

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Estudio numérico para la fabricación aditiva de un
componente optimizado topológicamente

Autor: Carlos García Mora

Tutor: Carpóforo Vallellano Martín

Dpto. Ingeniería Mecánica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Estudio numérico para la fabricación aditiva de un componente optimizado topológicamente

Autor:

Carlos García Mora

Tutor:

Carpóforo Vallellano Martín

Catedrático

Dpto. Ingeniería Mecánica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Proyecto Fin de Carrera: Estudio numérico para la fabricación aditiva de un componente optimizado topológicamente

Autor: Carlos García Mora

Tutor: Carpóforo Vallellano Martín

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En un proyecto tan trascendente en mi etapa universitaria y que abarca un largo periodo de tiempo, son muchas las personas que contribuyen a que éste salga delante de la mejor manera posible, tanto desde el punto de vista técnico como moral.

Es por ello por lo que me gustaría agradecer en primer lugar a mi tutor Carpóforo su orientación y ayuda en el transcurso del proyecto. Así como a Gorka Ibáñez, la resolución de todas las dudas relacionadas con los softwares desde el servicio técnico del grupo HEXAGON. Desde el punto de vista personal, agradecer a mi familia y amigos más cercanos su apoyo incondicional en todas las fases del proyecto.

A mi M.A.

Resumen

La optimización topológica, desde sus orígenes hasta fechas muy cercanas a la actualidad, ha sido tratada como un proceso conceptual y teórico con el que se conseguían diseños de estructuras y sólidos que requerían una menor utilización de material pero que, debido a su compleja geometría, estos diseños no se podían llevar a la realidad.

El desarrollo de nuevas técnicas de fabricación tales como la fabricación aditiva y la impresión 3D han abierto un campo de investigación para llevar a cabo la manufactura de dichos diseños complejos que hasta hace poco tiempo eran conceptuales. Este hecho, sumado al crecimiento exponencial de herramientas informáticas capaces de simular estas nuevas técnicas, ha contribuido a mejorar la fase de diseño de estructuras y sólidos ya que se podrían conocer los resultados que se obtendrían partiendo de unas condiciones determinadas. En este proyecto se llevará a cabo ese estudio numérico previo a la fabricación real de una pieza que ha sido optimizada topológicamente, en el cuál se incluye un análisis de la influencia de los parámetros del proceso de fabricación SLM considerados más determinantes, un análisis de los postratamientos que habría que realizar para mejorar los resultados obtenidos directamente de la fabricación y un análisis de la integridad estructural de la pieza tras la fabricación para verificar su funcionalidad. Todas las decisiones que se han tomado en el desarrollo del proyecto han ido en vías de conseguir dicha integridad estructural.

Abstract

Topological optimisation, from its origins until very close to the present day, has been treated as a conceptual and theoretical process with which designs of structures and solids were achieved that required less use of material but that, due to their complex geometry, these designs could not be put into practice.

The development of new manufacturing techniques such as additive manufacturing and 3D printing has opened up a field of research to carry out the manufacture of such complex designs that until recently were conceptual. This fact, added to the exponential growth of computer tools capable of simulating these new techniques, has contributed to improving the design phase of structures and solids, as the results that would be obtained under certain conditions could be known. In this project, this numerical study will be carried out prior to the actual manufacture of a solid that has been topologically optimised, which includes an analysis of the influence of the SLM manufacturing process parameters considered most decisive, an analysis of the post-treatments that would have to be carried out to improve the results obtained directly from the manufacture and an analysis of the structural integrity of the part after manufacture to verify its functionality. All the decisions taken in the development of the project have been aimed at achieving this structural integrity.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xii
Índice de Tablas	xiv
Índice de Figuras	xvi
1 INTRODUCCIÓN A LA OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA	1
1.1. Contextualización	1
1.2. Optimización topológica	1
1.3. Fundamento matemático de la optimización topológica	3
1.4. La mangueta	9
1.5. Alcance del proyecto	10
2 MÉTODO DE FABRICACIÓN	11
2.1. Introducción	11
2.2. Optimización topológica en fabricación aditiva	12
2.3. Selective Laser Melting (SLM)	12
2.3.1 Ventajas de SLM	14
2.3.2 Inconvenientes del SLM	14
2.3.3 Materiales empleados en SLM	15
2.3.4. Aplicaciones	15
2.4. Parámetros del proceso de fabricación SLM	16
2.5. Posprocesado	18
3 EL SOFTWARE SIMUFACT ADDITIVE	21
3.1. Introducción	21
3.2. Funcionalidad de Simufact Additive	21
3.3. Interfaz de Simufact Additive	23
3.3.1. Aplicación del proceso	24
3.3.2. Aplicación de la máquina	24
3.3.3. Aplicación de fabricación y optimización	25
3.3.4. Aplicación de análisis	32

3.3.5. Aplicación de resultados	33
4 FABRICACIÓN DE LA MANGUETA	35
4.1. <i>Primera iteración</i>	35
4.1.1. Definición de la máquina	35
4.1.2. Importación del sólido	36
4.1.3. Creación de los soportes	36
4.1.4. Elección del material	37
4.1.5. Definición de los parámetros de fabricación	38
4.1.6. Definición de los parámetros del proceso de corte	40
4.1.7. Definición del proceso de eliminación de soportes	40
4.1.8. Definición de los mallados	40
4.1.9. Análisis de los resultados	41
4.2. <i>Estudio de la influencia de los parámetros de fabricación sobre los resultados</i>	43
4.2.1. Influencia de la estrategia de escaneo	43
4.2.2. Influencia de la longitud de escaneo	44
4.2.3. Influencia de la temperatura inicial	45
5 POSTRATAMIENTOS	49
5.1. <i>Tratamiento térmico de recocido</i>	49
5.2. <i>Definición de la ley de fluencia</i>	50
5.3. <i>Aplicación del tratamiento térmico a la pieza</i>	51
5.3.1. Tratamiento térmico para la pieza fabricada con $T_i = 300 \text{ }^\circ\text{C}$	59
5.4. <i>HIP</i>	60
6 ESTUDIO MECÁNICO DE LA PIEZA RESULTANTE	63
6.1. <i>Exportación de datos a Marc MENTAT</i>	63
6.2. <i>Aplicación de cargas</i>	64
6.2.1. Hipótesis 1: Paso por curva	64
6.2.2. Hipótesis 2: Frenada hasta la detención	65
6.3. <i>Estudio en Marc MENTAT</i>	65
7 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	71
7.1. <i>Conclusiones</i>	71
7.2. <i>Desarrollos futuros</i>	73
BIBLIOGRAFÍA	75

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 5-1. Velocidad de deformación en función de T</i>	51
<i>Tabla 5-2. Resultados caso 1 análisis</i>	52
<i>Tabla 5-3. Resultados del segundo caso para 520 °C</i>	54
<i>Tabla 5-4. Resultados del segundo caso para 400 °C</i>	56
<i>Tabla 5-5. Comparación de los tratamientos óptimos del segundo caso</i>	57
<i>Tabla 5-6. Resultados del tercer caso para 520 °C</i>	58
<i>Tabla 5-7. Resultados del tercer caso para 400 °C</i>	58
<i>Tabla 5-8. Comparación de las tensiones residuales</i>	59

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1-1. Optimización de la topología [18]</i>	2
<i>Figura 1-2. Optimización viga biapoyada [20]</i>	2
<i>Figura 1-3. Viga en voladizo con una carga P aplicada en el centro de su extremo</i>	3
<i>Figura 1-4. Solución óptima discretizando el dominio del sólido [9]</i>	5
<i>Figura 1-5. Resultado de aplicar el método de relajación</i>	5
<i>Figura 1-6. Campo de actuación del filtro de paso bajo [9]</i>	7
<i>Figura 1-7. Actuación del filtro de paso bajo [9]</i>	7
<i>Figura 1-8. Influencia en la topología de la estructura de N y r [3]</i>	8
<i>Figura 1-9. Geometría de la mangueta [11]</i>	9
<i>Figura 1-10. Geometría optimizada de la mangueta [11]</i>	10
<i>Figura 2-1. Flujo de trabajo en fabricación aditiva [19]</i>	12
<i>Figura 2-2. Esquema de una máquina SLM [13]</i>	13
<i>Figura 2-3. Estrategia de escaneo [29]</i>	17
<i>Figura 3-1. Etapas del estudio del proceso de fabricación [14]</i>	22
<i>Figura 3-2. Interfaz principal Simufact Additive [14]</i>	23
<i>Figura 3-3. Aplicación del proceso Simufact Additive</i>	24
<i>Figura 3-4. Aplicación de la máquina Simufact Additive</i>	24
<i>Figura 3-5. Machine parameters</i>	25
<i>Figura 3-6. Aplicación de fabricación y optimización</i>	26
<i>Figura 3-7. Compensación de la distorsión</i>	26
<i>Figura 3-8. Propiedades del proceso</i>	27
<i>Figura 3-9. Parámetros de fabricación</i>	28
<i>Figura 3-10. Estrategia de escaneo</i>	28
<i>Figura 3-11. Parámetros térmicos</i>	29
<i>Figura 3-12. Parámetros de post fabricación</i>	30
<i>Figura 3-13. Fase de corte</i>	30
<i>Figura 3-14. Fase de eliminación de soportes.</i>	31
<i>Figura 3-15. Fase de tratamiento térmico</i>	31

<i>Figura 3-16. Fase HIP</i>	32
<i>Figura 3-17. Aplicación del análisis</i>	33
<i>Figura 4-1. Características técnicas SLM Solutions 280HL [31]</i>	35
<i>Figura 4-2. Soportes del sólido</i>	36
<i>Figura 4-3. Propiedades del acero al carbono fundido [11]</i>	37
<i>Figura 4-4. Curva coeficiente de transmisión de calor</i>	39
<i>Figura 4-5. Mallado con elementos Voxel</i>	40
<i>Figura 4-6. Deformación elástica</i>	41
<i>Figura 4-7. Deformación plástica</i>	41
<i>Figura 4-8. Densidad relativa</i>	42
<i>Figura 4-9. Desplazamientos totales</i>	42
<i>Figura 4-10. Desviación de la superficie</i>	42
<i>Figura 4-11. Flujo térmico</i>	42
<i>Figura 4-12. Temperatura</i>	42
<i>Figura 4-13. Tensiones residuales</i>	42
<i>Figura 4-14. Estrategia de escaneo unidireccional</i>	43
<i>Figura 4-15. Tensiones residuales estrategia escaneo</i>	43
<i>Figura 4-16. Desplazamientos estrategia escaneo</i>	43
<i>Figura 4-17. Tensiones residuales longitud escaneo S1</i>	44
<i>Figura 4-18. Tensiones residuales longitud escaneo S2</i>	44
<i>Figura 4-19. Tensiones residuales temperatura inicial</i>	45
<i>Figura 4-20. Desplazamientos totales temperatura inicial</i>	45
<i>Figura 4-21. Tensiones residuales velocidad escaneo</i>	46
<i>Figura 4-22. Desplazamientos totales velocidad escaneo</i>	46
<i>Figura 4-23. Tensiones residuales potencia</i>	46
<i>Figura 4-24. Desplazamientos totales potencia láser</i>	46
<i>Figura 4-25. Tensiones residuales P y v</i>	47
<i>Figura 4-26. Desplazamientos totales P y v</i>	47
<i>Figura 5-1. Diagrama ϵ-t [12]</i>	50
<i>Figura 5-2. Tratamientos térmicos primer caso</i>	52
<i>Figura 5-3. Resultados caso 1 análisis</i>	52
<i>Figura 5-4. Tratamientos térmicos variando el calentamiento para 520 °C</i>	53
<i>Figura 5-5. Tratamientos térmicos variando el enfriamiento para 520 °C</i>	54
<i>Figura 5-6. Resultados obtenidos para el segundo caso a 520°C</i>	54
<i>Figura 5-7. Tratamientos térmicos variando el calentamiento para 400 °C</i>	55
<i>Figura 5-8. Tratamientos térmicos variando el enfriamiento para 400 °C</i>	55
<i>Figura 5-9. Resultados obtenidos para el segundo caso a 400°C</i>	56
<i>Figura 5-10. Tratamientos térmicos variando el tiempo isoterma para 520 °C</i>	57
<i>Figura 5-11. Tratamientos térmicos variando el tiempo isoterma para 400 °C</i>	57

<i>Figura 5-12. Resultados obtenidos para el tercer caso</i>	58
<i>Figura 5-13. Tratamiento térmico elegido</i>	60
<i>Figura 5-14. Resultados en tensiones residuales tras tratamiento óptimo</i>	60
<i>Figura 6-1. Exportación de la malla UNV</i>	63
<i>Figura 6-2. Hipótesis paso por curva [11]</i>	64
<i>Figura 6-3. Hipótesis frenada hasta la detención [11]</i>	65
<i>Figura 6-4. F_z paso por curva</i>	66
<i>Figura 6-5. F_y paso por curva</i>	66
<i>Figura 6-6. $F_{dirección}$ paso por curva</i>	66
<i>Figura 6-7. Momentos paso por curva</i>	66
<i>Figura 6-8. $F_{mordaza}$ frenada hasta detención</i>	66
<i>Figura 6-9. F_z frenada hasta detención</i>	66
<i>Figura 6-10. F_x frenada hasta detención</i>	67
<i>Figura 6-11. Momentos frenada hasta detención</i>	67
<i>Figura 6-12. Empotramiento</i>	67
<i>Figura 6-13. Apoyo simple</i>	67
<i>Figura 6-14. Von Mises giro de dirección en estático</i>	68
<i>Figura 6-15. Von Mises paso por curva</i>	68
<i>Figura 6-16. Von Mises frenada hasta la detención</i>	69
<i>Figura 6-17. Von Mises todos los casos juntos</i>	69
<i>Figura 7-1. Tratamiento térmico en el diagrama TTT</i>	71
<i>Figura 7-2. Estudio mecánico tras optimización topológica [11]</i>	72

1 INTRODUCCIÓN A LA OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

1.1. Contextualización

En el campo de la ingeniería siempre se ha tratado de buscar soluciones a diferentes problemas de manera que esta solución sea lo más eficiente posible teniendo en cuenta que se parte de unos recursos limitados. En otras palabras, se puede decir que la ingeniería siempre ha buscado optimizar las soluciones dadas a los problemas que se le presentan.

La optimización de soluciones es especialmente buscada en la rama de la ingeniería mecánica, aeronáutica y de estructuras. En todas estas ramas se busca reducir el peso y el coste del material con el que se fabrican diferentes piezas implementadas en automóviles, aviones o edificios. Sin embargo, la reducción de material no puede realizarse de una manera arbitraria puesto que las piezas deben ser capaces de seguir cumpliendo con las funciones para las que han sido diseñadas.

A. Michell fue uno de los primeros investigadores que sentó las bases de lo que hoy en día se conoce como optimización estructural. En su trabajo [21] en 1904 fue capaz de llegar a condiciones de optimalidad para estructuras con geometrías sencillas por medio de arcos y cerchas. Michell partía de unas solicitaciones de cargas conocidas en la estructura para la cual se obtenía el mínimo peso. Cada una de las secciones de la estructura estaba sometida a unas tensiones situadas en el límite de las tensiones de seguridad. Debido a la complejidad matemática y a la presencia de más de una solución óptima, el trabajo de Michell solo era aplicable a estructuras sometidas a cargas puntuales y geometrías sencillas.

Es a partir de 1960 cuando, de la mano de Schmit, L.A. [24], se empiezan a implementar la resolución de los problemas de optimización por medio de método sistemáticos. Pero, es en 1988 cuando Bendsøe y Kikuchi [4] cambia la forma de tratar el problema de la optimización al trabajar con la teoría de homogenización de ecuaciones en derivadas parciales y con los fundamentos matemáticos en los que se basa esta teoría. La forma de tratar los problemas de optimización tal y como se conoce en la actualidad, tiene su principal origen en este trabajo de Bendsøe y Kikuchi.

1.2. Optimización topológica

“El propósito de la optimización topológica es encontrar el diseño óptimo de una estructura dentro de una región específica” Bendsøe & Sigmund [6].

La optimización topológica es un proceso matemático que tiene como objetivo encontrar el diseño óptimo de una estructura o de un sólido dentro de un dominio de diseño, el cual, equivale a la región del espacio ocupada por el sólido. Para ello, se determinará el número, la localización y la forma de las zonas vacías en el interior del dominio de diseño, tal y como se muestra en la Figura 1-1.

Para encontrar este diseño óptimo, se lleva a cabo una maximización o una minimización de la función objetivo (o de coste) por medio de algoritmos iterativos. Para poder optimizar la estructura o el sólido, se deben conocer sus condiciones de contorno y una serie de restricciones sobre la función objetivo que serán explicadas más adelante.

El sólido empleado en el proceso cuya justificación se plasma en este texto, se ha optimizado mediante el caso del *compliance*. El fundamento matemático en el que se basa este caso se explicará en detalle en el apartado 1.3. de esta memoria.

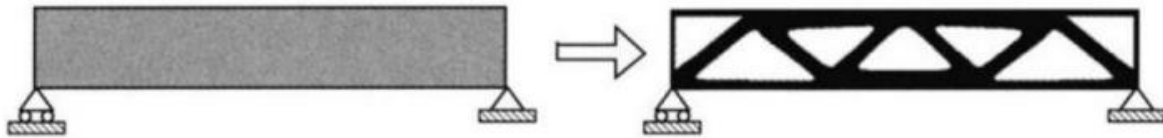


Figura 1-1. Optimización de la topología [18]

A modo de resumen, el caso del *compliance* se basa en maximizar una función objetivo que representa la rigidez del sólido, lo que es equivalente a minimizar su flexibilidad, aplicando, además, una restricción sobre el volumen final del sólido.

En este proceso es necesario realizar una discretización del dominio de trabajo mediante el Método de los Elementos Finitos. Una vez que se tiene definido el dominio de trabajo y discretizado éste en un número determinado de elementos, las condiciones de contorno a las que está sujeto dicho dominio y las restricciones sobre la función de coste, los algoritmos realizarán numerosas iteraciones en la malla de discretización del dominio analizando el estado de tensiones al que está sometido cada elemento. De esta manera, se analizará si es relevante la colocación de material en ese elemento o se puede prescindir de él, puesto que su aportación a la rigidez global del sólido no es suficientemente significativa. Así pues, el resultado del proceso será una distribución de puntos negros (equivalentes al material) y blancos (equivalentes al vacío) sobre el dominio de trabajo.

