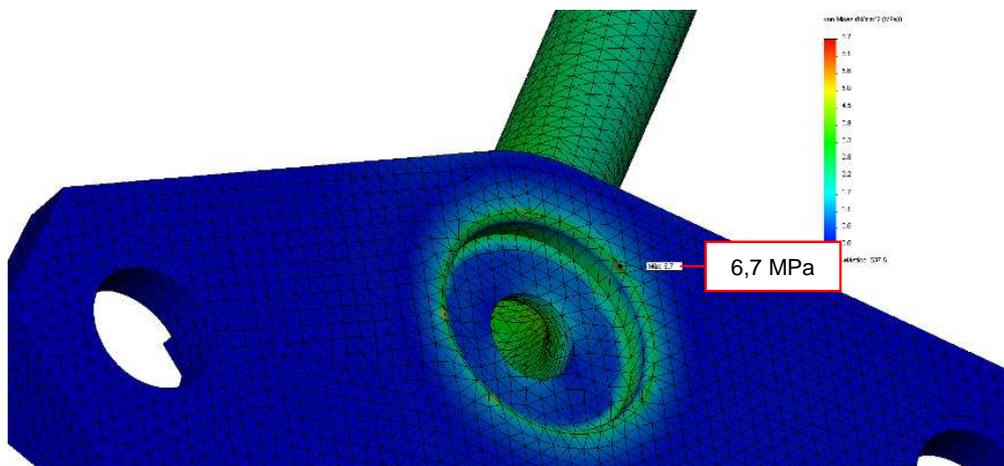


Figura 108. Detalle de la zona del componente inyector de aceite con el máximo nivel de tensiones 6,7 MPa.

- El punto más alto del inyector apenas se desplaza $0,00504 \text{ mm}$, esto se debe a la rigidez del material acero inox 316L.
- La distribución del Factor de Seguridad a lo largo del componente es 50, es decir, el material tendría que soportar 100 veces más tensión para que se produzca la fluencia, en el anterior diseño el menor valor de FDS era 162. Es necesario remarcar que el L.e del material es igual a $537,6 \text{ MPa}$, muy elevado comparado con las cargas a soportar.

3.3.4 Análisis del diseño mediante MEF

Para concluir si el diseño está suficientemente mejorado se han analizado las iso-superficies de tensión en el componente. Haciendo un barrido del rango de tensiones a las que se encuentra sometido el componente pueden visualizarse que volúmenes o zonas del componente se encuentran por encima de un determinado valor de tensión de Von Mises, para las condiciones del cálculo MEF realizado.

Al mismo tiempo el cálculo MEF permite conocer que volumen en % del componente se encuentra sometido al valor de Tensión seleccionado o soportando tensiones superiores (Figura 109).

A continuación se presenta una secuencia de instantáneas donde se ha ido disminuyendo el valor de la tensión para ver qué zonas del componente están trabajando a un determinado valor de Tensión de Von Mises o valores superiores (Figuras 110-123).

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

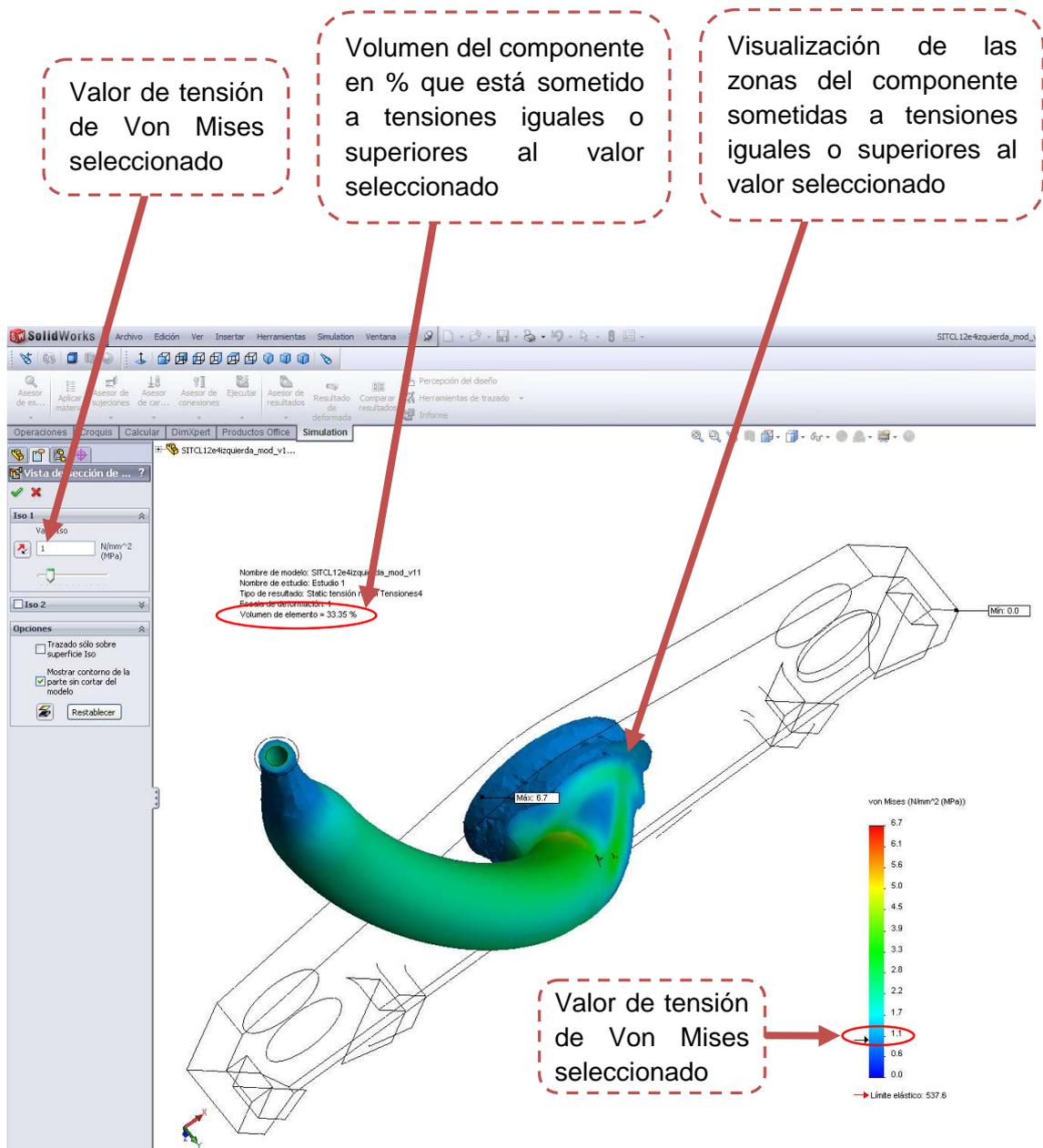


Figura 109. Imagen ejemplo del método empleado para analizar las zonas del componente.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 0.41 %