En este tipo de proceso es determinante el mallado que se aplicará sobre el dominio de trabajo, pues dependiendo de sus características, se obtendrá una solución diferente. Si la malla es muy fina, es decir, se compone de un número elevado de elementos pequeños, la solución será de mayor calidad pues hay un mayor número de posibilidades de distribución de material para alcanzar el diseño óptimo que si la malla es más burda, es decir, con pocos elementos y de dimensiones más grandes. También hay que tener en cuenta el coste computacional del proceso, pues una malla demasiado fina supondría un número muy elevado de iteraciones, lo que elevaría notablemente la duración del proceso.

De esta manera, se pone de manifiesto el principal problema que tiene el proceso de la optimización topológica porque tal y como está planteado este problema, carece de una única solución óptima por la gran dependencia de ésta con el tipo de mallado escogido. Esto hace que, matemáticamente, el problema sea no convexo, lo cual es una condición necesaria en los problemas de maximización y minimización. En el apartado 1.3, se desarrolla más en detalle el problema matemático que hay detrás de este proceso de la optimización topológica y se explicará el método empleado para dar solución a este problema intrínseco en el proceso.

A continuación, me muestra un ejemplo del resultado de una viga biapoyada con una carga vertical actuando en su parte inferior y equidistante a los apoyos de la viga. El problema se ha resuelto con una restricción sobre el volumen de un 40% y con el objetivo de maximizar la rigidez. El resultado obtenido sería el de la Figura 1-2.

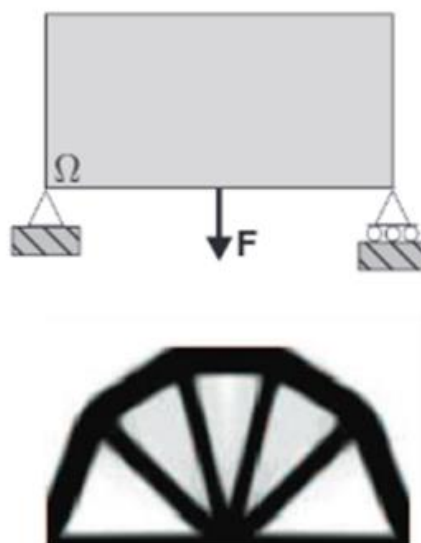


Figura 1-2. Optimización viga biapoyada [20]

1.3. Fundamento matemático de la optimización topológica

Como se ha comentado en anterior apartado, de todos los tipos de problemas que se pueden resolver aplicando la optimización topológica, en este caso será necesario resolver el problema del *compliance* (flexibilidad).

En este tipo de problema se buscará minimizar la flexibilidad del sólido (equivalente a maximizar la rigidez) para que sea funcional bajo el estado de cargas al que se encuentra sometido pero, sujeto a una restricción sobre el volumen final del sólido.

El planteamiento general del problema de la optimización topología es:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } \chi \in L^\infty(\Omega; \{0,1\}) && \Phi(\chi, u_\chi); \\ & \text{Sujeto a } \begin{cases} G(\chi, u_\chi) = 0 \\ f_i(\chi, u_\chi) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \end{aligned}$$

dónde:

Ω : dominio de trabajo.

Φ : función de coste, en nuestro problema será la rigidez del elemento mecánico.

G : ecuación de la ley de estado del fenómeno estudiado (ecuación de elasticidad lineal para nuestro problema).

χ : variable de control, intrínseca a la estructura de la pieza. Tomará valores entre 0 y 1.

u_χ : desplazamientos por puntos estado, es dependiente de χ .

f_i : funciones adicionales de restricción, en nuestro caso será de peso o volumen.

Este planteamiento general hay que adaptarlo al problema del *compliance*, que es el que se ha empleado en la optimización de la topología del sólido.

En primer lugar, para poder aplicar el caso del *compliance*, el sólido debe tener las siguientes características: debe ser un sólido continuo, homogéneo, elástico e isótropo que trabajará en todo momento en la región elástica donde, gracias a la Ley de Hooke, se sabe que las deformaciones que sufra este sólido serán proporcionales a la fuerza aplicada sobre él. El sólido que se ha optimizado tiene todas estas características.

Para reforzar la explicación del fundamento matemático se utilizará como apoyo el ejemplo de una viga en voladizo con una carga P aplicada en el eje de simetría en su extremo (Figura 1-3).

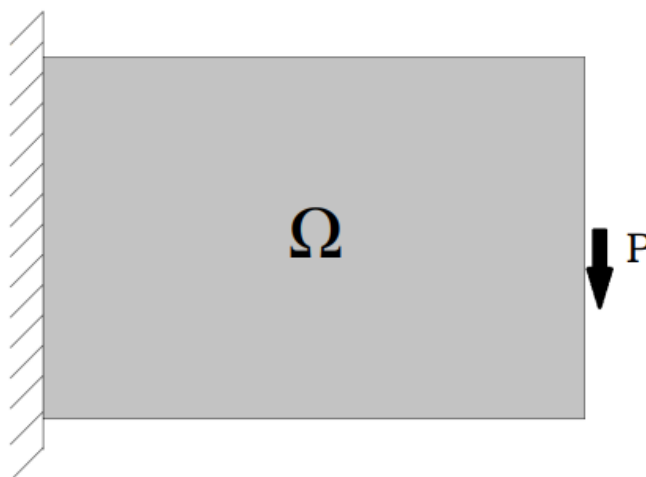


Figura 1-3. Viga en voladizo con una carga P aplicada en el centro de su extremo

La energía potencial elástica del sólido es equivalente al trabajo que realizan las fuerzas exteriores sobre él. Esta energía potencial elástica depende de la rigidez estructural del sólido que a su vez se puede definir como la oposición que presenta un sólido a ser deformado. El objetivo a partir de ahora será maximizar esa rigidez estructural del sólido, lo cual, es equivalente a minimizar la energía potencial elástica del sólido.

De esta manera, la formulación del problema del *compliance* quedaría:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } \chi \in L^\infty(\Omega; \{0,1\}) && \int_{\Omega} f \cdot u \, dx \\ \text{Sujeto a } & \begin{cases} - \operatorname{div}(E(\chi) \cdot \varepsilon(u)) = f, & \text{en } \Omega, \\ \text{condiciones de contorno,} & \text{en } \partial\Omega, \end{cases} \end{aligned}$$

Donde ahora, la restricción f_i será una restricción en el volumen del sólido.

$$f_i = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \chi(x) \, dx \leq V_0 \quad (1)$$

En la formulación de este problema, la variable de control χ aparece implícita en las propiedades del material. Así pues, la Ley de Hooke, dependerá de esta variable de control. Esta Ley de Hooke se puede expresar como:

$$E(\chi) = E_A \cdot \chi + E_B \cdot (1 - \chi), \quad \chi \in \{0,1\} \quad (2)$$

donde:

$E(\chi)$: es un tensor de cuarto orden cuyo valor estará dentro de intervalo de rigideces admisibles que satisfacen el problema.

E_A : es un tensor de cuarto orden que corresponde al primer material, A.

E_B : es un tensor de cuarto orden que corresponde al segundo material, B.

En función de los valores que tome la variable de control se puede conocer la aportación proporcional de cada uno de los materiales a la rigidez total del sólido. Aunque en la Ley de Hooke aparecen los materiales A y B, en realidad sólo el material A equivale al material del que se constituye el sólido mientras que el material B equivale al vacío. Por tanto, la información que tendrá el tensor E_A será la del módulo de Young del material y la información que tendrá el tensor E_B serán valores muy cercanos a 0 debido a que si es 0, se provocaría una falta de coercitividad en el problema.

Para poder resolver el problema es necesario discretizar el dominio de diseño en una malla de N elementos finitos, convirtiendo el problema en un problema finito dimensional o también conocido como problema de programación matemática. Para tratar de encontrar la solución óptima, bastaría con realizar todas las combinaciones posibles del material A y del material B a lo largo de todos los de los elementos que forman la malla, respetando la condición de volumen, y valorar cuál sería el reparto óptimo de estos materiales. De esta manera, la variable de control solo tomaría los valores de 0 (material B) o 1 (material A). Resolviendo el problema de esta manera se ponen de manifiesto los siguientes inconvenientes:

- El coste computacional del proceso sería tan elevado que no se podría llegar a la solución buscada.
- Existiría una gran dependencia entre el número de nudos que componen la malla discretizada y el número de posibles soluciones. Así pues, el refinar la malla del sólido no tendría que equivaler obligatoriamente a obtener una versión más detallada y exacta de la solución que se obtendría empleando una malla más burda, pudiendo aparecer material en zonas del dominio de forma inconexa (como podemos apreciar en la Figura 1-4.) haciendo imposible la obtención de una topología continua y bien definida. Esto es la falta de convexidad del problema.

El resultado obtenido en la Figura 1-4. es una solución pixelada e inconexa, cuya estructura es irreal y su fabricación es inviable. Para poder solucionar estas dificultades se realiza una reformulación del problema aplicando una normalización. Esta normalización se aplica por medio de 2 métodos: de relajación y de penalización.

Por una parte, el *método de relajación* tiene en cuenta la posibilidad de que, al optimizar un sólido, intervengan materiales compuestos pues es probable que sean necesarias mezclas microestructurales. Así pues, al relajar el problema aumentamos el conjunto de diseño donde buscar soluciones. De esta manera se consigue una escala de grises en la estructura optimizada del sólido, donde el color negro significa que sólo es necesario el material A, el color blanco significa que sólo es necesario aportar material B y la escala de grises es mezcla de los materiales A y B. El resultado de aplicar este método se puede ver con claridad en la Figura 1-5.

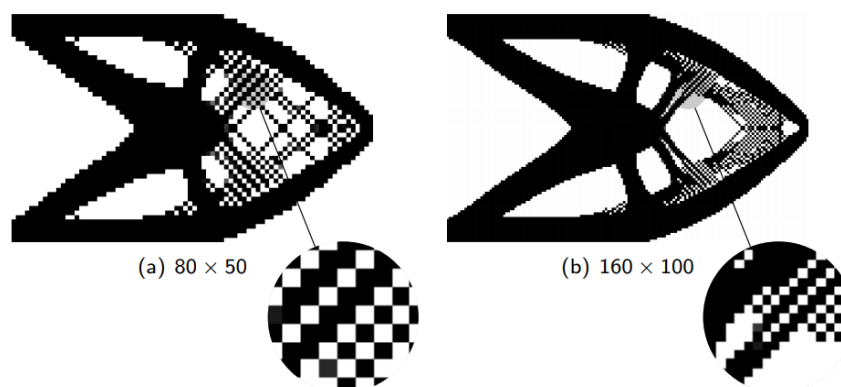


Figura 1-4. Solución óptima discretizando el dominio del sólido [9]

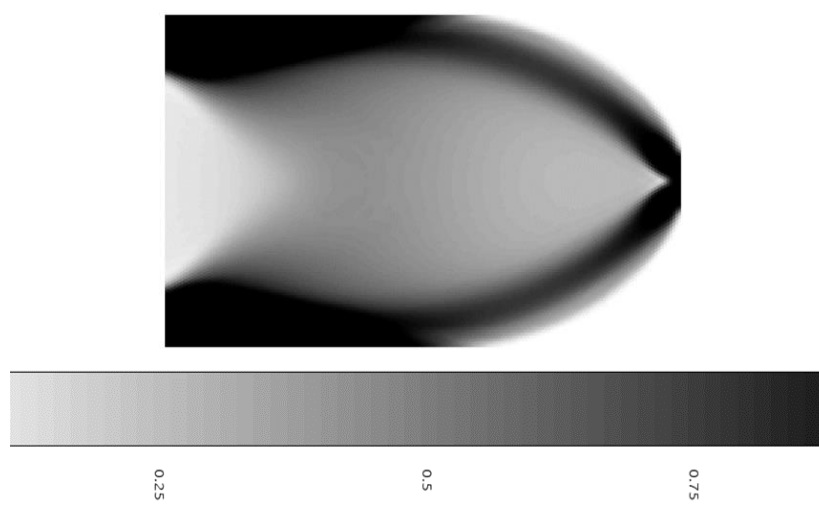


Figura 1-5. Resultado de aplicar el método de relajación

Por otra parte, el *método de restricción* añade restricciones adicionales a la variable de control con el objetivo de reducir el conjunto de diseño donde buscar soluciones.

Empleando estos 2 métodos la solución final se acerca a soluciones clásicas pero siguen presentes siguientes inconvenientes:

- El diseño no es realista pues, tener zonas con mezclas de materiales aumentaría la complicación de la fabricación pero, imponer una variable discreta sobre la microestructura, es demasiado restrictivo de partida.
- La escala de grises que se origina al emplear la relajación del problema da lugar a diseños malos y poco precisos, como se aprecia en la Figura 1-5.
- En relación con los 2 problemas anteriores, se puede dar el caso que el diseño no cumpla con las especificaciones del problema.

Para tratar de solventar estos 3 problemas es necesario aplicar un método que sea capaz de hacer continuo al problema en la variable de diseño, es decir, que ésta no solo pueda tomar los valores de 0 y 1 si no que pueda tomar también todos los valores intermedios, y que además sea capaz de penalizar situaciones intermedias. Esto se consigue con el método SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) el cuál, es un método penalizado y de relajación incompleta.

Con este método se consigue aproximar la solución del problema a la solución clásica. El primer paso es convertir el problema discreto en un problema continuo en la variable de diseño. De esta manera, se transforma la variable de diseño χ , la cual sólo podía tomar los valores de 0 o 1, en la variable ρ que toma todos los valores comprendidos entre 0 y 1.

$$\chi \in \{0,1\} \longrightarrow \rho \in [0,1]$$

Con esta nueva variable de diseño se vuelve a poner de manifiesto uno de los inconvenientes mencionados anteriormente, la existencia de mezcla de constituyentes en la solución final del problema. Para solventar este inconveniente se establecerá una penalización a la variable de diseño. De esta manera, los valores intermedios de la variable de diseño se acercarán a 0 o a 1, consiguiendo una mayor precisión a la hora de definir la topología final. El valor que debe tomar el exponente p no es un valor arbitrario sino que únicamente se emplea el valor de 2 o de 3 [5].

Al aplicar el método del SIMP se reescribe la expresión del módulo de Young:

$$E(\rho) = \rho^p \cdot E_A + (1 - \rho^p) \cdot E_B \quad \rho \in [0,1]; \quad p \geq 1 \quad (3)$$

Para aplicar el método, es necesario discretizar el dominio de diseño en N elementos. A partir de ahora, la variable de diseño es continua por lo que cada elemento pasará a tener una escala de grises como solución.

Una vez discretizado el dominio de diseño, es necesario obtener el valor de la rigidez de cada elemento K_e . Ésta dependerá tanto de la física del problema como de la dimensión de la discretización empleada. El valor de la rigidez se obtiene a partir de la Ley de Hooke y, por tanto, a partir del módulo de Young, pues es el único parámetro de la Ley de Hooke que depende de la variable de diseño. Reescribiendo la nueva expresión del módulo de Young para cada elemento se obtiene:

$$E(\rho) = \rho_e^p \cdot E_A + (1 - \rho_e^p) \cdot E_B \quad e = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

Para poder obtener los desplazamientos nodales, será necesario conocer el vector de las fuerzas (F) que actúa sobre el sólido y su matriz de rigidez, que se conseguirá concatenando las matrices de rigidez de los elementos. Con esta información se podría conocer el vector desplazamientos U por medio de la siguiente expresión:

$$F = K \cdot U \quad (5)$$

Al aplicar el método del SIMP se puede reescribir la función objetivo y la restricción de volumen para convertir el problema continuo en un problema discreto equivalente. La formulación del problema quedaría como:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar}_{\rho \in L^\infty(\Omega; \{0,1\})} \quad \Phi(\rho, U) = \sum_{e=1}^N F_e^T \cdot U = F^T \cdot U \\ & \text{Sujeto a:} \quad \begin{cases} (\sum_{e=1}^N K_e \cdot (\rho_e^p)) \cdot U = F \\ V(\rho) = \sum_{e=1}^N V_e \cdot \rho_e \leq V_0 \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

donde:

V_e : volumen de un elemento de la discretización

ρ : vector de las variables de diseño

V_0 : restricción de volumen

El problema se resolverá aplicando el método MMA (Method of Moving Asymptotes) que fue presentado en 1987 por Krister Svanberg [26]. Éste es un método de programación cuadrática y de descenso tipo gradiente.

A pesar de aplicar el método del SIMP, la solución sigue siendo dependiente del refinamiento de la malla, por lo que el principal inconveniente, la falta de convexidad, sigue presente, impidiendo que se llegue a un solución óptima. La solución a este inconveniente sería añadir una restricción adicional al problema mediante un filtro de paso bajo.

La manera de trabajar de este filtro de paso bajo es posicionándose sobre cada elemento de la discretización durante el proceso de optimización, modificando el valor de la densidad de los elementos ($\tilde{\rho}_e$), de tal manera que ésta sea una media ponderada de la densidad de los elementos adyacentes al elemento sobre el que está posicionado.

El filtro que se suele emplear se define mediante la siguiente expresión:

$$\tilde{\rho}_e = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \hat{H}_i} \cdot \sum_{i=1}^N \hat{H}_i \cdot \rho_i \quad (7)$$

Donde:

N: número total de elementos de la malla

$\hat{H}_i: r - \text{dist}(e,i)$, $\{ i \in N \mid \text{dist}(e,i) \leq r \}$; $e = 1, \dots, N$

En el operador \hat{H}_i , r es el radio del filtro y $\text{dist}(e,i)$ es la distancia que existe entre el centro del elemento e y el centro del elemento i. La principal característica de este operador es que su valor decrece linealmente a medida que aumenta la distancia respecto al centro del elemento e, estando siempre dentro del campo de actuación delimitado por el radio del filtro, que es un dato que se introduce al problema. Fuera de esa zona delimitada por el radio, el operador \hat{H}_i se hace 0.

A efectos prácticos, el radio actúa de la manera que vemos en la Figura 1-6, es decir, se posiciona sobre los elementos y homogeniza las soluciones existentes en la zona delimitada por el radio de actuación, pudiendo haber soluciones diferentes debido a la falta de convergencia del problema. En el caso de los contornos de la estructura optimizada se puede apreciar con claridad este caso, tal y como se muestra en la Figura 1-7.

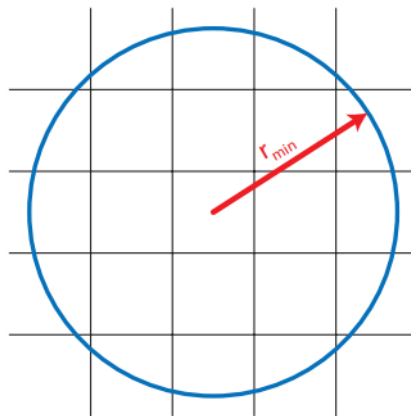


Figura 1-6. Campo de actuación del filtro de paso bajo [9]

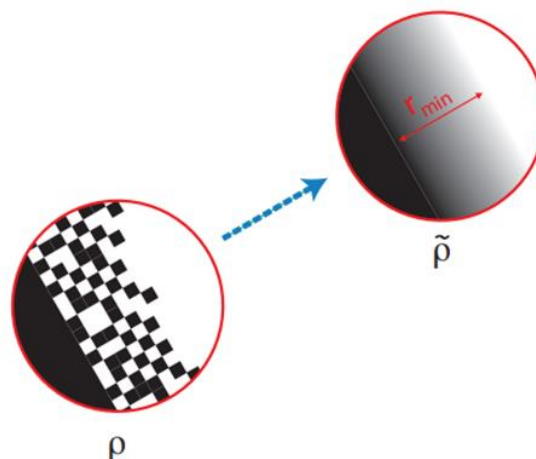


Figura 1-7. Actuación del filtro de paso bajo [9]

Conociendo el efecto que produce sobre la solución este filtro, se puede llegar a pensar que cuanto menor sea su radio, más definida será la solución final pero, llega un momento en el que el filtro se vuelve ineficaz por ser demasiado pequeño, pues, si el radio es menor que el tamaño del elemento, el filtro dejaría de cumplir su función debido a que el operador \hat{H}_i tendría valor negativo al ser $\text{dist}(e,i)$ mayor que r.

Del funcionamiento del filtro de paso bajo se puede determinar la siguiente característica: el filtro representa las

dimensiones mínimas que aparecerán en la topología resultante del proceso.

Esta característica es interesante desde el punto de vista de la fabricación pues, por ejemplo en casos de fabricación aditiva, como puede ser el FDM, el radio del filtro representaría el radio del filamento de extrusión de la impresora 3D que fabricase el sólido, no pudiendo existir secciones en la solución menores a la sección de la máquina extrusora.

Así pues, antes de optimizar topológicamente un sólido, sería conveniente conocer cómo se va a fabricar dicho sólido para poder elegir correctamente el radio del filtro.

Por último, para evitar que la topología resultante sea dependiente de la discretización de la malla empleada y del radio del filtro, se debe mantener constante el ratio N/r . Por tanto, habrá que buscar un término medio entre el número de elementos en los que se discretice el dominio de diseño y el radio del filtro, para que salgan soluciones que se puedan abordar desde el punto de vista de la fabricación y que estas soluciones sean únicas.

En la Figura 1-9 se puede observar como en el caso (a) y (d), el ratio N/r se mantiene constante. La solución de (d) está mejor definida que la de (a) pero tiene una mayor escala de grises que la solución de (a). En los demás casos, se puede apreciar lo que se ha comentado de la dependencia de la solución con la discretización y el filtro empleados.

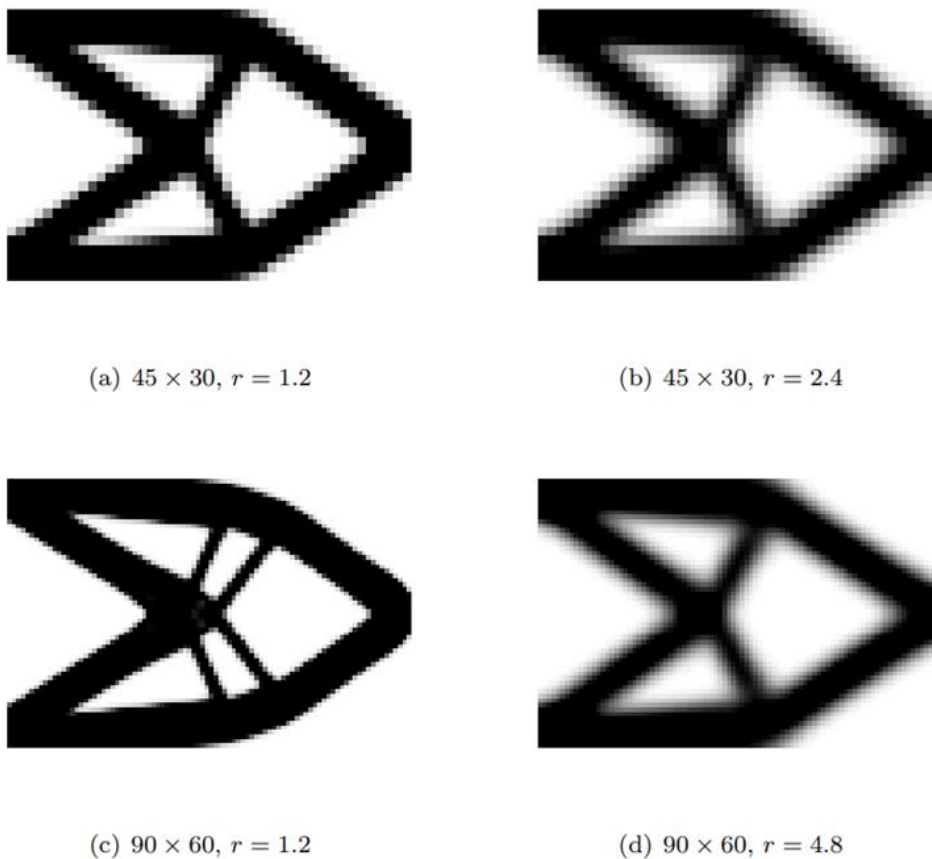


Figura 1-8. Influencia en la topología de la estructura de N y r [3]

En conclusión, todas las estructuras optimizadas van a tener la misma masa independientemente de su topología pues, en el problema del *compliance* (que es el que se ha empleado para optimizar el sólido de este trabajo) se introduce cuál es la fracción de volumen que se desea que tenga la estructura final. Teniendo esto en cuenta, antes de realizar el proceso de la optimización topológica, habría que considerar las características del proceso de fabricación con el que se confeccionará el sólido de tal modo que se definan los parámetros del problema para que el proceso de fabricación y la topología del sólido sean compatibles.

1.4. La mangueta

La pieza objeto del estudio llevado a cabo en este texto corresponde a la mangueta de dirección de un automóvil, en concreto a un Renault Megane I Fase 2 berlina. Se puede definir la mangueta como un elemento estático alojado en el sistema de dirección y suspensión del automóvil que tiene las siguientes funciones:

- Alojar en su eje principal el rodamiento que conecta el disco de freno con la transmisión del vehículo o palier a través del buje.
- Soportar las cargas que aparecen en la tracción y en el frenado del automóvil, así como las cargas de torsión respecto al eje de rotación de la rueda producidas por las mordazas de freno al accionar el sistema de frenado. Estas mordazas de freno van sujetas a la mangueta.
- Servir como nexo entre el vástago de la suspensión y el eje de rotación de la rueda además de resistir las cargas que se generan por el contacto del neumático con la carretera, resistir las cargas producidas por el amortiguador y el muelle helicoidal del sistema de la suspensión y por último, presentar robustez y rigidez para mantener el nivel de confort en el habitáculo del automóvil frente a las irregularidades de la carretera.
- Resistir la flexión que generan los momentos que aparecen cuando el vehículo pasa por una curva.
- Transmitir la dirección a cada rueda, y presentar rigidez en el brazo de la dirección para que la transmisión de la fuerza de dirección sea precisa. Se puede apreciar que el sistema de dirección del automóvil también va unido a la mangueta.

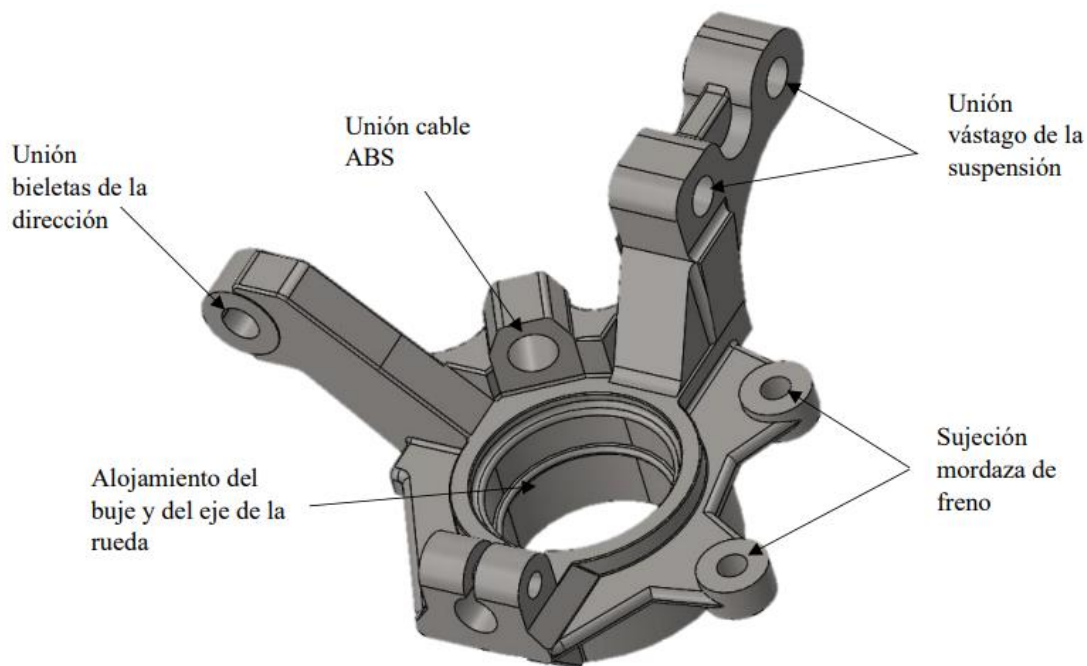


Figura 1-9. Geometría de la mangueta [11]

En la Figura 1-9. se puede apreciar la geometría de la mangueta empleada. Esta geometría es la que inicialmente presentaba la pieza antes de someterla al proceso de optimización topológica. Así pues, el estudio de la fabricación de la mangueta se realizará sobre la geometría optimizada topológicamente. Debido a la geometría intrincada de la pieza, el método empleado para la fabricación será la impresión 3D.

Así pues, se partirá de la geometría optimizada del sólido (Figura 1-10) la cual se obtuvo como resultado de un proceso de optimización topológica realizado por el autor de esta misma memoria en un trabajo fin de grado. En dicho trabajo se consiguió una geometría con la que la mangueta seguía siendo funcional habiendo reducido un 60% su masa (la masa de la mangueta de la Figura 1-9. era de 3181,64 g mientras que la masa de la mangueta de la Figura 1-10 es de 1431,74 g).

El radio del filtro empleado en el proceso de optimización topológica por el que se obtuvo la geometría final fue de 5,34 mm.

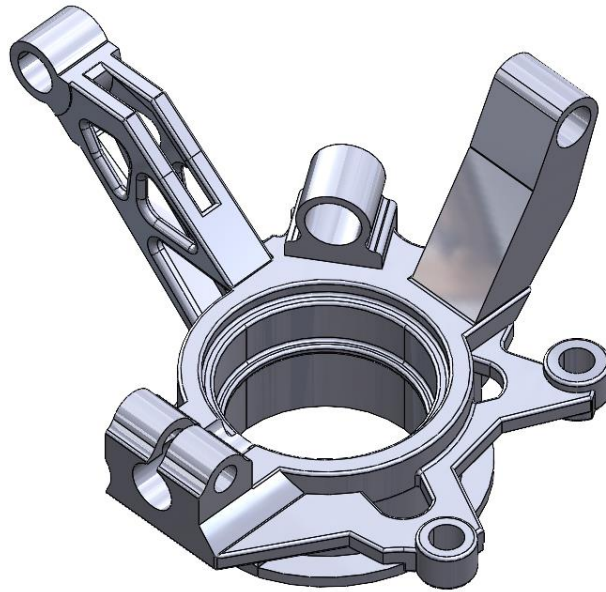


Figura 1-10. Geometría optimizada de la mangueta [11]

1.5. Alcance del proyecto

El alcance del proyecto es: llevar a cabo el estudio numérico detallado de la fabricación virtual de la mangueta de un automóvil, la cual se muestra en la Figura 1-10, con el objetivo de que ésta sea funcional en servicio.

La geometría de la mangueta mencionada es una geometría compleja debido a que se ha sido optimizada topológicamente. Es por ello por lo que en el estudio se emplearán técnicas de fabricación aditiva.

Que el estudio sea numérico quiere decir que únicamente se realizarán simulaciones del proceso de fabricación mediante un software específico para ello y, mediante los resultados obtenidos en ellas, ir modificando las condiciones y parámetros del proceso para alcanzar unos resultados óptimos. Todo con el objetivo de que la pieza pueda desarrollar sus funciones en el sistema del automóvil sin llegar al fallo. Para ello, las decisiones tomadas en cada modificación del proceso tendrán como motivación reducir las tensiones residuales en el sólido.

La estructura del estudio realizado es la siguiente:

El capítulo 2 de la memoria introduce las técnicas de fabricación aditiva con las que se podría llevar a cabo la fabricación del sólido y se profundizará en el proceso elegido para ello.

El tercer capítulo está enfocado en describir el software empleado para realizar las simulaciones de la fabricación y sus numerosas funciones, así como también se describirá su efecto sobre las propiedades finales del sólido.

En el capítulo 4 se muestran las simulaciones realizadas y los resultados a los que se han llegado en ellas. Para alcanzar el objetivo del proyecto, se llevará a cabo un análisis de la influencia de los parámetros de la fabricación sobre los resultados obtenidos.

El capítulo 5 está dedicado a los postratamientos llevados a cabo para mejorar las propiedades de la pieza obtenidas en el capítulo 4. Con la intención de alcanzar el objetivo, se realizará un análisis de sensibilidad en el que se elegirá el postratamiento con el que se alcanzan mejores resultados en tensiones residuales.

En el sexto capítulo se realizará el análisis mecánico a la pieza obtenida en los capítulos anteriores para comprobar que, bajo las hipótesis de carga consideradas críticas, ésta mantendrá su capacidad portante requerida.

El séptimo y último capítulo está dedicado al desarrollo de las conclusiones a las que se han llegado tras el estudio y a las posibles vías de mejora.

2 MÉTODO DE FABRICACIÓN

2.1. Introducción

La fabricación aditiva se ha posicionado en las últimas 2 décadas como una de las nuevas técnicas de fabricación que más interés ha despertado a lo largo del mundo y que ha revolucionado la producción industrial de forma exponencial.

El potencial que tienen estas técnicas para producir piezas de geometría compleja y para customizar dichas piezas, desde su concepción mediante modelos 3D hasta su fabricación completa, han hecho de esta tecnología un pilar fundamental de la llamada industria 4.0. Como consecuencia, estas técnicas han dado lugar a numerosos esfuerzos de investigación casi homogéneos en todo el mundo en los que se ha propiciado la realización de estudios científicos para validar tanto las capacidades de estas técnicas como las limitaciones que presentan. Estas investigaciones se han llevado a cabo tanto desde el punto de vista de la ingeniería como desde el punto de vista de la biomédica. Los motivos principales de las investigaciones realizadas han sido [7]:

- Optimizar el uso de material para reducir el desperdicio de material.
- Optimizar el uso de la mano de obra para mejorar la eficiencia.
- Optimizar el uso de recursos para limitar los tiempos de fabricación.

Tanto los gobiernos internacionales como el sector privado han invertido millones de dólares en desarrollar estos procesos, tratando de crear técnicas de fabricación novedosas desde el punto de vista de la sostenibilidad.

Todas las diferentes técnicas de fabricación aditiva que se han desarrollado hasta el momento permiten al ingeniero precisar las propiedades de las piezas fabricadas para adaptarlas a las necesidades del cliente y permiten también trabajar con una gran variedad de materiales tales como: polímeros, cerámicas, biomateriales, metales e incluso células vivas.

Como ventaja añadida sobre las técnicas de fabricación tradicionales, la fabricación aditiva encuentra un amplio potencial y aplicabilidad en el campo de la producción virtual, y como consecuencia, este campo está creciendo de la mano de la aplicación de nuevos materiales, ya que se van haciendo pruebas con ellos.

Los sectores industriales que se han beneficiado de los avances realizados en estas nuevas tecnologías de fabricación aditiva son: la construcción, los transportes, las nucleares, la biomedicina y la manufactura.

Entre las principales técnicas de fabricación aditiva se han desarrollado se encuentran [25]:

- *Estereolitografía (SLA)*: un láser ultravioleta de baja potencia realiza el curado de cada capa de fotopolímero. El espesor de cada capa lo determina el desplazamiento de la plataforma.
- *Curado en base sólida (SGC)*: un láser ultravioleta cura el polímero iluminado que sobresale de la máscara que hay colocada sobre cada capa, aspirando el líquido sobrante.
- *Inkjet printing*: los cabezales depositan gotas líquidas de polímero y cera que solidifican rápidamente. El espesor de cada capa lo marca el movimiento de la plataforma, mecanizando la capa antes de desplazarse.
- *Sinterizado selectivo por láser (SLS)*: un láser funde y sinteriza cada capa de polvo de termoplástico o elastómero extendida sobre la plataforma. El espesor de la capa lo determina el movimiento de la plataforma.
- *Fundido selectivo por láser (SLM)*: un láser funde la capa de polvo metálico o cerámico extendida sobre la plataforma. Se emplea un polímero como ligante del polvo. El espesor de cada capa lo determina el movimiento de la plataforma. Mediante este método se llevará a cabo la fabricación del elemento que se presenta en este texto.

- *Fundido por haz de electrones (EBM)*: similar al SLS y SLM pero en lugar de un láser se emplea un bombardeo de electrones dirigidos mediante campos electromagnéticos.
- *Fabricación de objetos laminados (LOM)*: un láser corta la silueta de la lámina que pertenece a la pieza final que ha sido presionada con un rodillo anteriormente.
- *Modelado por deposición de fundido (FDM)*: una boquilla alimentada por cable de termoplástico va depositando material sobre la plataforma hasta confeccionar la pieza al completo.

2.2. Optimización topológica en fabricación aditiva

Hasta hace no mucho tiempo, realizar el diseño de un elemento empleando las técnicas de la optimización topológica no era efectivo. Esto es debido a que estos diseños tenían una importante limitación: eran inabordables con las técnicas de fabricación entonces existentes.

La fabricación aditiva introduce una nueva oportunidad en la que la geometría teórica ideal que ofrece la optimización topológica puede ser fabricada con un mayor grado de sensibilidad económica.