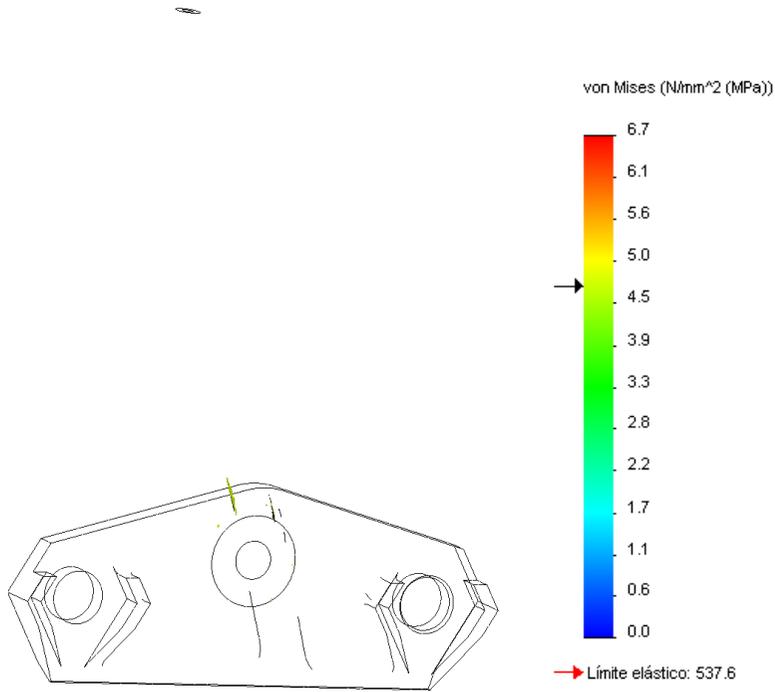


Figura 110. Imagen de la zona del componente sometida a 4.5 MPa.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 8.43 %

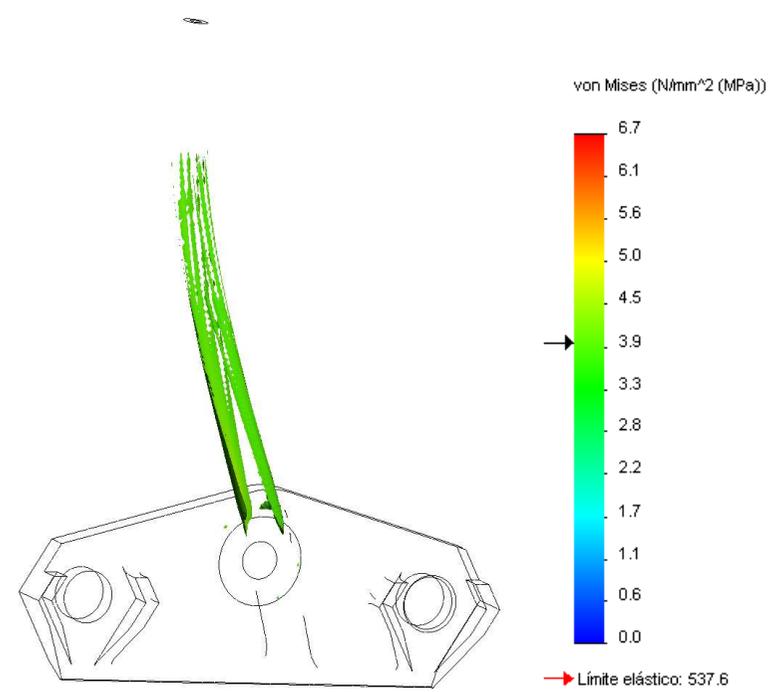


Figura 111. Imagen de las zonas del componente sometidas a 3.95 MPa.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 14.86 %

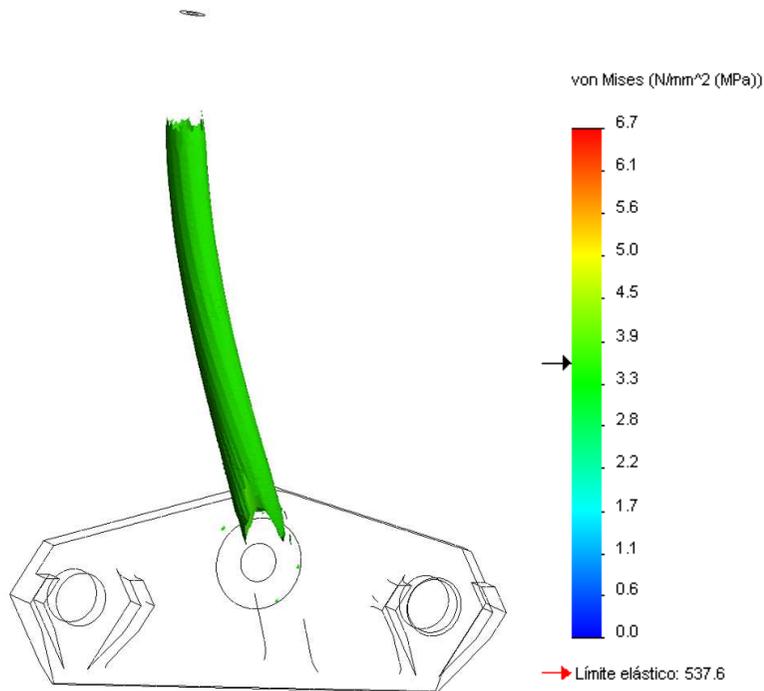


Figura 112. Imagen con zonas del componente sometidas a 3.61 MPa.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 21.75 %

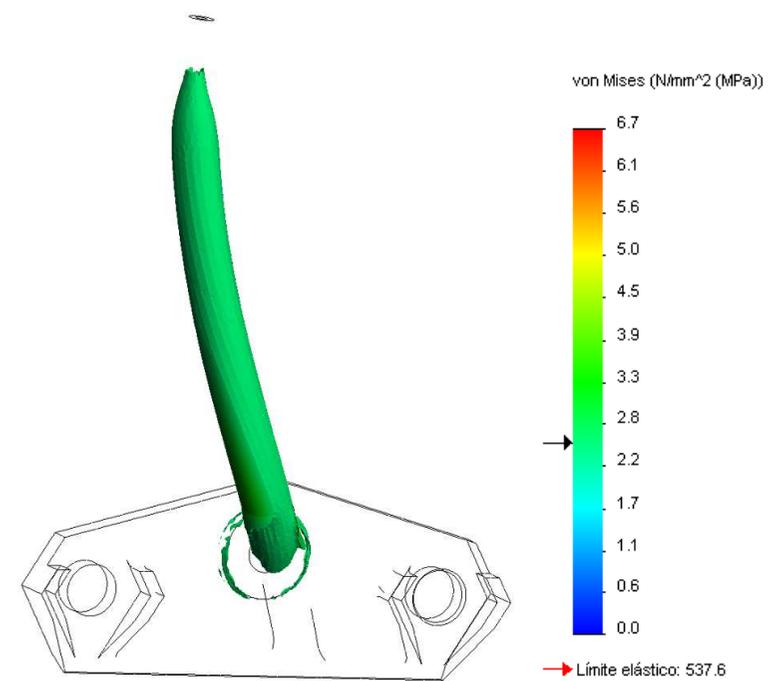


Figura 113. Imagen de las zonas del componente sometidas a 2.54 MPa.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 25.17 %

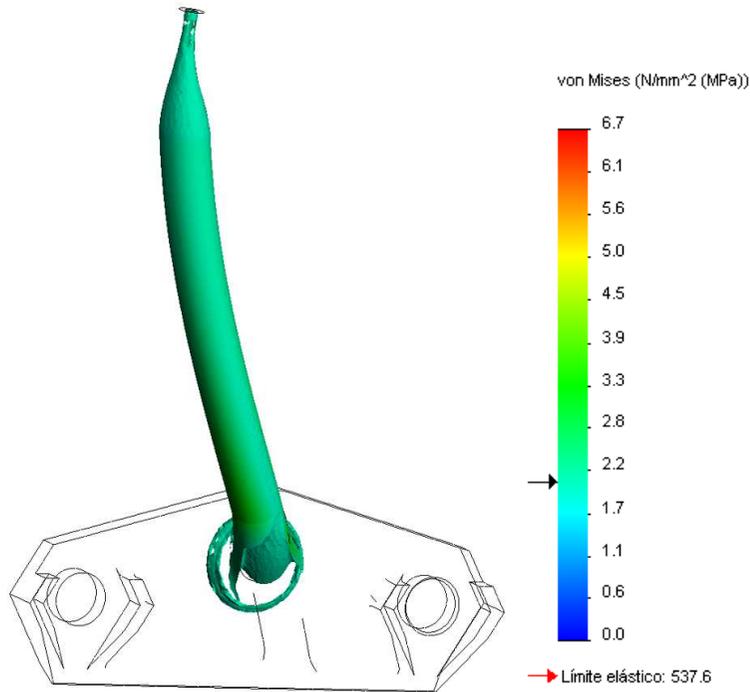


Figura 114. Imagen con zonas del componente a 2.07 MPa.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 30.57 %

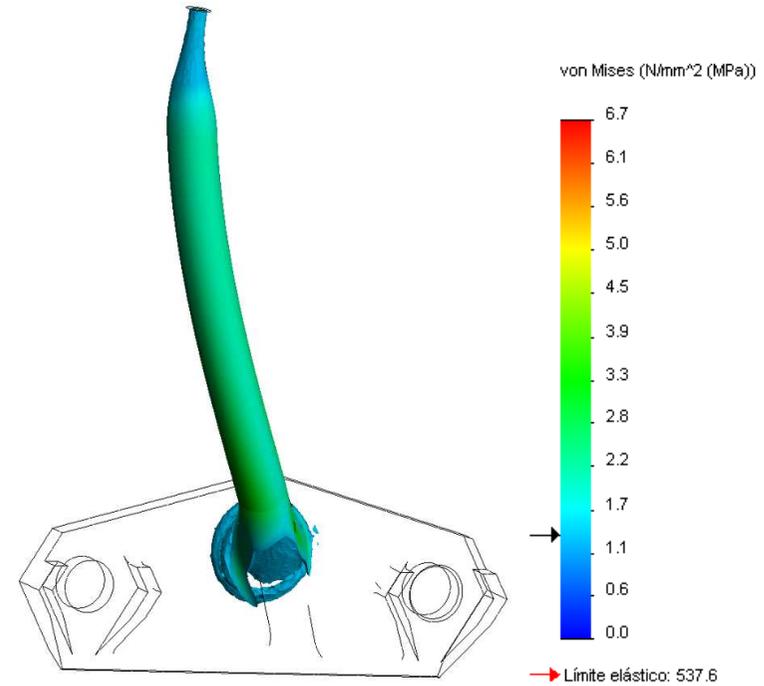


Figura 115. Imagen de la zona del componente sometida a 1.34 MPa.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 36.16 %

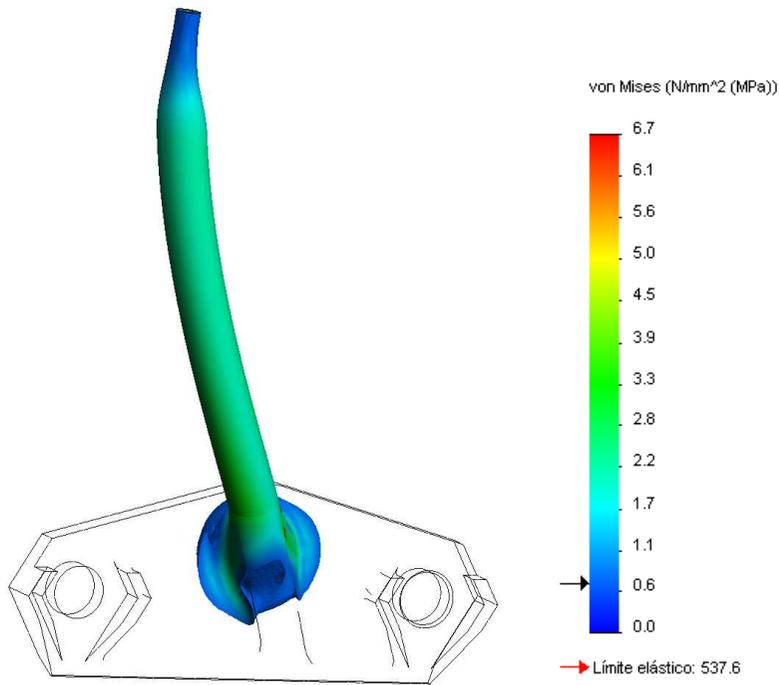


Figura 116. Imagen de las zonas sometidas a 0.67 MPa.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 42.07 %

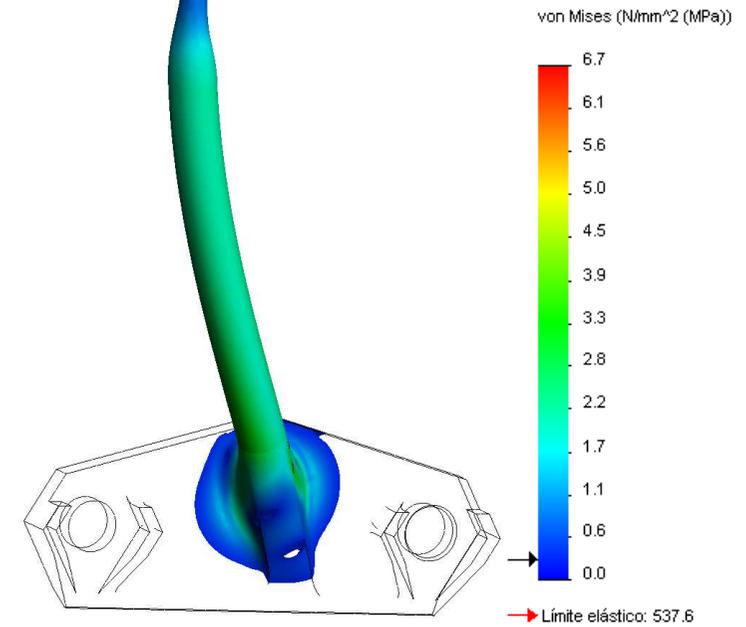


Figura 117. Imagen de las zonas del componente sometidas a 0.27 MPa.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 48.04 %

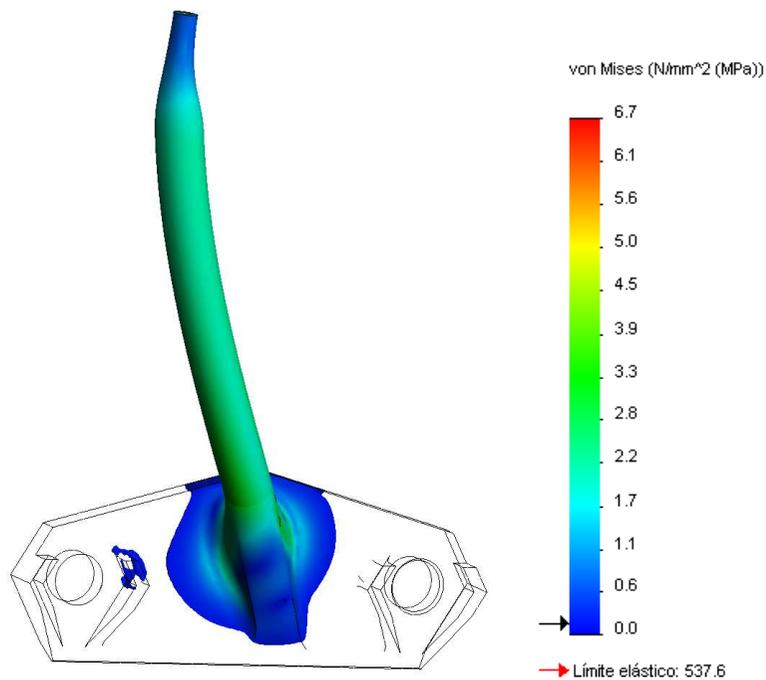


Figura 118. Imagen con zonas sometidas a 0.14 MPa.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 54.52 %