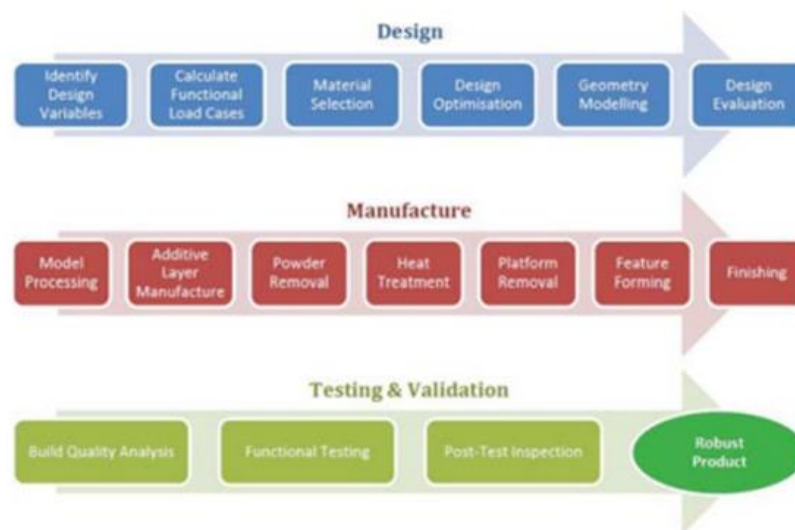


Figura 2-1. Flujo de trabajo en fabricación aditiva [19]

La fabricación aditiva junto con la optimización topológica se ha convertido en un área de investigación activa en el que los focos principales de las investigaciones se han basado en la transmisión de calor eficiente y en minimizar el material empleado en los diseños de las piezas (y por tanto, minimizar su masa).

Los avances en el proceso computacional de la optimización topológica han reducido de forma significativa los procesos iterativos manuales en el proceso de diseño del elemento, aumentándose la eficiencia de esta fase de la producción. El flujo de trabajo que se realiza en los procesos de fabricación aditiva teniendo en cuenta la optimización topológica se muestran en la Figura 2-1.

2.3. Selective Laser Melting (SLM)

La técnica de fabricación SLM (Selective Laser Melting) es también conocida como proceso de fusión de lecho de polvo (laser-based powder bed fusion process, LPBF) debido a su naturaleza. Es una de las técnicas más empleadas en fabricación aditiva por el hecho de que permite fabricar elementos con una gran variedad de materiales tales como: aleaciones de base de aluminio, hierro, titanio, cobalto, cobre y níquel.

Este proceso de fabricación nace a partir del desarrollo de la técnica SLS (Selective Laser Sintering) llevada a cabo en 1987 por el profesor de la Universidad de Texas (Austin, EE.UU), Carl Deckard, para la creación de prototipos de plástico. La primera máquina que fue capaz de llevar a cabo este proceso se comercializó por primera vez en 1992, año a partir del cual, la técnica SLS, se convirtió en una técnica común para la producción,

aunque no en una de las principales. [29]

La evolución del proceso SLS hacia el uso de otros materiales, derivó en la aparición de la técnica con la que se llevará a cabo el estudio de la fabricación del sólido optimizado topológicamente objeto de este texto, el SLM, cuyo proceso se explicará a continuación.

Para la fabricación de piezas mediante esta tecnología, se parte de un modelo tridimensional creado mediante softwares de diseño asistido por ordenador (en el caso del modelo empleado en esta memoria, el software utilizado es SolidWorks). Una vez se tiene el modelo, éste se exporta en formato STL. Este formato es el que se introduce a la máquina encargada de llevar a cabo la fabricación y contiene la información de la frontera de la pieza. En otras palabras, el archivo STL es una malla triangulada de la frontera del elemento a fabricar.

Una vez se ha importado el archivo en la máquina, se cubre la zona de fabricación con una capa fina de polvo (metálico en este caso), que posteriormente se precalienta para facilitar la fusión del ligante (el ligante tiene un punto de fusión diferente al del material principal). Este ligante puede ser bien un polímero o bien otro metal. Un láser de alta potencia escanea la superficie y va fundiendo de manera selectiva el polvo (únicamente se fundirá la parte que pertenece a la pieza final y a los soportes). Esta fusión es la que permite que se consoliden las partículas de polvo en una misma capa y también con la capa inmediatamente inferior.

En cada una de las capas se realiza en primer lugar la consolidación del contorno de su sección mediante una única pasada del láser. Así pues, se define de una manera concreta el contorno de dicha sección evitando distorsiones en la pieza final. Una vez que se ha consolidado el contorno, se realiza la fusión del interior de la capa. Para ello se pueden emplear diferentes técnicas de escaneo. Estas técnicas influirán en las propiedades finales de la pieza. Por último, para conseguir una mejor definición de la geometría de la pieza, el láser vuelve a realizar una última pasada por el contorno de la sección de la capa.

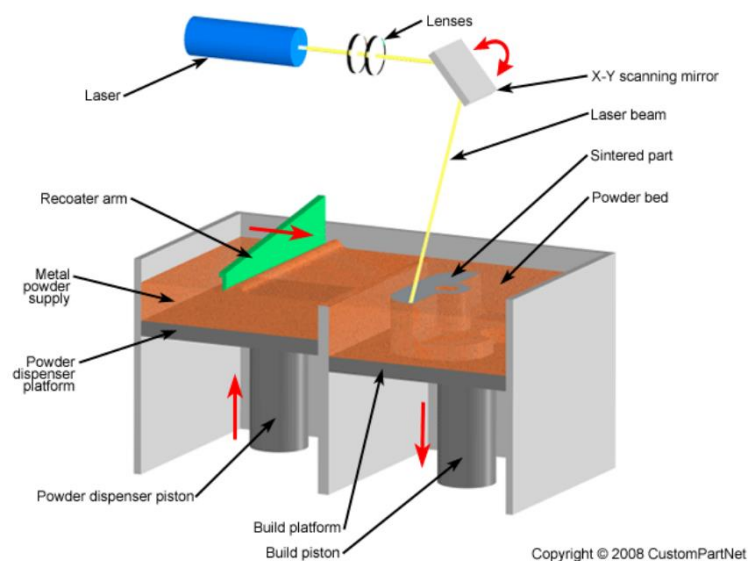


Figura 2-2. Esquema de una máquina SLM [13]

Cuando está consolidada toda la capa, la plataforma de trabajo desciende una distancia igual al espesor de la capa correspondiente y se realiza el mismo proceso explicado anteriormente. Para ello se deposita una nueva capa de polvo sobre la existente. El espesor de la capa viene definido por la calidad de la malla del modelo STL que se ha importado en la máquina y por las propiedades propias de la máquina que se esté empleando (habitualmente este valor oscila entre 20 y 50 micras).

Este procedimiento se repetirá hasta completar la fabricación de la pieza. Una vez que ha finalizado el proceso en la máquina, se retira el polvo sobrante para su reutilización en procesos posteriores, no se deshecha.

Los soportes empleados en este proceso y que se van generando al mismo tiempo que la pieza, se utilizan para reforzar ángulos pequeños y partes huecas en las piezas y para unir dicha pieza con la plataforma de trabajo. Tras la fabricación estos soportes son retirados bien de forma manual o por medio de diferentes procesos tales como corte o fresado.

Durante el proceso existen una serie de condicionantes que serán los responsables de las variaciones entre los valores del proceso real y los de la simulación previa realizada. Estos condicionantes son: el estado del equipo (envejecimiento, desgaste...), la humedad, el ambiente, la temperatura, el diámetro efectivo del láser, etc. Además, con el objetivo de conseguir una buena precisión dimensional y una buena calidad superficial, se puede realizar el proceso empleando diferentes parámetros de fabricación en función de la parte de la pieza sobre la que se va a realizar la pasada (contorno o núcleo, capas medias o últimas capas). Esto será posible siempre que la máquina permita trabajar con parámetros no fijos.

El proceso SLM es altamente beneficioso debido a que permite producir piezas metálicas bien para la creación de prototipos o bien para una producción rápida de lotes pequeños o piezas únicas. También permite desarrollar diseños complicados y altamente detallados que ninguna otra tecnología podría abordar, debido a las limitaciones de los procesos de fabricación tradicionales [17].

2.3.1 Ventajas de SLM

Este proceso de fabricación aditiva ofrece numerosas ventajas como las que se muestran a continuación:

- *Funcionalidad*: la libertad de diseño que ofrece la impresión 3D en metal, facilita la mejora de las características funcionales de las piezas. Esto es debido a que esta tecnología permite un diseño fuera de molde.
- *Ligereza*: gracias a que este tipo de fabricación permite desarrollar piezas optimizadas topológicamente, se consiguen diseños más ligeros y rígidos. Esto es posible por el uso de estructuras reticulares internas, el vaciado de ciertas partes de la pieza y la reducción de uniones mecánicas debido a que un conjunto puede fabricarse de una sola vez. Se pueden llegar a producir piezas un 60% más ligeras que mediante la fabricación tradicional.
- *Consolidación*: se elimina la necesidad de tener procesos de soldadura, los cuales son críticos por requerir inspecciones y controles de calidad muy exigentes a realizar de forma periódica. También se evita la degradación local de las propiedades del material en los procesos de soldadura. De esta manera se reducen los tiempos de fabricación, los costes de ensamblaje y se optimiza la gestión de las piezas.
- *Geometrías intrincadas*: el SLM permite la producción de geometrías de alta complejidad inabordable por los procesos de fabricación convencionales. De este modo, permite también que se produzcan geometrías optimizadas para flujos de fluidos.
- *Escasa pérdida de material*: debido a que no es necesario aplicar ningún mecanizado posterior a la fabricación y, además, el polvo sobrante se reutiliza en otros procesos, lo que supone un ahorro significativo en materia prima.
- *Velocidad de fabricación rápida*: lo que permite tener piezas complejas en un periodo corto de tiempo.
- *Alta resistencia*: las piezas fabricadas mediante SLM tienen una resistencia similar, o incluso superior en algunos casos, a la que puede obtenerse mediante procesos de forja o mecanizado.

2.3.2 Inconvenientes del SLM

Aunque son numerosas las ventajas que presenta este método de fabricación, también tiene una serie de inconvenientes que se muestran a continuación:

- *Distorsión*: es provocada por las tensiones residuales que se producen durante el proceso y hace que la pieza final difiera ligeramente del diseño inicial. Esta distorsión afecta a la precisión geométrica de la pieza.
- *Altos gradientes de temperatura*: producidos principalmente al separar la parte construida de la plataforma de trabajo. Estos gradientes térmicos pueden provocar roturas o laminaciones en la pieza.
- *Acabado superficial medio*: la pasada del haz del láser, la estrategia de escaneo utilizada, las salpicaduras y el balling provocan que la calidad superficial de la pieza sea mejorable. Aun así, es posible aplicar postratamientos que mejoran la calidad superficial, llegando a estar en algunos casos en torno a 4-10 μm .

- *Porosidad*: por las mismas razones que provocan un acabado superficial medio, se produce porosidad en la pieza. Para reducir la porosidad es necesaria la aplicación de postratamientos a la pieza. En este tema se ahondará en el apartado dedicado a los defectos producidos en el proceso del SLM.
- *Anisotropía*: las piezas fabricadas por esta tecnología tienden a presentar un comportamiento anisótropo favorecido por la dirección de fabricación seguida durante el proceso. Para hacer que la pieza tenga un comportamiento isótropo es necesario realizar un postratamiento.

2.3.3 Materiales empleados en SLM

Los principales materiales con los que se trabaja en esta tecnología son [17, 25]:

- *AlSi10Mg*: Es una aleación con base de aluminio. Su principal campo de aplicación es la fabricación de piezas y prototipos en serie. Esta aleación, tiene una buena conductividad eléctrica y térmica además de una gran resistencia a la corrosión. Por sus propiedades mecánicas y su bajo peso es muy utilizado en automoción y en aeronáutica.
- *Ti6Al4V ELI (Grado 23)*: Es una aleación de titanio, aluminio y vanadio de alta pureza, con bajo contenido de oxígeno, carbono y hierro. Esta aleación tiene una alta resistencia a la corrosión y la fatiga. Por ello su uso se centra en biomédica automoción y aeronáutica.
- *HX (Hastelloy X)*: Es una aleación a base de níquel, cromo, molibdeno y hierro. Tiene una gran resistencia a la oxidación y las altas temperaturas. Además, posee una buena ductilidad y no se agrieta con facilidad. Gracias a estas propiedades se emplea en industrias como la aeroespacial, energía y química.
- *IN718*: Es una aleación de cromo - níquel. Este material tiene una muy buena resistencia a la fatiga, a la tracción, a la rotura y a la oxidación. Es una aleación muy empleada en la aviación, y en la industria de donde se empleen turbinas de gas. Es un material de muy buena calidad.
- *1.2709*: Es un acero para herramientas (Maraging Steel) con un alto contenido de níquel. Esta aleación posee un alto rendimiento y resistencia. Además, posee otras características destacadas como su tenacidad y su resistencia a la tracción. Sus principales campos de aplicación son la automoción, la industria aeroespacial y moldes de inyección. La simulación de la fabricación que se desarrollará en el cuarto capítulo estará fabricada con una variante de este tipo de material.
- *316L*: es un acero inoxidable que es fácil de procesar. Tienen unas buenas propiedades mecánicas y una gran resistencia a la corrosión a altas temperaturas. Como consecuencia, los principales sectores en los que se aplica este acero inoxidable la automoción, ambientes susceptibles a la corrosión y en la industria alimentaria.

2.3.4. Aplicaciones

Las aplicaciones de esta tecnología se centran en la fabricación de piezas de metal complejas debido a que proporciona una flexibilidad de diseño casi sin límites. Cabe mencionar que el coste de la fabricación de este tipo de piezas depende del volumen de éstas y no de su complejidad. Algunas aplicaciones concretas destacadas son:

- Prototipos funcionales.
- Piezas de geometría compleja.
- Estructuras ligeras para uso en el sector aeroespacial y aeronáutico.
- Insertos para herramientas y moldes con canales internos de refrigeración.
- Herramientas para producción.
- Carcasas rígidas
- Canalizaciones
- Piezas de recambio
- Disipadores térmicos

- Intercambiadores de calor
- Fabricación de series cortas de piezas

El hecho de que las aleaciones de aluminio y metal empleadas en SLM puedan resistir la alta presión de gas y el calor que se produce en el proceso, tiene como consecuencia que muchas de estas aplicaciones se centren en los campos de la ingeniería mecánica y de la ingeniería química.

También, debido a las características antes mencionadas sobre el ahorro de peso, el mayor rendimiento, la reducción de costes y la libertad de diseño hace que este tipo de fabricación tenga importancia en la industria aeroespacial, en la automoción, en las refinerías, en la investigación médica y dental, en la construcción, en la industria naval, etc.

2.4. Parámetros del proceso de fabricación SLM

Tras conocer en qué consiste el proceso de fabricación SLM, en este apartado se enumerarán y se explicarán los parámetros que definen este proceso. También se relacionarán estos parámetros con la influencia que tienen sobre las propiedades principales de las piezas fabricadas.

Estos parámetros podrán ser modificados en la máquina encargada de la fabricación en función de las características que se busquen en la pieza fabricada y son [17, 29]:

- Diámetro del láser (D).
- Potencia del láser (P).
- Velocidad de escaneo (v).
- Espesor de las capas (h).
- Características de los polvos.
- Distancia entre pasadas (d).
- Longitud de escaneo (l).
- Temperatura inicial de la cámara de combustión (Ti).
- Estrategia de escaneo.
- Atmósfera de la cámara de combustión.
- Posicionamiento de la pieza.

Conocidos ya los principales parámetros, a continuación se mostrará cómo éstos afectan a las principales propiedades de la pieza que son: densidad, calidad superficial, tensiones residuales y microestructura.

Siguiendo el orden mostrado antes, en primer lugar se hablará de la influencia de los parámetros de fabricación sobre la densidad de la pieza final. Lo ideal sería obtener densidades relativas del 100 %, lo que significaría que la pieza no presenta defectos internos. Pero esto no se puede alcanzar a menos que se realice un postratamiento. Normalmente, los sólidos resultantes del proceso presentan densidades relativas que se encuentran en torno al 99%. Esta ausencia de material se debe a la presencia tanto de porosidad como de microrroturas internas.

En el caso de la densidad, afectan especialmente los siguientes parámetros: la potencia del láser, el espesor de la capa, la velocidad de escaneo, la distancia entre pasadas, la estrategia y longitud de escaneo, el tamaño de grano del polvo y su temperatura inicial.

La potencia del láser, el espesor de la capa, la velocidad de escaneo y la distancia entre pasadas definen la energía suministrada por la máquina por unidad de volumen de capa de polvo. La expresión de esta energía es:

$$E = \frac{P}{v \cdot d \cdot h} \quad (8)$$

Al aumentar la energía suministrada, aumentará la densidad relativa. Teniendo en cuenta la expresión de la energía, este aumento de densidad se producirá si aumenta la potencia y si disminuyen el espesor de la capa, la

distancia entre pasadas y la velocidad de escaneo. Como consecuencia de aumentar la energía suministrada, habrá también un aumento de la temperatura local, lo que se traducirá en una disminución de la viscosidad del líquido fundido, permitiendo mejor la unión del material.

Parece que la solución al problema de la densidad está en suministrar la máxima energía posible, pero este razonamiento es erróneo debido al hecho de que los materiales tienen un valor límite de la energía que pueden recibir, por encima del cual se produce una inestabilidad del baño fundido aumentando la rugosidad y disminuyendo la densidad. Por el contrario, suministrar energías bajas o trabajar con velocidades de escaneo altas favorece el efecto balling (camino formado por esferas sin suficiente conexión) porque se alcanzan temperaturas bajas.

En cuanto a la estrategia de escaneo, la densidad relativa aumenta si el escaneo de cada capa se realiza en dirección perpendicular (Figura 2-3) a la capa anterior porque de esta manera se evita el alineamiento de los poros. Además de la estrategia, es importante también la longitud de las pasadas del escaneo. Las longitudes de escaneo pequeñas favorecen la mojabilidad y por tanto la unión del polvo fundido.