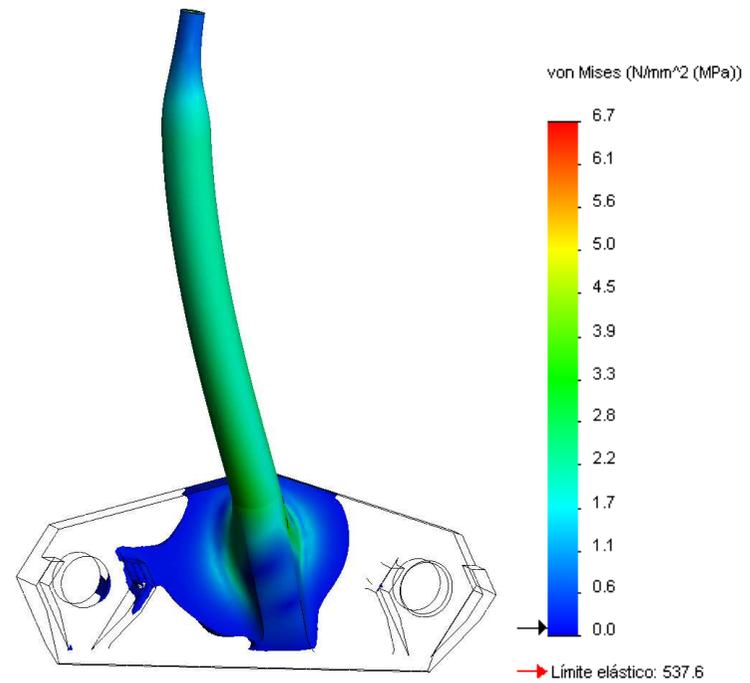


Figura 119. Imagen de las zonas del componente sometidas a 0.1 MPa.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 63.82 %

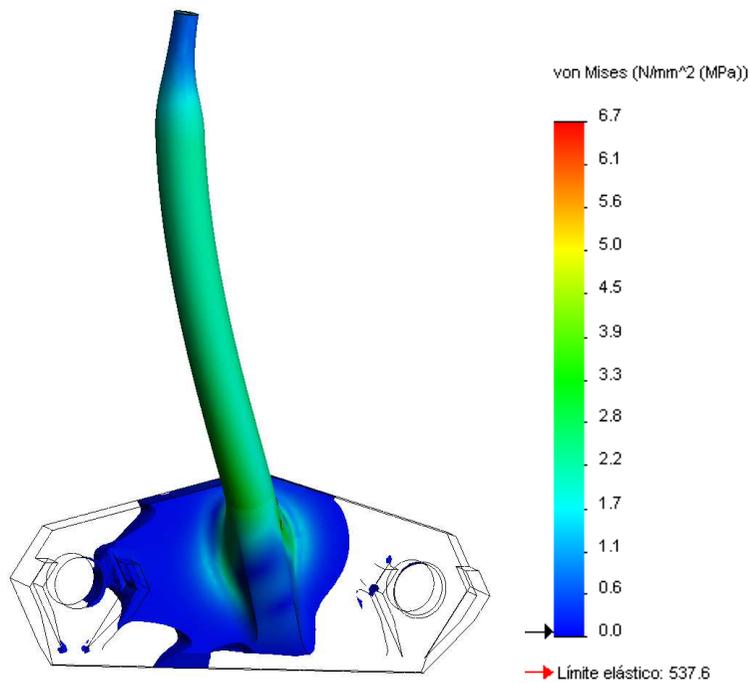


Figura 120. Imagen de las zonas sometidas a 0.07 MPa.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 87.00 %

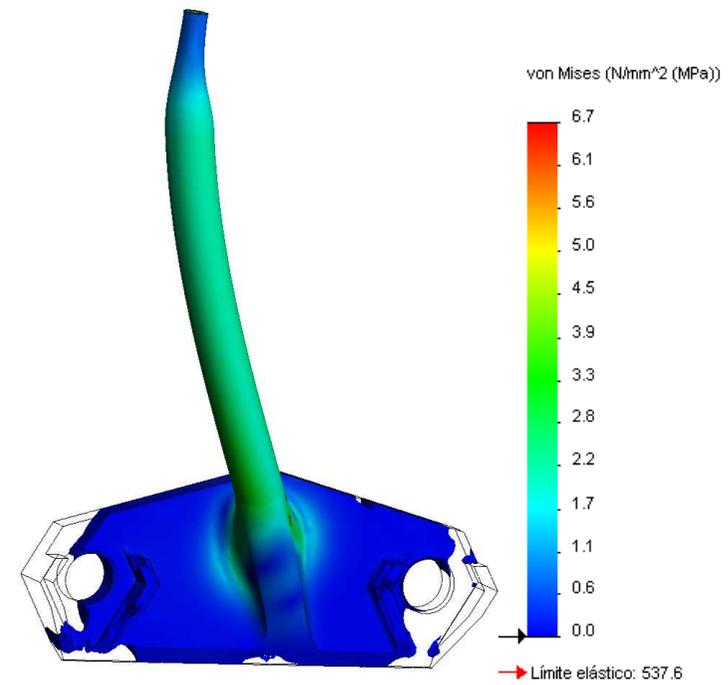


Figura 121. Imagen de las zonas del componente sometidas a 0.02 MPa.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 93.14 %

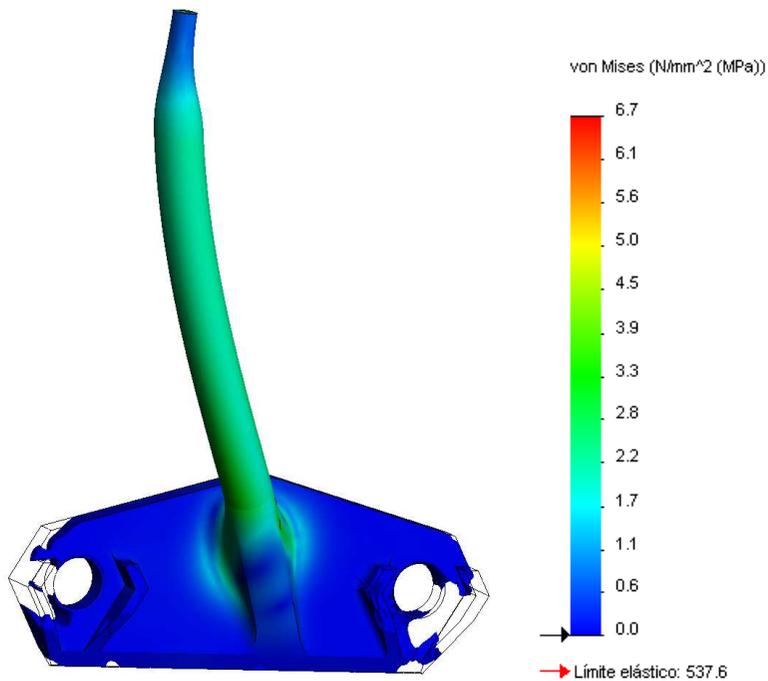


Figura 122. Imagen de las zonas del componente sometidas a 0.01 MPa.

Nombre de modelo: SITCL12e4izquierda_mod_v11
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones4
Escala de deformación: 1
Volumen de elemento = 100.00 %

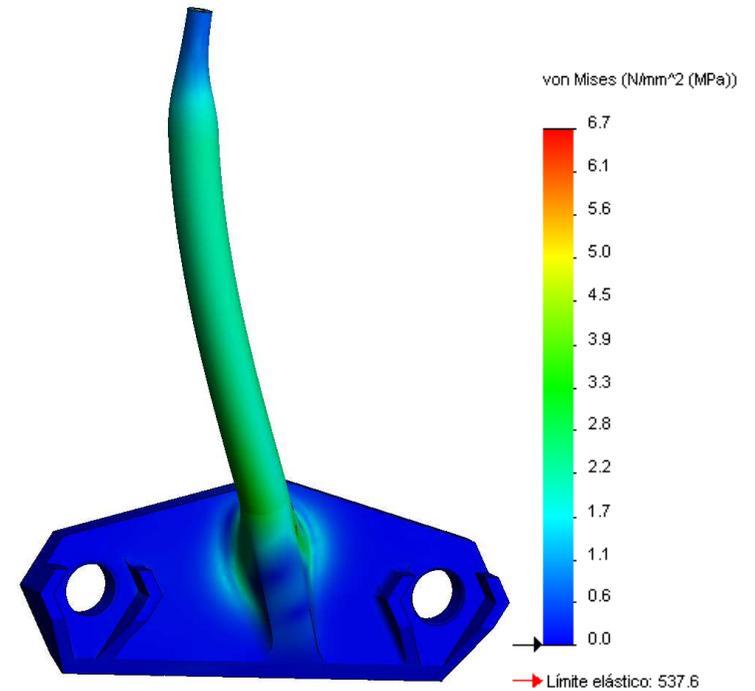


Figura 123. Imagen de las zonas del componente sometidas a 0.0 MPa.

3.3.4.1 Conclusiones obtenidas tras el análisis del diseño y el cálculo estático estructural por MEF

- **Conclusión 1:** Se ha conseguido mejorar la forma y el diseño del componente ya que cumple con las solicitaciones mecánicas y se ha reducido el volumen y masa de material en un 68% entre esta propuesta de diseño del componente ($1,31 \text{ cm}^3$ y $10,2 \text{ g}$) y la anterior ($4,086 \text{ cm}^3$ y $31,91 \text{ g}$).
- **Conclusión 2:** Las tensiones soportadas por el componente han subido ligeramente debido a que se ha eliminado material y reducido espesores pero en el nuevo diseño a diferencia del anterior las tensiones no aparecen en puntos locales (concentradores de tensiones) sino que se reparten uniformemente a lo largo de la geometría gracias a zonas con transiciones suaves, espesores uniformes y redondeos (Figura 124).

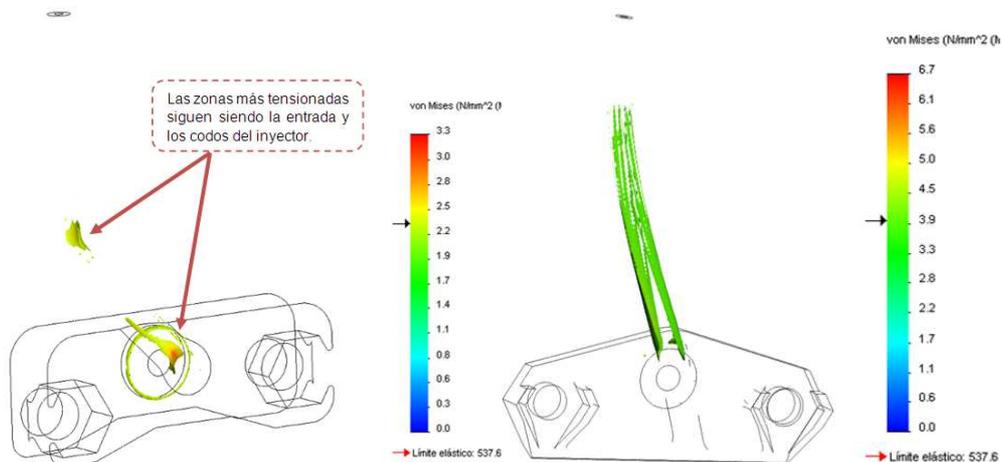


Figura 124. Izquierda, se muestra donde aparecen las primeras tensiones en el diseño anterior. Derecha, se muestra donde aparecen las primeras tensiones en el diseño mejorado.

Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

- **Conclusión 3:** En el diseño del componente mejorado la distribución del Factor de Seguridad a lo largo del componente es 50, es decir, el material tendría que soportar 50 veces más tensión para que se produzca la rotura, en el anterior diseño el menor valor de FDS era 162. Es necesario remarcar que el L.e del material es igual a 537,6 MPa, muy elevado comparado con las cargas a soportar (Figura 125).

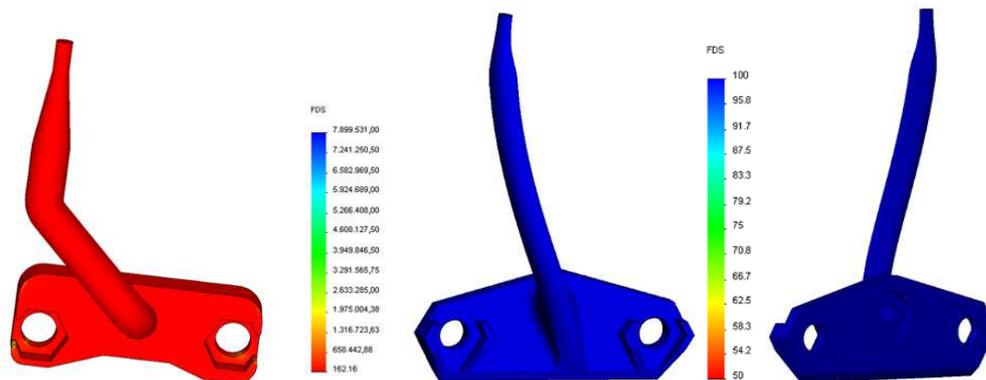


Figura 125. Izquierda, distribución del FDS a lo largo del componente en el diseño anterior. Derecha, FDS en el diseño mejorado.

- **Conclusión 4:** En el anterior diseño del componente el mayor desplazamiento se produce a la salida del aceite siendo 0,0004625. En el diseño mejorado el punto más alto del inyector se desplaza 0,00504 mm unas 10 veces más pero todavía un valor inapreciable a escala real (Figura 126).

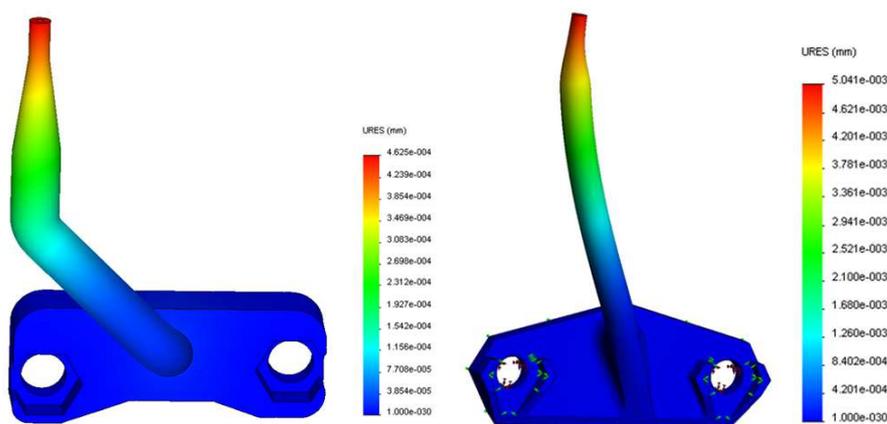


Figura 126. Comparación de los desplazamientos de los diseños del componente actual y anterior.