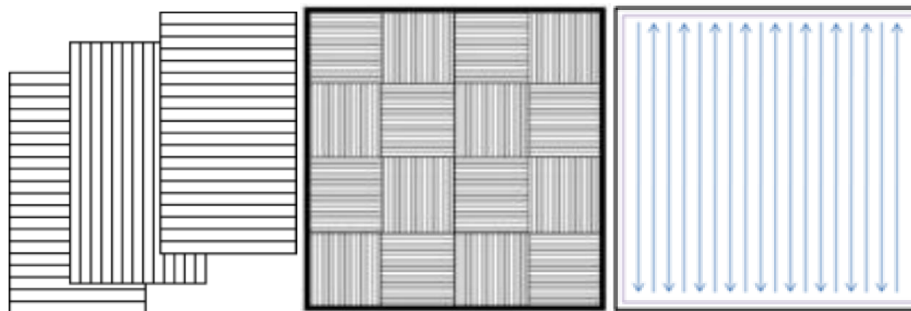


Figura 2-3. Estrategia de escaneo [29]

Por último en lo que respecta a la densidad relativa, ésta es mayor cuanto menor es el tamaño del grano de polvo y cuanto más esférico es debido a que de esta manera aumenta la superficie específica del polvo para absorber la energía del láser.

En cuanto a la calidad superficial, los parámetros más influyentes son: la velocidad de las pasadas, la distancia entre pasadas, la potencia del láser y la estrategia de escaneo.

En el caso de los tres primeros, la calidad superficial mejora significativamente al disminuir dichos parámetros, debido a que trabajar con valores altos favorecería el efecto balling y las distorsiones provocadas por los elevados gradientes térmicos que se generarían.

Como en el caso de la densidad, la calidad superficial mejora al emplear longitudes bajas de escaneo y escaneos perpendiculares (en la misma capa en este caso) que darían lugar a la estrategia denominada tablero de ajedrez. Esta estrategia se muestra en la Figura 2-3 y su empleo hace que la rugosidad sea baja. En cuanto a la rugosidad, es importante también controlar la penetración del láser al incidir sobre el polvo, ya que su es muy grande, la rugosidad aumentaría.

En el caso de las tensiones residuales, los parámetros que más influyen son: la estrategia y la longitud de escaneo, el posicionamiento de la pieza y la temperatura inicial del material.

De los parámetros mencionados, el que más influencia tiene de ellos es la estrategia de escaneo empleada. Como se ha ido mencionando hasta el momento, la estrategia con la que se obtiene mejores resultados es con la estrategia en tablero de ajedrez, alternando el escaneo tanto en el eje 'x' como en el eje 'y'. Con esta estrategia se consigue paliar el efecto de la anisotropía ya que de lo contrario, si se siguiese una única dirección de fabricación, los valores del límite elástico, la tensión de rotura, la deformación y el módulo elástico variarían en función de la dirección en la que se midiesen.

Como en los casos anteriores, longitudes de escaneo bajas favorecen, en este caso, los buenos resultados en tensiones residuales. Si esta distancia de escaneo se encuentra por debajo de los 10 mm, la disminución de las tensiones residuales es más notable. Como en el caso de la densidad, si se produce un giro en la dirección de fabricación en cada capa, se favorece la disminución de las tensiones residuales. En este caso, la capa de fabricación en lugar de girar 90 grados sobre la anterior capa, los mejores resultados se consiguen si este giro es de 45°. Además, al emplear longitudes de escaneo bajas, los gradientes de temperatura entre los caminos de fusión son menores.

La posición de la pieza en la máquina también influye en las tensiones residuales, siendo estas menores si se posiciona la pieza de tal manera que se construya sobre la superficie de mayor área, optimizando también así el número de soportes.

Una temperatura inicial alta del material provocará que durante la fabricación los gradientes de temperatura sean menores, favoreciendo así a que aparezcan menos tensiones residuales al finalizar la fabricación. Que las tensiones por temperatura sean bajas provoca que la rugosidad superficial disminuya y aumente la precisión dimensional.

La última propiedad que se estudiará será la microestructura. Sobre esta propiedad, los parámetros que influyen son: la estrategia y la velocidad de escaneo, la separación entre pasadas y la potencia del láser.

La estrategia de escaneo controla la orientación de los granos en la microestructura. Estos granos tienden a crecer de manera perpendicular a las isoterms, por lo que cambiar la dirección de fabricación de una capa a otra evitará que los poros generados puedan unirse. Este parámetro influye en todas las propiedades del mismo modo, por lo que es de especial importancia prestarle atención a la hora de preparar el proceso.

La separación entre pasadas controla el tamaño y la forma de los poros. Si ésta aumenta, los poros serán de mayor tamaño y se producirá un alineamiento de los poros en la dirección de fabricación. Para una misma separación entre pasadas, la microestructura presenta mayor porosidad si la velocidad de escaneo es alta la potencia del láser es baja. Por el contrario, con velocidades de escaneo altas, el tamaño de grano que se produce será pequeño, impidiendo que se generen defectos de gran tamaño.

Debido a estas altas velocidades, el tamaño de grano que se consigue en la microestructura de piezas fabricadas mediante SLM es menor que el de la microestructura de las piezas fabricadas por métodos convencionales.

En cuanto al tratamiento de los resultados, si la variación de la geometría se encuentra por debajo del milímetro con respecto a la geometría inicial, se considera que tanto el diseño como la fabricación es válida, y la calidad es aceptable.

2.5. Posprocesado

Como se ha mencionado anteriormente, las piezas fabricadas mediante la tecnología SLM presentan una serie de defectos que pueden desencadenar en problemas durante su vida útil. Estos defectos son provocados por la interacción entre el haz del láser y el polvo durante el proceso. Esta interacción puede provocar los siguientes defectos más comunes:

- *Porosidad*: provocada por la solidificación de la fase líquida del polvo alrededor de las burbujas que se forman dentro de la frontera de la pieza. Estas burbujas aparecen porque no hay suficiente energía para fundir completamente el polvo o porque existen huecos internos en el polvo.
- *Salpicaduras*: provocadas por las altas intensidades del láser. Esto hace que el polvo hierva y salte de la zona de trabajo durante el proceso de convección.
- *Balling*: se produce por la incapacidad del polvo fundido de conectar de manera eficiente con las capas anteriores.
- *Rugosidad continua*: también conocida como orugas por su aspecto.

Para mejorar estos defectos o incluso eliminarlos por completo se somete a la pieza a una serie de postratamientos en función del resultado que se quiera conseguir. Así pues, los postratamientos más comunes son los tratamientos térmicos y el HIP (Hot Isostatic Pressing).

La principal función de los tratamientos térmicos es aliviar las tensiones del sólido [27]. Para ello se somete a la pieza a una determinada temperatura durante un periodo de tiempo previamente definido. En función del efecto que se quiera conseguir, las características de estos tratamientos térmicos variarán. Algunos de los tratamientos térmicos más comunes son:

- *Homogenización*: se lleva a cabo a temperaturas lo suficientemente altas para conseguir alcanzar la difusión de los elementos.
- *Recocido con enfriamiento con agua*: consiste en calentar un material, mantenerlo a dicha temperatura

durante un tiempo determinado y después enfriarlo lentamente.

- *Temple*: consiste en calentar un material a elevadas temperaturas y enfriarlo de manera rápida.

Los efectos que se buscan al aplicar estos tratamientos térmicos son: aumentar la ductilidad del sólido, reducir su límite elástico, incrementar la dureza del material, modificar la microestructura, mejorar la calidad superficial de la pieza, reducir la segregación química, etc.

Por su parte, el HIP [30] es un postratamiento utilizado para densificar piezas metálicas y cerámicas empleando para ello técnicas de compresión y compactación isotrópica del material. El proceso se basa en la aplicación de altas presiones y temperaturas (hasta 200 MPa y 2000 °C) durante largos periodos de tiempo (de la orden de horas) y en presencia de un gas inerte para que el material no reaccione químicamente (el gas noble argón es el más empleado). La temperatura no se aplica de forma directa sí que va aumentando a una velocidad de x °C/min. Una vez terminado el proceso, la pieza se refrigera por aire.

El objetivo principal de este postproceso es eliminar por completo los poros que se producen durante el proceso de fabricación y que se combinan debido al efecto de difusión, por lo que no hay relación entre el HIP y la mejora de calidad superficial de la pieza.

Gracias a la densificación de la pieza que se consigue, el material del que se compone desarrolla mejores propiedades mecánicas tales como vida a fatiga, resiliencia y ductilidad. Es posible que también presente una modificación de la fase de la microestructura por lo que es importante controlar el índice de enfriamiento.

Además de las ventajas del HIP mencionadas hasta este punto, el proceso presenta una serie de ventajas adicionales:

- Aumenta la resistencia frente a la corrosión.
- Da como resultado piezas con microestructura de grano fino con buenas propiedades mecánicas y sin anisotropía.
- Puede unir diferentes metales sin necesidad de adhesivos ya que éstos imponen límites en la temperatura.
- Es el método considerado de mayor fiabilidad.
- Durante el proceso no se modifica la geometría de la pieza.
- Permite recuperar piezas defectuosas, reduciendo así los niveles de la tasa de deshecho.
- Posibilita diseños más ligeros.
- Reduce los controles de calidad y sus costes asociados.
- Optimiza el uso de polvo metálico.
- Reduce el número de componentes defectuosos.

3 EL SOFTWARE SIMUFACT ADDITIVE

3.1. Introducción

Simufact Additive es un software de simulación de procesos de fabricación aditiva con materiales metálicos y de optimización de costes que pertenece a la empresa multinacional HEXAGON.

HEXAGON es una empresa líder en soluciones de realidad digital que cuenta con numerosas tecnologías propias centradas principalmente en el aprovechamiento de la creciente cantidad de datos que se crean hoy en día. Todo ello con la intención de aumentar la eficiencia, la productividad, la calidad y la seguridad en aplicaciones industriales, de infraestructuras, del sector público, de movilidad y de fabricación.

Todas las empresas tienen 3 pilares fundamentales que marcan su desarrollo y su posicionamiento en el mercado. Estos 3 pilares son la visión, la misión y los valores. En el caso de HEXAGON, su visión es la de que los datos se aprovechen de forma plena y autónoma para que tanto los negocios como la industria y la humanidad prosperen desde el punto de vista de la sostenibilidad; su misión es la de hacer posible que los ecosistemas estén conectados y que sean autónomos, impulsando de este modo la eficiencia, la productividad y la calidad; y sus valores son:

- Rentabilidad sostenible, rendimiento por encima de procedimiento
- Emprendimiento
- Equipos comprometidos
- Profesionalidad
- Innovación
- Enfoque al cliente

Dentro de los productos comercializados por HEXAGON en el campo de la fabricación, destaca el caso de Simufact. Este software permite simular una amplia gama de procesos de conformado, unión y fabricación aditiva basada en metales. Este software se divide en 3 líneas de producto para cubrir estas necesidades:

- *Simufact Forming*: es un software para la simulación de procesos de conformado en metales. Los campos que cubre este software son: forjado, conformado en frío, conformado de chapa, procesos incrementales y unión mecánica.
- *Simufact Welding*: se emplea para modelar y optimizar procesos de fusión por presión, incluyendo la secuencia de soldadura y sujeción. Los procesos que incluye este software son: soldadura por arco, por rayo láser, por haz de electrones, por puntos de resistencia y el proceso generativo “Direct Energy Deposition”. También se pueden modelar tratamientos térmicos.
- *Simufact Additive*: es un software escalable empleado para la simulación de procesos de fabricación aditiva. Se centra en procesos de fusión en lecho de polvo (L-PDF) y de inyección de aglutinante metálico (MBJ). Este software está diseñado para predecir la distorsión y compensarla y para predecir tanto las tensiones residuales como la distribución de temperaturas en la impresión del sólido. Además, con este producto se pueden simular los tratamientos térmicos, el corte de los soportes, y el prensado isostático en caliente (HIP), procesos que han sido explicados en el capítulo 2.

3.2. Funcionalidad de Simufact Additive

Ante los problemas que aparecen en los procesos de impresión 3D los cuales han sido explicados en el segundo capítulo de este texto y entre los que destacan: la aparición de distorsiones, tensiones residuales, defectos internos y externos, la velocidad de fabricación, el número de iteraciones de prueba y error, ausencia de repetitividad, etc., Simufact Additive los trata de llevar al mínimo mediante la simulación del proceso real previa a la

fabricación en la máquina.

De esta forma, las principales funciones que tiene este software son [14]:

- *Compensación de la distorsión:* la distorsión se genera debido a los efectos térmicos sobre la pieza durante el proceso. Simufact calcula los desplazamientos y distorsiones de la pieza terminada y permite comparar el resultado del proceso con el modelo CAD introducido como pieza inicial. La compensación de la distorsión se puede realizar de manera manual pero es más eficiente realizarla mediante la compensación automática que ofrece el software. Así pues, se introduce en el programa la distorsión admisible y el programa realiza el proceso teniendo en cuenta este dato.
- *Reducir las tensiones residuales:* con este software se pueden reducir las tensiones residuales y evitar influencias negativas. Para ello, permite modificar las estructuras de soporte, la orientación de la pieza en la máquina, los pasos de la fabricación y el precalentamiento de la placa base, factores que afectan a la aparición de tensiones residuales. Del mismo modo, el software también es capaz de predecir la reducción de las tensiones residuales que se producirían tras realizar el proceso de eliminación de soportes, tras llevar a cabo el corte de la placa base, tras aplicar algún tratamiento térmico posterior o tras realizar el prensado isostático en caliente.
- *Generación y optimización de estructuras de soporte:* Simufact Additive es capaz de generar y optimizar de manera automática los soportes necesarios en función del modelo CAD que se importe en el programa. El software está diseñado para que la geometría de estos soportes sea realista y detallada.
- *Posicionamiento y anidamiento:* el software permite definir el posicionamiento de la pieza en el banco de trabajo de la máquina de manera que se consigan unos mejores resultados en cuanto a tensiones residuales se refiere. Como se detallará más adelante en este mismo capítulo, el programa tiene un asistente de posicionamiento en el que prevé las tensiones residuales resultantes en función de la orientación que el usuario vaya dando al sólido. Además, con la intención de optimizar el uso del banco de trabajo y los tiempos de fabricación, el programa permite simular procesos con varias piezas anidadas en la misma placa base. Este caso no se usará en este trabajo debido a que únicamente se simulará la fabricación de un único sólido.

Una vez descritas las principales funciones del software, se puede comprobar cómo este programa está diseñado para cubrir un amplio rango de los procesos empleados en fabricación aditiva. Así pues, con Simufact Additive se puede llevar a cabo la simulación de los siguientes procesos:

- Creación de piezas por medio de fabricación aditiva en lecho de polvo.
- Relajación de tensiones por medio de tratamientos térmicos.
- Corte del material de la placa base.
- Eliminación de soportes.
- Prensado isostático en caliente (HIP).
- Relajación de la pieza después del mecanizado.

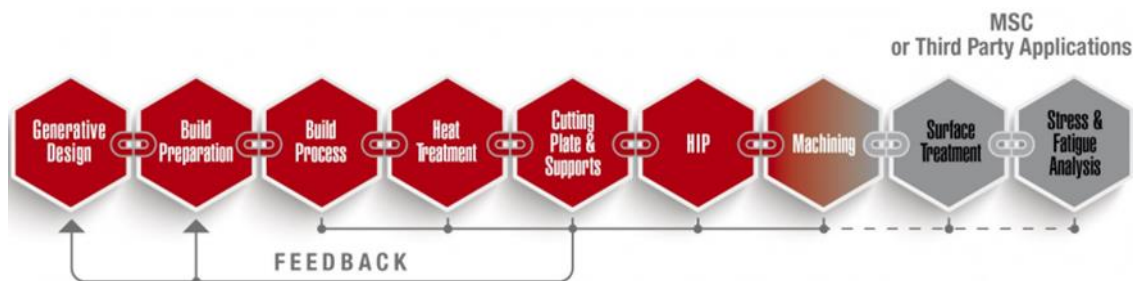


Figura 3-1. Etapas del estudio del proceso de fabricación [14]

En la Figura 3-1. se muestra el orden en el que se ejecutarían los procesos mencionados. Esta Figura representa la cadena completa de los pasos que se siguen en estudio de la fabricación de una pieza y que se seguirán en el estudio que este texto justifica.

La mayor parte de los pasos se pueden abordar con Simufact Additive pero este software tiene una importante limitación y es que no es capaz de realizar análisis mecánicos de stress y fatiga a las piezas resultantes de la fabricación. Este análisis resulta de vital importancia para validar la funcionalidad de la pieza y para tener seguro que no va a fallar durante su vida útil. Sin embargo, Simufact es capaz de exportar los resultados de la simulación de la fabricación a otros softwares del mismo grupo con el que sí se puede llevar a cabo este análisis.

Del mismo modo que no se pueden realizar análisis mecánicos en Simufact Additive, tampoco se pueden crear geometrías, éstas se deben crear con cualquier software de modelado CAD (SolidWorks en este caso) e importar el modelo en el programa.

3.3. Interfaz de Simufact Additive

En este apartado se mostrará cómo es la interfaz de Simufact Additive, cómo trabajar con ella y dónde se encuentran los parámetros que definen el proceso de fabricación, para justificar más adelante las diferentes iteraciones que se harán buscando las condiciones óptimas de fabricación.

En primer lugar, la principal interfaz del software es la que se muestra en la Figura 3-2. Como se puede observar, es una interfaz poco compleja e intuitiva en la que se muestra de manera clara cada fase del proceso. Estas fases se encuentran identificadas por un widget o aplicación (6,7,8,9 y 10).

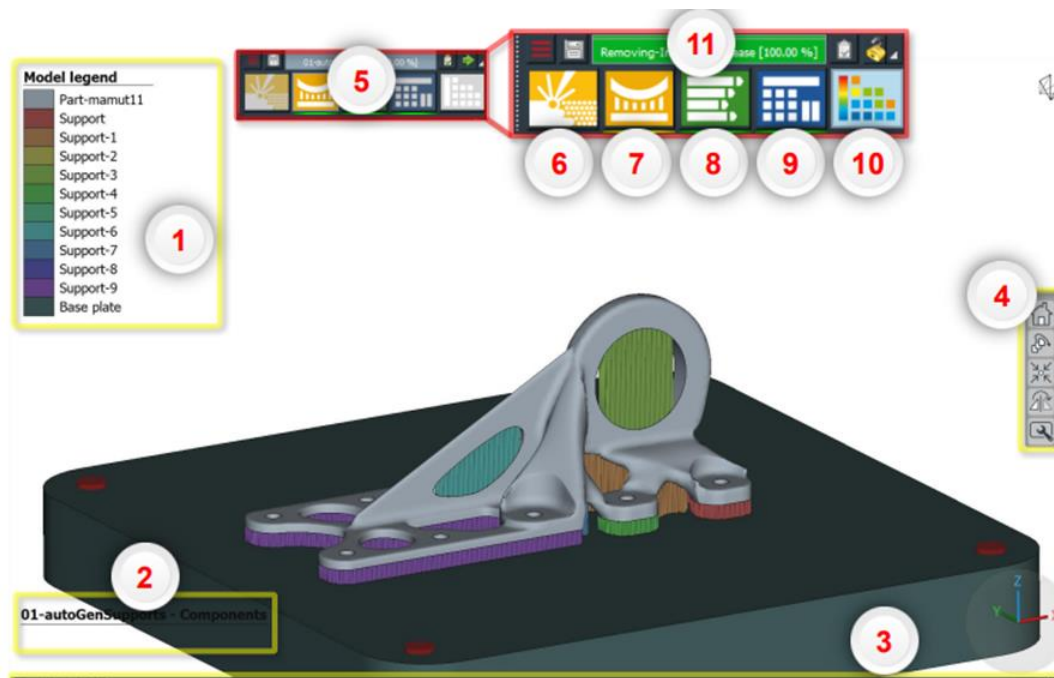


Figura 3-2. Interfaz principal Simufact Additive [14]

En la Figura 3-2 cada número representa:

- 1- Leyenda
- 2- Información sobre el estado del proceso
- 3- Controlador de la animación del proceso
- 4- Cámara de la máquina
- 5- Barra de herramientas principal
- 6- Aplicación del proceso
- 7- Aplicación de la máquina
- 8- Aplicación de la fabricación y la optimización
- 9- Aplicación de análisis

- 10- Aplicación del resultado
- 11- Barra del estado del proceso

3.3.1. Aplicación del proceso

En un mismo proyecto de Simufact Additive se pueden realizar diferentes procesos independientes o relacionados entre sí. Esta aplicación tiene la función de informar sobre el estado en el que se encuentra cada uno de los procesos y permite gestionar cada uno de ellos.



Figura 3-3. Aplicación del proceso Simufact Additive

Por medio de esta aplicación también es posible copiar un proceso dentro del mismo proyecto por si fuese necesario variar únicamente pocos parámetros del proceso con el objetivo de ver la sensibilidad de éstos. También es posible exportar la información de un proceso completo, para trabajar en otro proyecto, e importar procesos de otros proyectos.

3.3.2. Aplicación de la máquina

En esta aplicación se divide en diferentes subapartados como se muestra en la Figura 3-4. En el subapartado 'machine' se configura la máquina que llevará a cabo la fabricación. Esta máquina puede ser existente o configurada manualmente por el usuario. En el caso de este trabajo, se elegirá una de las máquinas existentes pues carecería de sentido optimizar un proceso de fabricación que ninguna máquina real pueda llevar a cabo en la actualidad. Las máquinas de fabricación SLM que tiene configuradas Simufact son [31]:

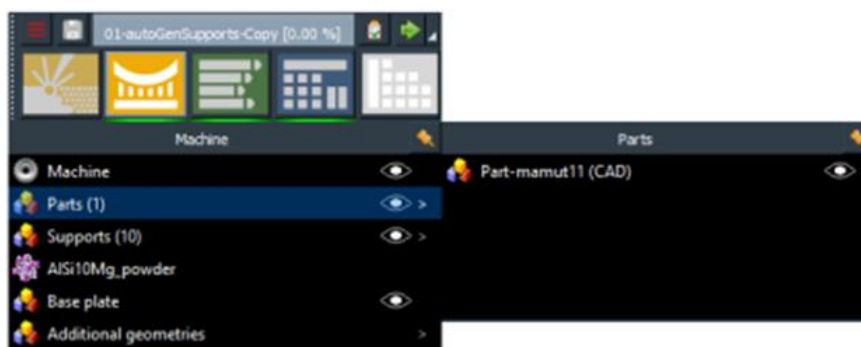


Figura 3-4. Aplicación de la máquina Simufact Additive

- **125HL:** es capaz de producir componentes metálicos complejos mediante un sistema propio de movimiento bidireccional que la convierte en la máquina del mercado con el sistema más rápido. La recirculación interna del gas inerte se realiza mediante flujo laminar, lo que proporciona un uso seguro y eficiente. Tiene un software de control abierto que permite customizar las condiciones de los procesos para cada pieza. Esta máquina permite el uso de numerosos tipos de metales y el cambio de material es un proceso rápido y sencillo.
- **280HL:** esta máquina posee una tecnología con un doble haz del láser. Ofrece una solución constructiva en la que los revestimientos de los bordes son blandos (de silicona) lo que permite fabricar estructuras

delicadas con una calidad muy superior. Al igual que la máquina anterior, posee un software de estructura abierta que permite customizar las condiciones de los procesos y éstos se desarrollan en una atmósfera de gas inerte en el que el flujo es laminar, provocando un consumo eficiente y seguro. Los procesos desarrollados en esta máquina pueden transferirse a la máquina 500HL.

- **500HL:** posee un gran espacio de fabricación y una tecnología con 4 láser que dota a la máquina de un sistema de alto rendimiento. Tiene 2 tipos de haz de láser, los cuales pueden ser utilizados de manera independiente, en paralelo o simultáneamente durante el proceso lo que se traduce en un incremento de la productividad. La máquina posee un sistema de transporte de metal automatizado que elimina los tiempos de llenado manual y manipulación del polvo. También posee una unidad de desembalaje, lugar donde tiene lugar el enfriamiento de la pieza una vez terminada la fabricación, por lo que cuando se termina un proceso, el siguiente puede comenzar de manera inmediata. Como las máquinas anteriores, posee un software con estructura abierta que permite customizar las condiciones del proceso.

Una vez que se elige la máquina con la que se simulará el proceso, se configuran de manera automática todas las características de dicha máquina, lo único que habría que definir sería el número de láser que se emplearán en el proceso, en el caso de que la máquina tenga más de uno. Esta opción aparece en la pestaña ‘machine parameters’ dentro de este subapartado ‘machine’.

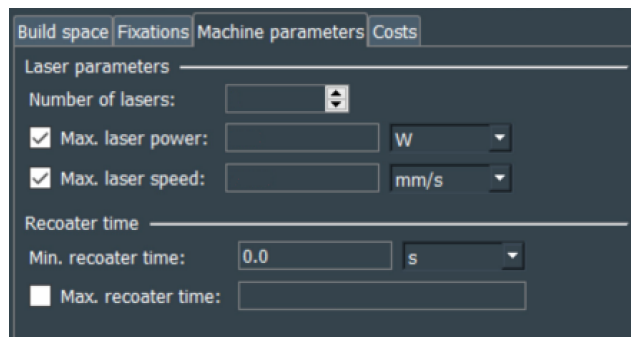


Figura 3-5. Machine parameters

En el subapartado ‘Parts’ es donde se importará el modelo CAD del sólido. El programa admite importarlo como archivo .STL, .STEP o .IGES. La única diferencia que existe en importar el sólido en un formato u otro es que, cuando se llegue al final del proceso, sólo se podrá exportar el sólido resultante en el formato en el que se ha importado. Una vez importado el sólido, el programa da la opción de elegir tanto la escala como la posición inicial de la pieza en la máquina, aunque ésta podrá modificarse después.

El siguiente subapartado es el de ‘supports’. Este subapartado es el encargado de generar los soportes de la pieza. Esta generación de soportes podrá hacerse de manera automática o de manera manual eligiendo las caras sobre las que poner soportes. El parámetro más importante es el ángulo crítico de superficie. Este ángulo define los grados de inclinación respecto a la bandeja de trabajo máximos para que haya necesidad de que la cara deba tener soporte, es decir, si el ángulo crítico de superficie es de 45°, todas las superficies que formen un ángulo entre 0° y 45° con la horizontal, deberán ser soportadas.

En los apartados de ‘material’ y ‘base plate’ se elige tanto el material del que estará compuesto el sólido como del que se compondrá la placa base del banco de trabajo. De todos los materiales existentes, sólo se seleccionarán aquellos que estén en forma de polvo. Las características del material elegido para la pieza simulada en este trabajo se detallarán en el capítulo 4.

Por último, en el subapartado ‘additional geometries’ se importarán todas las geometrías que sea necesario utilizar como referencia para realizar comparaciones con la geometría resultante de la simulación del proceso.

3.3.3. Aplicación de fabricación y optimización

Esta aplicación permite definir la estrategia de optimización y el orden de las fases del proceso de fabricación. Del mismo modo se puede elegir cuáles serán las fases que se simularán y cuáles no. Una vez elegidas estas fases, se pueden modificar los parámetros que definen cada una de estas fases.

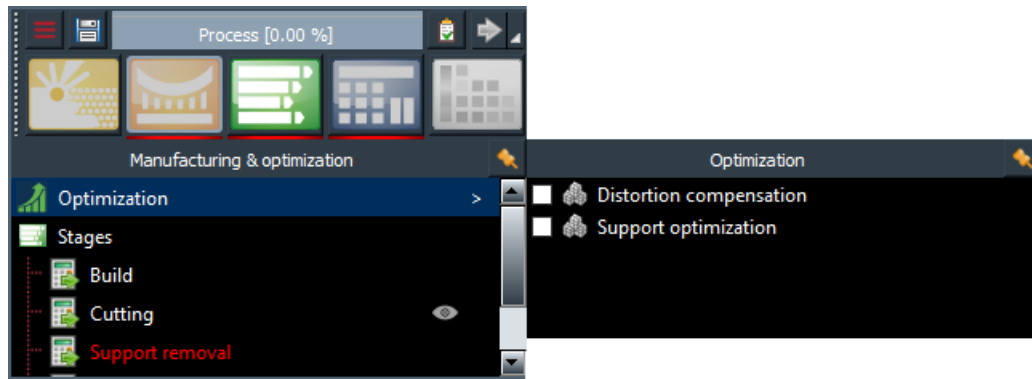


Figura 3-6. Aplicación de fabricación y optimización

Como se puede ver en la Figura 3-6., el primer subapartado que tiene esta aplicación es el de ‘optimization’. Este subapartado tiene 2 funciones principales que son la de compensar la distorsión y optimizar los soportes. En el primer caso, como se observa en la Figura 3-7, el software permite determinar una distorsión máxima respecto a una referencia para cada uno de los sólidos importados. Además, es necesario introducir el número de iteraciones máximas permitidas para alcanzar la restricción introducida.

En el caso de la optimización de los soportes, lo que realmente realiza el software es la optimización de la distorsión en los soportes. Esto es para evitar que de esta manera las distorsiones que puedan aparecer en ellos afecten negativamente a la estructura del sólido. La optimización de la estructura de los soportes se realiza de manera automática en la aplicación de la máquina, vista anteriormente.

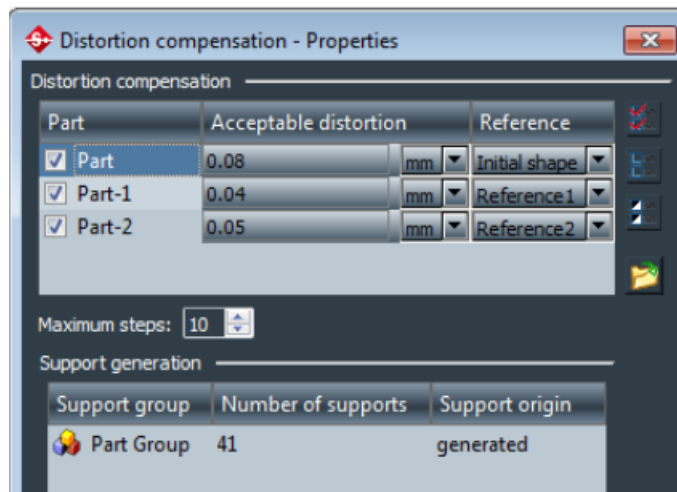


Figura 3-7. Compensación de la distorsión

El siguiente subapartado que aparece en esta aplicación es el de ‘Stages’. En él se definen propiedades del proceso que son de gran importancia para la simulación de la fabricación. En la Figura 3-8 se muestra la ventana de propiedades que pertenece a este subapartado. En ella se puede observar que el primer aspecto que se puede definir es la naturaleza del proceso de fabricación, siendo las opciones las siguientes [14]:

- *Metal Powder Bed Fusion* (MPBF)
- *Metal Brinder Jetting* (MBJ)
- *Machining*
- *Geometry Inspection*

Debido a que el proceso elegido para llevar a cabo la simulación de la fabricación es el SLM, la opción elegida será MPBF.

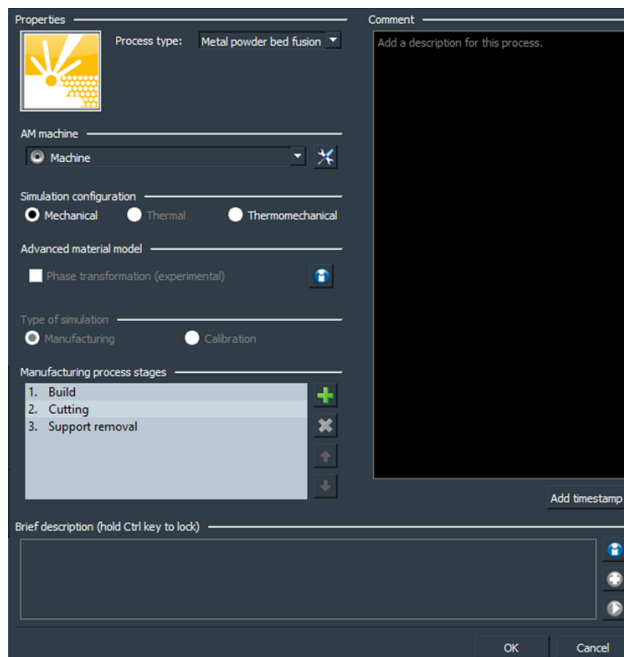


Figura 3-8. Propiedades del proceso

El segundo aspecto que aparece en esta ventana de propiedades es el del tipo de máquina que llevará a cabo el proceso. En este caso aparecerá la máquina seleccionada en la aplicación anterior.

Después, el software permite configurar el tipo de estudio que se realizará en la simulación del proceso. Aunque el programa ofrece 3 opciones, para el estudio de la fabricación de la mangueta únicamente se tendrán en cuenta las siguientes opciones [14]:

- *Método mecánico*: eligiendo esta opción, el software realiza la simulación de un proceso puramente mecánico en el que en cada incremento del proceso se simula la creación de una capa de sólido. Este método ofrece información sobre la distribución de tensiones residuales y sobre las distorsiones de forma rápida y fiable. Además, mediante este método se calibran de forma automática los parámetros de deformación para los voladizos del sólido.
- *Método termomecánico*: simula un proceso de fabricación mecánico utilizando además un método simplificado de ciclo térmico en el que los elementos que definen el sólido son analizados en múltiples incrementos en cada una de las capas de material. Es capaz de ofrecer resultados aproximados de las consecuencias derivadas de la temperatura, de la distribución de las tensiones residuales y la temperatura y de la distorsión de la pieza. Los principales parámetros de este método son los referidos a las propiedades del láser y la separación entre pasadas. Además, el software es capaz de realizar una calibración automática de la energía aportada y de la expansión térmica necesaria.

Una vez configurado el método de fabricación, se puede elegir el tipo de simulación para el que se ofrecen 2 opciones: fabricación o calibración. En este caso, todas las simulaciones del proceso que quedarán reflejadas en este texto serán de fabricación y no de calibración.

Otro aspecto que se puede configurar es la realización del proceso teniendo en cuenta el cambio de fase microestructural del material durante el proceso. Esta opción únicamente estará disponible en caso de haber elegido el método termomecánico para llevar a cabo la simulación del proceso ya que los cambios de fase son consecuencia de la temperatura.

Por último, en la ventana de propiedades se eligen las fases que conformarán el proceso de fabricación y se define su orden. Las fases que ofrece el programa son: fabricación, corte, liberación inmediata, eliminación de los soportes, tratamientos térmicos y el HIP. De todas estas fases, la única que no se empleará en ninguna simulación de las que se van a realizar es la liberación inmediata. Esto es debido a que la separar de forma inmediata el sólido de la placa base puede desencadenar problemas estructurales en él.

Cómo se observa en la Figura 3-6 las fases elegidas para formar parte de la fabricación se mostrarán a continuación del subapartado 'Stages' para que puedan definirse por separado los parámetros de cada una de ellas.

3.3.3.1 Fases del proceso

A continuación se mostrarán los parámetros que definen cada una de las fases y qué relación guardan con el proceso explicado en el capítulo 2.

Fabricación (Build): esta fase siempre irá en primer lugar y es la más extensa en cuanto a cantidad de parámetros se refiere pues es la que define la parte de construcción del sólido.

Para definir todo el proceso, el software ofrece 3 pasos: parámetros de fabricación (Figura 3-9), parámetros térmicos (Figura 3-11) y parámetros post fabricación (Figura 3-12).

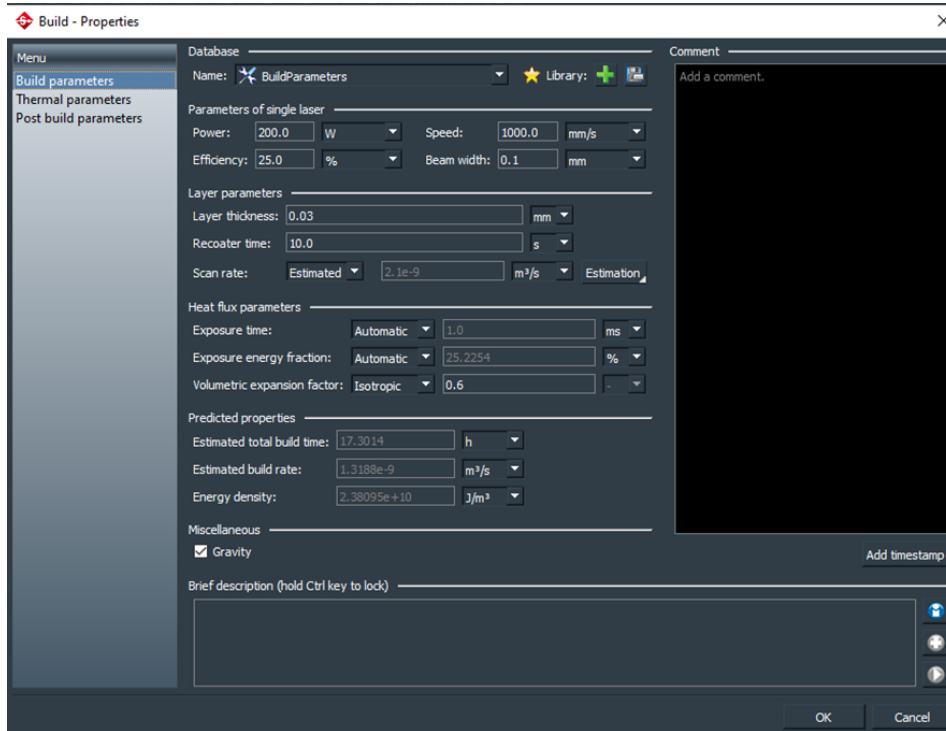


Figura 3-9. Parámetros de fabricación

En el primero de los pasos, el software permite definir los parámetros referidos al láser tales como: la potencia, la eficiencia (toda la energía perdida antes de que el haz alcance el polvo y durante la adsorción), la velocidad y el ancho del haz del láser, es decir, su diámetro; los parámetros referidos a la capa tales como: el espesor de la capa, el tiempo que necesita la cuchilla que recoge el polvo para volver a su posición inicial y la estrategia de escaneo (Figura 3-10).