- **Conclusión 6:** En el diseño mejorado actual podría seguir reduciéndose la cantidad de material puesto que el nivel de tensiones soportado es muy bajo y concretamente algunas zonas cercanas a los alojamientos de los tornillos y tuercas apenas soportan tensiones (Figuras 119-123). Sin embargo reducir los espesores de esta zona ó eliminar más material (por ejemplo mediante agujeros ó ventanas) apenas reduciría la cantidad de material y probablemente influiría de forma negativa en la fabricabilidad del componente (al añadirse más aristas) o podría ser un componente más débil y complejo frente a la manipulación e instalación industrial, aspectos que no son abarcados en este estudio (Figura 127).

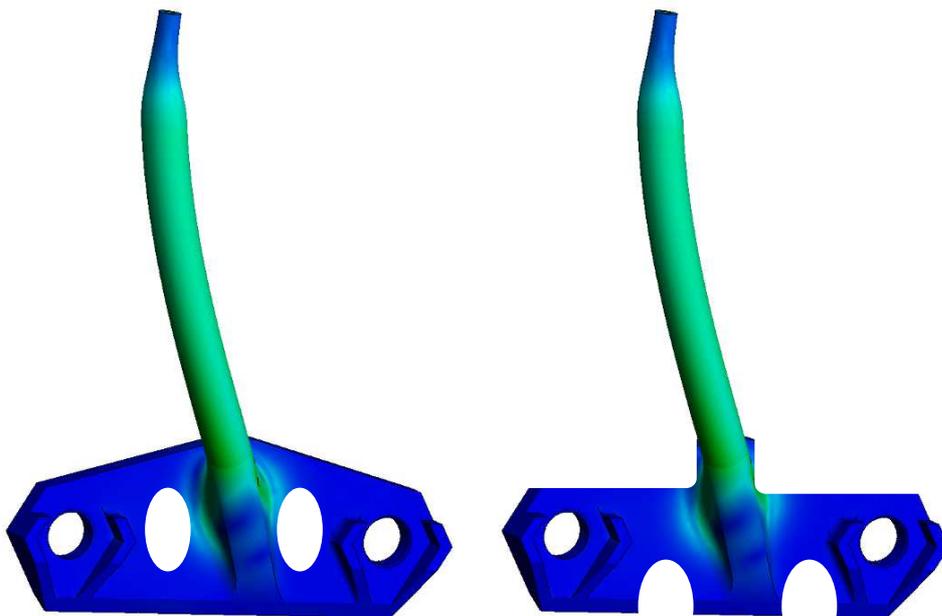


Figura 127. Imágenes con posibles diseños del componente inyector de aceite si continuase el proceso de mejora geométrica.

3.3.5 Análisis de fabricabilidad para SLM

La fabricación por SLM de este diseño del componente no tendría ningún tipo de problema, ya que se ha diseñado teniendo en cuenta las capacidades y restricciones del proceso de fabricación Fusión Selectiva por Laser (SLM) recopilados en la metodología de diseño del apartado 2.5. Durante el proceso de diseño se han tenido en cuenta los siguientes aspectos (Figura 128):

- ① Se ha orientado la geometría 3D de forma que no ha sido necesario añadir soporte o que los agujeros verticales se puedan fabricar (agujeros de los anclajes y entrada del aceite).
- ② La geometría crece desde una sección pequeña, esto facilita la separación de la pieza de la placa base manualmente mediante el empuje de la pieza sobre el eje de conexión a la placa (efecto bisagra).
- ③ Se ha diseñado una curva continua y suave para la canalización del aceite, eliminando el anterior codo a 135°.
- ④ En los alojamientos hexagonales de las tuercas, se han eliminado las caras superiores que hubiesen necesitado de soporte para fabricarse.
- ⑤ Se ha soportado la parte inferior del canal mediante material que sigue una superficie inclinada mayor a 60°, lo que asegura una correcta fabricación y refuerza esta zona de entrada del aceite.
- ⑥ Se han añadido redondeos que mejoran el reparto uniforme del polvo sobre la plataforma de fabricación al eliminar aristas de la geometría en cada capa.
- ⑦ Todas las caras inclinadas se han diseñado con un ángulo mayor a 60° para evitar problemas de fabricación y no añadir soportes.

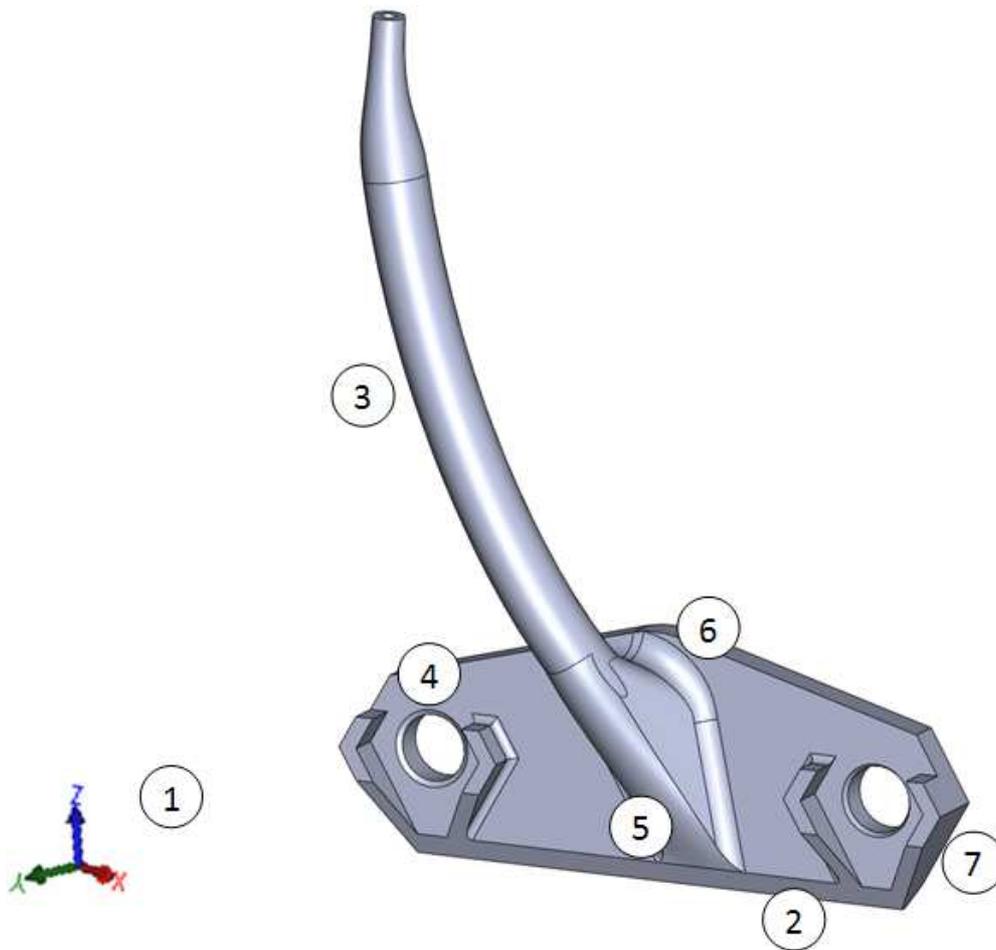


Figura 128. Análisis de fabricabilidad por SLM del diseño mejorado del componente y enumeración de los factores del diseño más influyentes en el proceso de fabricación SLM.