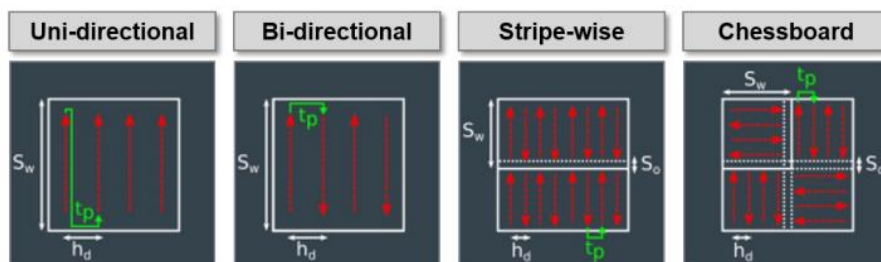


Figura 3-10. Estrategia de escaneo

Donde:

S_w = Ancho de escaneo

S_o = Ancho de solapamiento

h_c = Distancia entre pasadas

t_p = Tiempo de pausa

Dentro de este primer paso se pueden definir también los parámetros referidos al flujo térmico tales como: el tiempo de exposición del haz sobre el polvo, la fracción de energía de exposición y el factor de expansión volumétrica (puede definirse como isótropo o anisótropo).

Por último, dentro de este primer paso se muestran una serie de predicciones sobre el proceso. Estas predicciones son: el tiempo total estimado de fabricación, el ratio estimado de fabricación que relaciona el volumen imprimido y el tiempo total de fabricación y la densidad energética, es decir, la cantidad de energía suministrada sobre un elemento de cada capa por unidad de volumen que se calcula en base a los parámetros del láser, el escaneado y el tiempo de exposición. Para que el análisis sea más preciso es conveniente seleccionar que tenga en cuenta la gravedad en el proceso, esto aumentará el coste computacional del proceso.

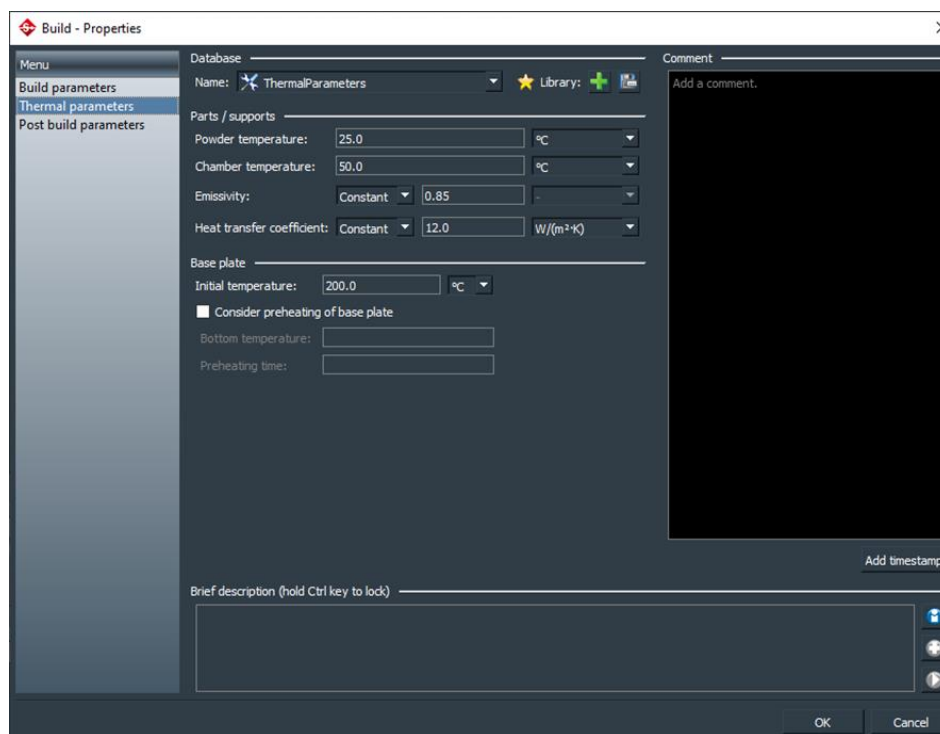


Figura 3-11. Parámetros térmicos

En el segundo paso de esta fase se definen los parámetros térmicos referidos a la pieza y los soportes tales como: la temperatura inicial del polvo; la temperatura en el interior de la cámara de la máquina; la emisividad, es decir, el calor perdido debido a la radiación (puede ser un valor constante, una función dependiente de la temperatura o definirse de manera automática); y el coeficiente de transmisión de calor por convección en el interior de la cámara, puede ser un valor constante o una función dependiente de la temperatura.

También en este segundo paso es posible modificar los parámetros referidos a la placa base, en concreto su temperatura inicial. Si se considera el precalentamiento de esta placa base, hay que indicar cuál es la temperatura del fondo de ésta y el tiempo de precalentamiento.

En el tercer y último paso de la fase de fabricación se definen los parámetros referidos al proceso de enfriamiento de la pieza y al desbloqueo de la fijación.

En la selección del tipo de proceso de enfriamiento hay 2 opciones:

- *Pieza y soportes rodeados por el polvo.* En esta opción únicamente la última capa de la pieza y de los soportes y el fondo de la placa base tienen convección dentro de la cámara de la máquina.
- *Después de levantar la placa base.* El proceso de enfriamiento se realizará una vez se haya levantado la placa base y eliminado la mayoría del polvo. Así pues, todas las superficies se verán afectadas por la transmisión de calor por convección.

Aparte de elegir entre una de estas 2 opciones, hay que indicar cuándo terminará el proceso de enfriamiento. En este caso el software permite también elegir entre 2 opciones. Así pues, se puede indicar que el proceso terminará cuando el sólido llegue a la temperatura indicada o cuando pase un determinado tiempo.

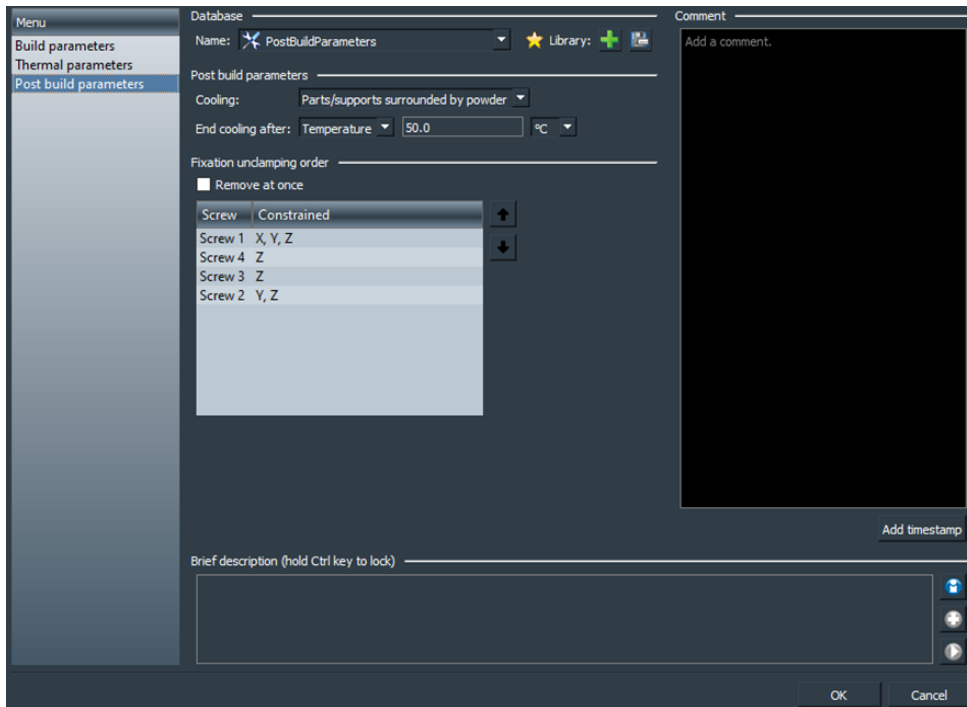


Figura 3-12. Parámetros de post fabricación

Por último, dentro de este tercer paso se puede definir el orden de desmontaje de los tornillo que anclan la placa base al banco de trabajo de la máquina o, si el usuario lo desea, desmontar a la vez todos los tornillos de fijación. Como se observa en la Figura 3-12, cada tornillo tiene unas restricciones diferentes, por lo que hay diferentes condiciones de contorno.

Corte (cutting): la función de esta fase del proceso es separar la pieza final y los soportes de la placa base. Hay que prestar especial atención a esta fase debido a que puede rotar o mover la pieza ligeramente una vez terminada. Para ver dichos desplazamientos es conveniente comparar la forma final con la inicial.

Como se observa en la Figura 3-13, el programa permite elegir entre 2 modos de corte: direccional o arbitrario. En las simulaciones realizadas únicamente se empleará el corte direccional puesto que, conociendo la dirección del corte, se puede estudiar su influencia en los resultados finales. De esta manera, habrá que indicar la dirección (sólo en los ejes paralelos a la placa base) y el sentido del corte así como la altura de éste. Hay que tener en cuenta que, para no eliminar material perteneciente a la pieza final, la altura del corte debe ser la distancia que se dejó entre la placa base y la pieza al posicionarla en la máquina el inicio del proceso.

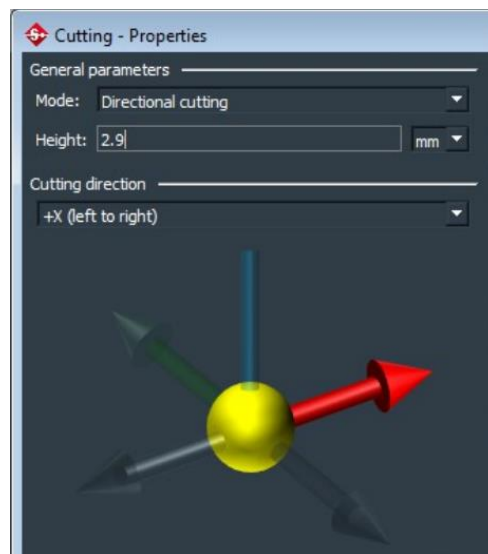


Figura 3-13. Fase de corte

Eliminación de soportes (Support Removal): en esta fase únicamente hay que elegir qué soportes deben ser eliminados. En el caso de las simulaciones realizadas, se eliminarán todos los soportes en todas ellas.

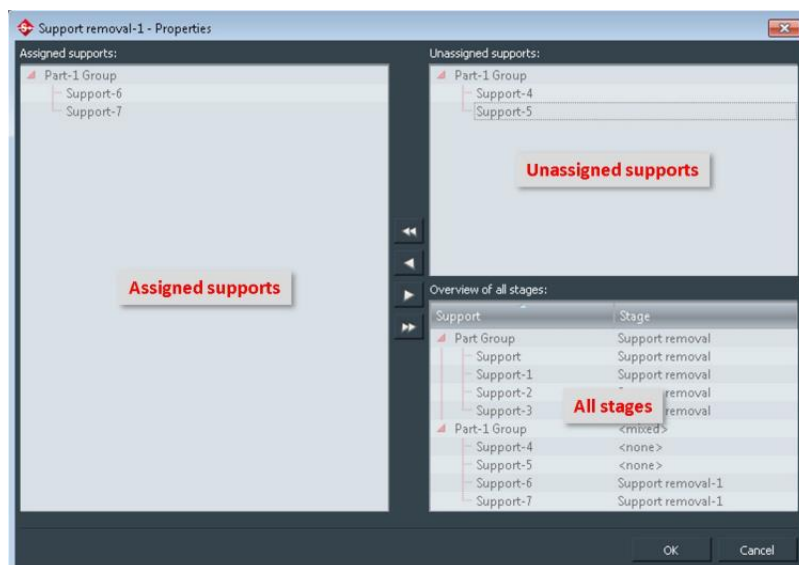


Figura 3-14. Fase de eliminación de soportes.

Así pues, todos los soportes que aparezcan en la ventana ‘unassigned supports’ se deberán pasar a ‘assigned supports’ para que sean eliminados.

Tratamiento térmico (Heat treatment): En esta fase se definen las características del tratamiento térmico que se aplica a los sólidos una vez están fabricados, tal y como se ha explicado en el capítulo 2. El software permite elegir entre 2 tipos de tratamientos térmicos [14]:

- Temperatura constante durante un tiempo determinado. En este caso habrá que definir tanto la temperatura del proceso como su duración.
- Tratamiento térmico transitorio. En este caso la temperatura varía en función del tiempo. Habrá que introducir la función o la gráfica que define el aporte de temperatura con el tiempo.

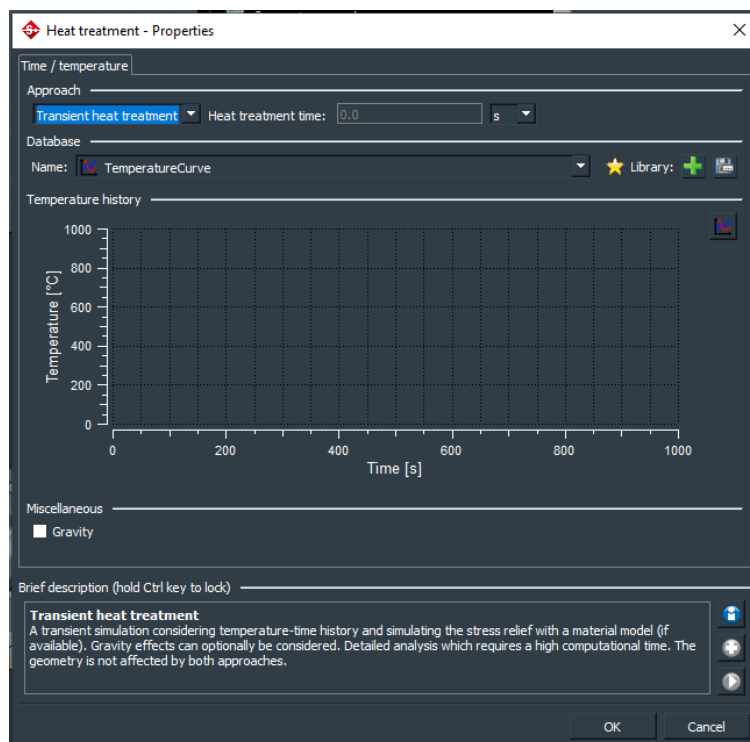


Figura 3-15. Fase de tratamiento térmico

HIP: En esta fase se definen los parámetros que afectan a este post tratamiento cuya finalidad se ha explicado en el capítulo 2. Para poder definir el proceso es necesario completar 3 pestañas de datos, éstas son [14]:

- La pestaña de tiempo/temperatura que es en la que se introduce la curva que definirá la variación de temperatura en función del tiempo, similar al caso del tratamiento térmico.
- La pestaña de tiempo/presión que es en la que se introduce la curva que definirá la variación de la presión aplicada al sólido en función del tiempo.
- La pestaña de densificación es opcional. En ella se calcula una curva que tiene en el eje de ordenadas la densidad relativa y en el eje de abscisas la presión aplicada en cada momento. Esta curva mostrará el grado de densificación que presenta el sólido en función de la presión que se le aplique. Para calcular dicha curva, el software sigue la siguiente expresión:

$$\rho = 1 - (1 - \rho_0) e^{-\left(\frac{3P}{2\sigma_{yield}}\right)} \quad (9)$$

Donde:

ρ_0 = la densidad relativa inicial

P = la presión aplicada

σ_{yield} = el límite elástico

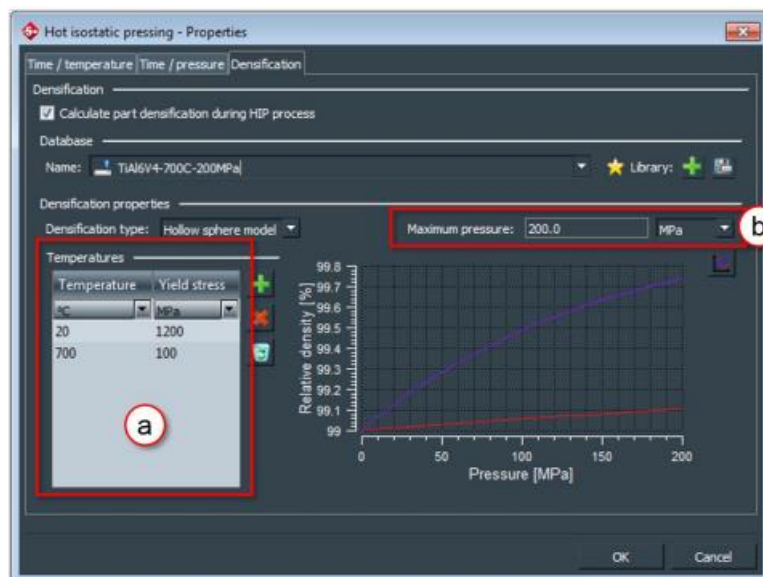


Figura 3-16. Fase HIP

3.3.4. Aplicación de análisis

Esta aplicación es el último paso de la definición de la simulación de la fabricación del sólido. Es la encargada de definir los mallados superficiales y volumétricos del sólido importado. Como el sólido es importado como un archivo STL (que en efecto es un mallado), no será necesario volver a mallar la superficie del sólido, aunque es posible.

Como se puede observar en la Figura 3-17, esta aplicación se compone de 4 subapartados que son para el mallado superficial, los elementos voxel, el mallado volumétrico y para los parámetros numéricos.

El primer subapartado está dedicado al mallado de la superficie. En este tipo de mallado solamente se emplean elementos triangulares bidimensionales y el único parámetro que habría que definir en este caso sería el tamaño máximo del elemento. Cabe mencionar que cuanto menor sea el tamaño del elemento, más precisa será la malla y, por tanto, también los resultados.