3.3.5.1 Conclusiones obtenidas tras el análisis de fabricabilidad para SLM

Es posible concluir que la geometría obtenida es fabricable por SLM, ya que cumple con las restricciones de fabricación, para el material acero 316LVM, recopiladas en la metodología de diseño del apartado 2.5.

Se debe añadir que, en este caso, mediante el efecto bisagra, que permite la separación manual de la pieza de la placa base de

fabricación, se ha podido disminuir el coste de obtención de la pieza, ya que no es necesario realizar un post-proceso de corte con sierra.

3.3.6 Fabricación mediante fusión selectiva por láser (SLM)

- Se ha fabricado en Acero inox. 316LVM el diseño mejorado con el proceso SLM sin ninguna incidencia de fabricación (Figura 129), por lo tanto se ha validado el análisis de fabricabilidad anterior y la metodología de diseño del apartado 2.5.
- Se ha comprobado el efecto bisagra, mediante un ligero empuje de la pieza se puede separar la pieza construida mediante SLM y soldada a la placa de fabricación, también de acero.

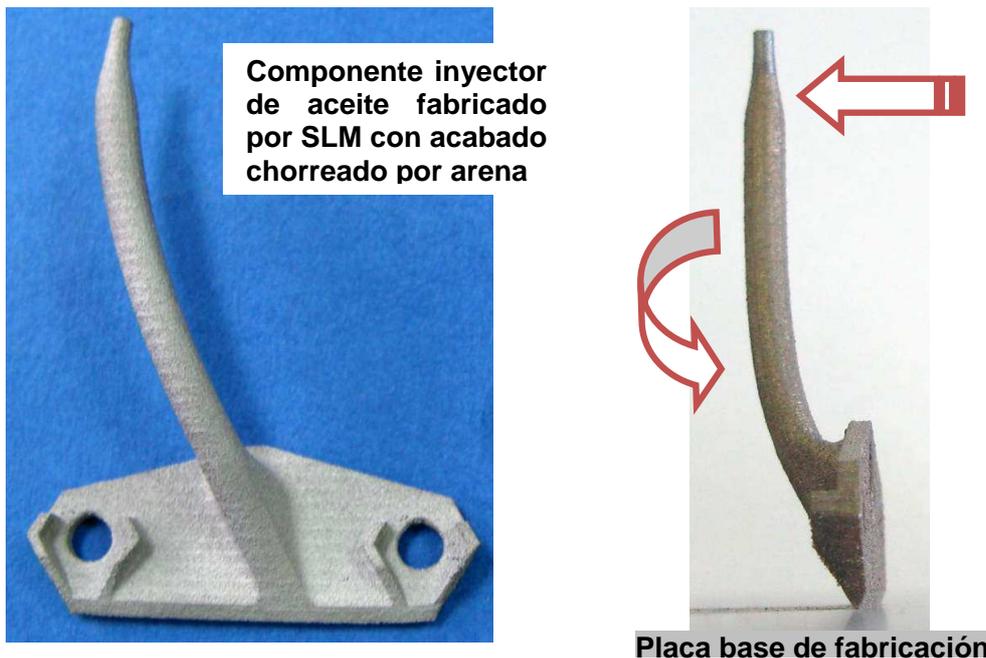


Figura 129. Imagen izquierda, componente inyector de aceite fabricado mediante el proceso SLM con acero inox. 316LVM. Derecha, foto del componente inyector de aceite al salir de máquina todavía soldado a la placa de fabricación.

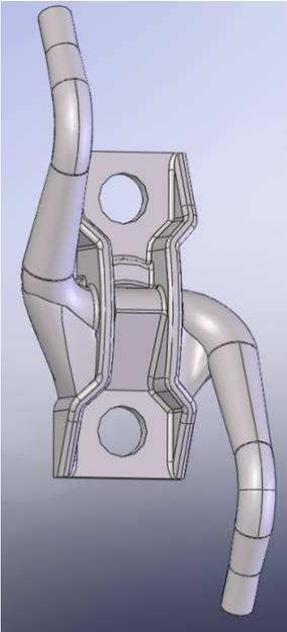
Capítulo 3. Caso práctico. Aplicación de la metodología de diseño a un inyector de aceite.

Aplicando la misma metodología de diseño se han producido otros componentes con diseños mejorados, imposibles de fabricar por otros métodos de fabricación convencionales.



Figura 130. Imagen izquierda, CAD 3D de otro componente inyector de aceite. Centro, componente fabricado mediante el proceso SLM con acero inox. 316LVM. Derecha, foto del componente inyector de aceite separado de la placa y arenado.

**DISEÑO
MEJORADO**



**PIEZAS FABRICADAS POR SLM EN
MÁQUINA**

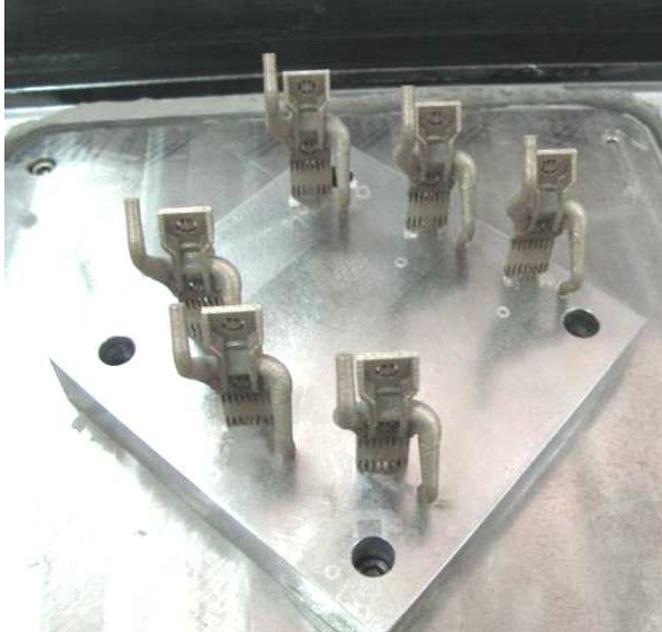


Figura 131. Izquierda, CAD 3D de componente inyector de aceite con 2 brazos. Derecha, imagen con lote de este componente fabricados mediante proceso SLM con acero inox. 316LVM. Notar que en este caso, no se ha podido aplicar el efecto bisagra y se ha necesitado colocar soporte.

4. Conclusiones y discusión

4.1 Conclusiones

En este capítulo se han recogido las conclusiones obtenidas tras el trabajo de investigación y aplicación al caso práctico realizado anteriormente. Las conclusiones obtenidas son:

1. Se ha validado la metodología de diseño optimizado por MEF y para fabricación por SLM.
2. Se han evaluado y caracterizado las propiedades mecánicas del acero inoxidable 316LVM procesado por SLM.
 - Las propiedades mecánicas obtenidas tras el proceso SLM se encuentran en valores intermedios entre el estado Annealed (Recocido) y el estado Cold worked (Trabajo en frío de endurecimiento por acritud). Esto le permite ofrecer unas altas propiedades resistentes sin disminuir excesivamente el alargamiento y la tenacidad del material.
3. Se han evaluado y caracterizado las capacidades y limitaciones del proceso de fabricación aditiva SLM.
 - Se han obtenido unas reglas de diseño con valores mínimos y máximos para la correcta fabricación de elementos sencillos que pueden encontrarse en cualquier pieza o componente industrial
4. La combinación de las herramientas de MEF y las posibilidades de fabricación de las tecnologías aditivas permiten la concepción de una nueva tipología de productos de alto valor añadido, donde el diseño de los componentes es mejorado. Se considera diseño mejorado: aquel que ha sido obtenido a través de un proceso de optimización, como resultado final o intermedio, a fin de cumplir un determinado objetivo (por ejemplo reducir al máximo el peso del componentes) cumpliendo una serie de restricciones (por

ejemplo soportar la carga aplicada sin que se produzca el fallo del mismo). Estos diseños mejorados se consiguen gracias a la interacción entre diseño 3D y la mejora de la geometría del componente atendiendo a los resultados del cálculo MEF.

a. Las ventajas derivadas de la mejora geométrica de componente según calculo MEF:

- *Componentes más eficientes*, al estar diseñados según las solicitaciones a soportar y los requerimientos a cumplir.
 - Es posible uniformizar el factor de seguridad a lo largo de todas las zonas del componente de forma que prácticamente todas fallan al mismo tiempo.
 - Se obtiene un mejor funcionamiento de la pieza, menores inercias debido a una menor cantidad de material, desaparición ó reducción de concentradores de tensiones, etc.
- *Productos más ligeros y Ahorro de material*. Los componentes pueden ser más ligeros debido a que no están sobredimensionados, la geometría de los productos es más cercana al óptimo y por tanto es posible ahorrar material.
- Es posible *diseñar componentes con distintos comportamientos con un mismo material* al incluir zonas rígidas (más reforzadas) y zonas flexibles, con menor rigidez (más aligeradas). Al mismo tiempo, es posible obtener geometrías mejoradas, cercanas al optimo, de forma que se utilice una menor cantidad de material pero para esto es necesario utilizar técnicas computacionales de mejora basado en cálculos MEF, atendiendo a las solicitaciones y

condiciones de contorno aplicadas a la geometría. En este sentido la optimización topológica sería una herramienta adecuada para ser utilizada en el contexto de la optimización de componentes a fabricar mediante técnicas de fabricación aditivas.

- *Reducción de costes relacionados con el consumo de material.* Actualmente, el material utilizado en Fabricación Aditiva tiene un coste alto, un uso racional u optimizado permite ofrecer productos más competitivos al mercado.
- *Reducción de tiempos de fabricación.* En las tecnologías de FA se procesa principalmente el material que forma la pieza, por tanto el procesado de la mínima cantidad de material (geometría componente optimizada) implica que los tiempos de procesado son reducidos al mínimo, es decir optimizados. En contraposición con los procesos convencionales, por ejemplo en mecanizado: donde cuanto más compleja sea la pieza, necesitará un mayor número de montajes y de operaciones de fresado, es decir, mayor tiempo de fabricación que finalmente se repercutirán en el coste de producción de la pieza.

b. Ventajas derivadas del proceso de Fabricación Aditiva SLM son:

- Las tecnologías de FA y en concreto SLM, permiten fabricar componentes con facilidad, dado que el proceso de fabricación casi no impone restricciones geométricas. Pudiendo obtenerse:
 - Piezas y componentes huecos.
 - Piezas y componentes con formas orgánicas y redondeadas (sin superficies planas ó rectas).

- Piezas con conducciones o canales prácticamente con cualquier forma, ramificación ó transición entre ellas (Figuras 129 a 131).
- *SLM prácticamente no condiciona la geometría del producto*, permitiendo la fabricación de la geometría de productos optimizados topológicamente según las solicitaciones de funcionamiento. Las limitaciones de los procesos de fabricación convencionales (*mecanizado, forja, inyección, etc.*) pueden terminar condicionando la geometría del producto para que sea fabricable, aunque no aporten ningún valor añadido a su funcionalidad, incluso pueden llegar a reducirla, por ejemplo aumentando su peso.
- *Reducción del tiempo necesario de puesta en el mercado* para productos personalizados (Time-to-market reduction). Debido a que se tratan de procesos de fabricación directos desde el fichero CAD 3D, sin la necesidad de fabricar utillajes específicos previamente al producto personalizado como ocurre en los procesos convencionales de fabricación.
- Permite que sea *económicamente viable la fabricación de series cortas ó únicas* de componentes (Figura 131), ya que no es necesaria la inversión inicial en la fabricación de utillajes para poder empezar con la producción, fabricación directa desde el fichero CAD 3D.
- Permite *la producción de piezas distintas en la misma bandeja de fabricación*, es decir, todas las piezas pueden ser completamente distintas (diferentes modelos 3D) ó pueden ser la misma pieza con distintas configuraciones. Pese a la complejidad de este lote personalizado, el coste de producción es proporcional a la cantidad de material procesado.

Como conclusión final, es recomendable la combinación de la mejora geométrica (basada en cálculos MEF) para el diseño de productos con la fabricación aditiva para producir productos más eficientes, ligeros, con características especiales, reduciendo su coste y tiempo de fabricación. Ambas se complementan perfectamente, ya que las tecnologías FA permiten la fabricación de la geometría mejorada cercana al óptimo (mediante procesos convencionales de fabricación sería imposible o económicamente inviable) y la mejora de forma de componentes atendiendo a los resultados de cálculos MEF permite diseñar productos de alto valor añadido con una cantidad de material cercana al óptimo, lo que hace económicamente viable el uso de la fabricación aditiva, al reducirse los costes y tiempos de procesado.

4.2 Discusión

Se ha concluido que la mejora de forma de componentes según cálculos MEF y las tecnologías FA se complementan perfectamente permitiendo obtener productos con geometría cercana a la óptima según las solicitaciones a soportar. En este trabajo de investigación se ha desarrollado una metodología de diseño óptimo de componentes personalizada para el proceso de fabricación aditiva SLM (Fusión Selectiva por Laser) con el material Acero inox. 316LVM pero esta podría hacerse extensiva a otros materiales y al resto de tecnologías de FA teniendo en cuenta las peculiaridades de cada una de ellas. Para ello, básicamente se debería reproducir el trabajo realizado en el capítulo 2, siguiendo estos pasos:

1. *Apartado 2.2 Restricciones de fabricación* se prueban las capacidades y limitaciones mediante la fabricación de geometrías sencillas con distintos tamaños.
2. *Apartado 2.3 Restricciones de diseño* se analizan los resultados anteriores y se traducen a reglas de diseño para poder modificar la geometría con criterios fiables de fabricabilidad.

3. *Apartado 2.4 Restricciones del material* para evaluar sus propiedades y poder utilizarlas en el cálculo MEF, de esta forma se dimensionará de forma segura el componente.

Comentar que dependiendo del componente y su aplicación, del material y/o de la tecnología de FA, es posible que sea necesario algún paso o comprobación adicional al desarrollado en el capítulo 2 de esta tesis, por ejemplo existen materiales procesados por FA donde es recomendable un tratamiento térmico de endurecimiento (Acero Maraging DIN 1.2709, tecnología SLM) ó un tratamiento térmico de alivio de tensiones Aleación CoCr ASTM F75, tecnología EBM).

Otro aspecto a destacar es que estas tecnologías de Fabricación Aditiva son relativamente recientes por lo que se están produciendo mejoras en resolución, espesor de capa, velocidad de proceso, etc. prácticamente cada año. Por tanto la metodología desarrollada debe ser actualizada según los avances producidos, puesto que estos previsiblemente mejorarán las capacidades y disminuirán las limitaciones de los procesos de FA.

El desarrollo de esta metodología de diseño óptimo para fabricación de componentes mediante tecnologías aditivas demuestra las posibilidades del diseño basado en cálculos MEF. Esta metodología podría tomarse como punto de partida para la implementación, en programas de modelado mecánico 3D, con modulo de cálculo MEF, que permitiría al usuario interactuar entre los resultados obtenidos por el cálculo MEF y la modificación de la geometría del componente.