El segundo subapartado corresponde a los elementos voxel. Estos elementos son hexaedros que encierran en su interior tanto a la pieza final como a los soportes. Hay 2 formas de definir estos elementos voxel: de manera

uniforme o no uniforme. En caso de definirlos de manera uniforme, el elemento será un cubo debido a que tendrá las mismas dimensiones en los 3 ejes. En caso de definirlo de manera no uniforme, habrá que indicar la dimensión de cada uno de los ejes.

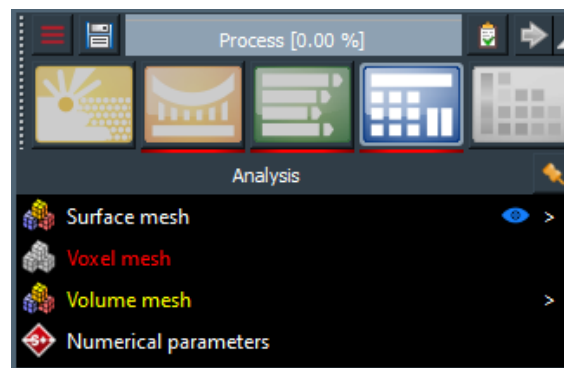


Figura 3-17. Aplicación del análisis

Estos elementos voxel tienen un significado físico y es que representan el número de capas de polvo que se simularán en cada iteración. Por ejemplo, si en la aplicación de fabricación se define un espesor de la capa de 0,05 mm y se le da una dimensión de 1 mm al eje 'z' (altura) del elemento voxel, este elemento encerraría 20 capas de material. Cuando el software realiza la simulación, en cada paso que da simula la construcción de todo el espesor de un elemento voxel. De esta manera, cuanto mayor sea la altura del elemento voxel menos pasos tendrá la simulación, pero el resultado será más impreciso debido a que simularía a la vez muchas capas, pudiendo no hacerlo de manera correcta.

En este subapartado también se pueden definir los elementos voxel de la placa base ya que éstos son independientes de los que encierran a la pieza y los soportes.

Para comprobar que el mallado de los elementos voxel se ha realizado correctamente, es conveniente consultar la fracción de volumen. Este ratio indica cuánto volumen del elemento voxel está realmente dentro de la geometría del sólido. Si en el interior del sólido hay fracciones de volumen distintas de 1, entonces el mallado no es correcto.

El tercer subapartado corresponde al mallado volumétrico. Simufact emplea elementos tetraédricos para realizar este mallado. La única variable que habría que definir en este subapartado es el tamaño máximo de los elementos de la malla.

Realizar este mallado es de vital importancia para poder exportar el sólido con toda la información de la simulación a otro programa que permita aplicar cargas al sólido con el fin de realizar un estudio mecánico. De no realizar este mallado, el sólido resultante se exportará sin información sobre la porosidad, tensiones residuales, distorsiones, desviaciones, etc.

El último subapartado que aparece en esta aplicación de análisis es el que permite definir los parámetros numéricos relacionados con el procesador del ordenador. Así pues, es posible elegir el número de núcleos que el ordenador empleará en realizar el proceso computacional, el tipo de solver (simple o en paralelo), el método computacional con el que se llegará a los resultados, etc.

3.3.5. Aplicación de resultados

Esta aplicación únicamente estará disponible cuando haya terminado de simularse el proceso de fabricación y es en la que se mostrarán los resultados de dicho proceso. Esta aplicación se compone de 2 o 3 subapartados: el subapartado referido a los resultados del mallado superficial, el subapartado referido al mallado de los elementos voxel y, si se ha realizado un mallado volumétrico, el subapartado referido a este mallado.

De todos los resultados que muestra Simufact, únicamente valoraremos los más representativos para estudiar la influencia de los parámetros de fabricación en la constitución del sólido. Estos son [14]:

- Desplazamiento total
- Tensión equivalente, que representa las tensiones residuales
- Posibilidad de fallo por fragilidad

- Densidad relativa, representa la porosidad
- Temperatura
- Desplazamiento plástico equivalente
- Desplazamiento elástico equivalente
- Límite elástico
- Triaxialidad
- Comparación de geometría con la inicial, representa las distorsiones.
- Desviación de la superficie

De esta aplicación se obtendrá el archivo que se exportará a un tercer programa para realizar el análisis mecánico. Este archivo contendrá tanto la información de la geometría final del sólido como la de los resultados que acaban de ser enumerados. El procedimiento que se debe seguir se desarrollará en el capítulo 4 de este texto.

4 FABRICACIÓN DE LA MANGUETA

En este cuarto capítulo se justifican las decisiones que se han ido tomando para fabricar virtualmente la mangueta optimizada topológicamente. Estas decisiones se toman en función del análisis de los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones realizadas. Dicho análisis también quedará reflejado en este capítulo.

Para definir el proceso de fabricación en el software Simufact, se ha seguido el orden en el que se ha explicado el uso de este programa en el capítulo anterior.

4.1. Primera iteración

4.1.1. Definición de la máquina

Una vez que se ha creado el proyecto en Simufact, el primer paso a dar es elegir la máquina con la que se llevará a cabo la simulación del proceso. Ésta será una máquina real, pues carecería de sentido obtener como resultado unas condiciones de fabricación que no se puedan abordar con las máquinas actuales del mercado.

Para la fabricación de sólidos mediante SLM, Simufact ofrece las máquinas presentadas en el apartado 3.3.2. del anterior capítulo. Dichas máquinas pertenecen al fabricante SLM SOLUTIONS.

La máquina elegida para llevar a cabo el proceso de fabricación es la 280HL debido a que su cámara de fabricación es la que mejor se ajusta a las dimensiones de la mangueta, siendo necesaria una menor cantidad de polvo. Otra razón por la que se ha elegido esta máquina es por los revestimientos de silicona que presenta en su interior, permitiendo de este modo fabricar estructuras delicadas con una mayor calidad. Las características técnicas de a máquina se muestran en la Figura 4-1. y se han obtenido del catálogo del fabricante.

System parameters	
Build Envelope Volume in mm (x/y/z)	280 x280 x 360
Laser power	400/1000 W or 2x 400 W Yb-Fiber-Laser
Build speed	20 ccm/h / 45 ccm/h
Pract. Layer Thickness	20 µm - 75 µm / 100 µm
Min. Scan Line / Wall Thickness	150 µm / 1000 µm
Operational Beam Focus	80 - 120 µm / 700 µm
Scan speed	15 m/s
Inert Gas Consumption in Operation	Ar/N ₂ , 2,5 l/min - 3,0 l/min
Inert Gas Consumption Venting	Ar/N ₂ , 1700 l @ 100 l/min.
Compressed Air Requirement	ISO 8573-1, 18 l/min. @ 1.5 bar
Dimensions in mm (B x H x T)	1800 x 1900 (2400) x 1020
Weight	approx. 1000 kg
E-Connection / Consumption	400 Volt 3NPE, 32 A, 50/60 Hz, 8 KW

Subject to technical changes

Figura 4-1. Características técnicas SLM Solutions 280HL [31]

Gracias a esta información el rango de los parámetros de fabricación en el que se puede trabajar está acotado por estas características, lo que simplifica el análisis de sensibilidad de los parámetros de fabricación.

4.1.2. Importación del sólido

El sólido importado será el mismo en todas las iteraciones de la simulación que se realicen debido a que, si éste se modifica, no es posible determinar la sensibilidad de los parámetros de la fabricación sobre los resultados finales y además, se estaría estudiando un sólido diferente al resultante del proceso de optimización topológica.

El formato en el que se importará el sólido será STL. Este formato de archivo es capaz de describir un archivo CAD mediante su geometría únicamente. Para ello, aproxima la geometría externa del modelo mediante triángulos planos. Estos triángulos estarán definidos por un vector normal que apuntará siempre hacia el exterior del modelo. El tamaño de estos triángulos puede ser modificado por el usuario y, cuantos más triángulos tenga el archivo, de menor tamaño serán éstos y la geometría del STL se aproximará más a la forma real del modelo.

Al importar el sólido hay que elegir su disposición en la cámara de la máquina. En este caso, el sólido se situará en la posición central de la cámara, dejando la misma distancia a ambos lados y a una altura de 5 mm con respecto a la placa base. Esta altura se deja para que la pieza final no esté en contacto con ella y al separarlos no se produzcan daños superficiales.

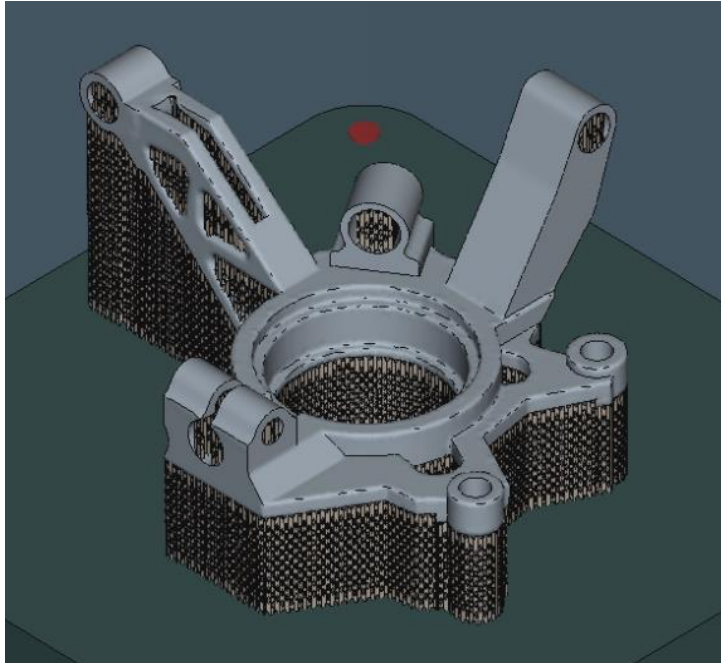


Figura 4-2. Soportes del sólido

En el segundo capítulo de este texto se ha explicado que, para que el sólido presente menores tensiones residuales, debe construirse sobre su superficie de mayor área. De este modo la orientación de la pieza es la que se muestra en la Figura 4-2.

4.1.3. Creación de los soportes

Una vez que se ha posicionado la pieza en la cámara de la máquina, se generarán los soportes para la fabricación. Éstos se generarán de forma automática gracias a la opción que el software ofrece para ello, quedando como se muestra en la Figura 4-2.

4.1.4. Elección del material

Originalmente, el material del que estaba compuesta la mangueta era el acero al carbono fundido, cuyas características se muestran en la Figura 4-3. Tanto en el estudio mecánico que se le realizó al sólido como en el proceso de la optimización topológica, se tuvieron en cuenta las características de este material.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2e+11	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.32	N/D
Módulo cortante	7.6e+10	N/m ²
Densidad de masa	7800	kg/m ³
Límite de tracción	482549000	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico	248168000	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica	1.2e-05	/K
Conductividad térmica	30	W/(m·K)
Calor específico	500	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Figura 4-3. Propiedades del acero al carbono fundido [11]

Sin embargo, los materiales disponibles en Simufact para realizar la simulación de la fabricación son únicamente los que se encuentran en forma de polvo, y entre estos no se encuentra el material original del que estaba compuesta la mangueta.

Esto supone un problema debido a que la geometría optimizada de la mangueta se ha obtenido en base a las propiedades de un material que no será el material final cuando se fabrique mediante SLM.

Como se ha indicado en el capítulo 1, el proceso de la optimización topológica se basa en la Ley de Hooke, utilizándola implícitamente en la función objetivo del problema para maximizar la rigidez del sólido. De este modo, el material que se elija para llevar a cabo la fabricación debe ser un acero con propiedades similares a las del acero de partida, siendo especialmente importante que el módulo de Young sea lo más parecido posible, pues es el parámetro principal de la optimización topológica. De lo contrario, el estudio no sería válido ya que con un módulo de Young diferente, la geometría optimizada que se obtendría también lo sería.

De los aceros disponibles en Simufact, se ha elegido el MS1-MPM. Este material es un acero para herramientas martensítico que posee las siguientes características [10,22]:

- Módulo de Young: 1,92e11 N/m²
- Coeficiente de Poisson: 0,3
- Límite elástico: 1100 MPa
- Densidad: 7800 kg/m³
- Coeficiente de expansión térmica: 1,07e-5 1/K
- Conductividad térmica: 27,5 W/(m·K)
- Calor específico: 480 J/(kg·K)

Tanto los datos recogidos en esta lista como los que se muestran en la Figura 4-3 son a temperatura ambiente y como se puede observar, no son valores exactos pero sí que son bastantes similares, sobre todo en el caso del módulo de Young (el parámetro que más afecta). De este modo, se da por válido el material para llevar a cabo la simulación de la fabricación.

La placa base estará compuesta del mismo material que el resto del sólido, debido a que el polvo tiene la misma naturaleza y se encuentra en la misma cámara de la máquina.

4.1.5. Definición de los parámetros de fabricación

Esta parte corresponde a la aplicación de fabricación y optimización del software, la cual ha sido explicada en el tercer capítulo. En esta aplicación, el primer paso será definir las fases que formarán parte de la simulación del proceso de fabricación. Estas fases serán las siguientes:

- Fabricación
- Corte
- Eliminación de soportes

En la primera simulación no se tendrá en cuenta ningún tipo de tratamiento térmico. Será a partir de los resultados de esta simulación cuando se determinará si es necesario aplicarlo o no.

Los parámetros que se definirán en este subapartado serán los correspondientes a la primera fase de fabricación y se dividen en 3 partes.

Parámetros de fabricación: dentro de estos parámetros se encuentran los referidos al láser, a la capa y al flujo de calor. Para el láser los parámetros de esta primera simulación son [15]:

- Potencia = 1000 W
- Velocidad de escaneo = 1000 mm/s
- Eficiencia = 25 %
- Ancho haz del láser = 0,8 mm

En cuanto a la capa, los parámetros son los siguientes:

- Espesor de la capa = 0,05 mm
- Tiempo de recuperación = 10 s
- Estrategia de escaneo = En forma de tablero de ajedrez y con una distancia entre pasadas de 0,7 mm

Y en cuanto al flujo de calor se tiene que:

- Factor de expansión de volumen = 0,6

La elección de estos valores se ha realizado con el siguiente criterio y estando en todo momento en los rangos permitidos por la máquina 280HL. En el segundo capítulo se ha explicado que, para conseguir una buena densidad de la pieza, la energía suministrada debe ser alta. Esta energía es directamente proporcional a la potencia del láser e inversamente proporcional a la velocidad de escaneo, la distancia entre pasadas y el espesor de la capa.

Es por ello por lo que se ha optado por empezar a simular el proceso con la máxima potencia que es capaz de dar la máquina y con una velocidad de escaneo bastante inferior al máximo permitido (15 m/s). Del mismo modo, el espesor de la capa es un valor bajo aunque no es el mínimo al que es capaz de llegar la máquina.

En cuanto a la distancia entre pasadas se puede observar cómo el ancho del haz del láser es mayor a la distancia entre pasadas. Esto es debido a que no toda la energía se aporta por igual en todo el ancho del láser, sino que es mayor en la zona central y menor en las zonas más alejadas del centro. Para asegurar que

no queda ninguna parte del polvo sin fundir completamente, se ha optado por que el valor de la distancia entre pasadas sea en torno a un 15% menor, que son aproximadamente las pérdidas que tiene el haz del láser.

Además, la distancia baja entre pasadas y la estrategia de escaneo en forma de tablero de ajedrez favorece la calidad superficial de la pieza, el aumento de densidad y unas menores tensiones residuales.

En el capítulo 1 se explicó que el radio del filtro empleado en la optimización topológica representaba el ancho mínimo que podía existir en el sólido, identificándose este radio del filtro con el ancho del láser. Como se empleó un radio del filtro de 5,34 mm, la máquina podrá abordar por completo la fabricación de la geometría sin ningún tipo de problema debido a sus características técnicas. En cuanto al tiempo de recuperación, a porcentaje de la eficiencia y al factor de expansión del volumen, se han empleado los valores por defecto de la máquina y del material.

Parámetros térmicos: en esta parte se definen los parámetros referidos a la pieza y los soportes y a la placa base. En cuanto a la pieza y los soportes [15]:

- Temperatura inicial del polvo = 25 °C
- Temperatura cámara = 200°C
- Emisividad = 0,85
- Coeficiente de transmisión de calor = curva del material mostrada en la Figura 4-4.

En cuanto a la placa base:

- Temperatura inicial de la placa = 25 °C
- Temperatura después del precalentamiento = 200 °C
- Tiempo de precalentamiento = 1800 s

Tanto la temperatura inicial del polvo como de la placa base será la temperatura ambiente y, como se ha explicado en el capítulo 2, el aumento de la temperatura inicial se traduce en una disminución de las tensiones residuales presentes en el sólido tras el proceso, por lo que se realizará un precalentamiento de la cámara y de la placa base hasta 200 °C en 1800 s (valores escogidos por defecto de la máquina).

En cuanto al coeficiente de transmisión de calor, éste no será un valor constante si no que dependerá de la temperatura. La curva que define este comportamiento la ofrece la biblioteca de materiales de Simufact pero, en este caso, hay que introducir la curva de manera manual. Esta curva se muestra en la Figura 4-4.

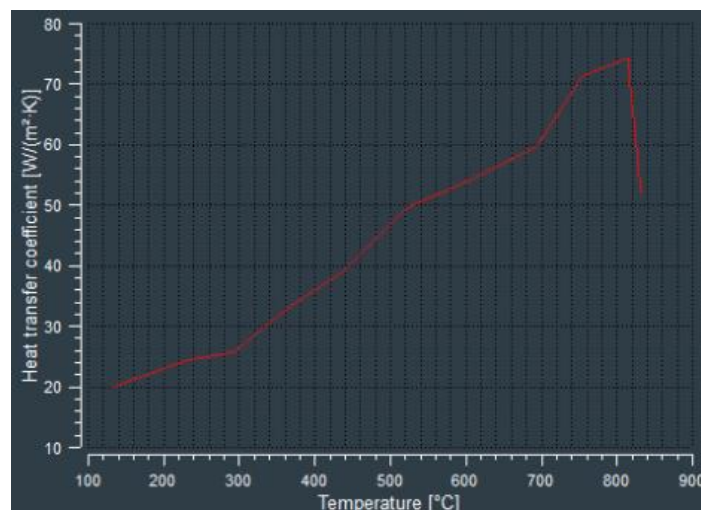


Figura 4-4. Curva coeficiente de transmisión de calor

Parámetros post fabricación: en esta parte se define cuándo se realizará el proceso de enfriamiento y hasta que temperatura debe llegar el sólido final. En el caso de esta primera simulación, dicho proceso de enfriamiento se realizará una vez que termine el proceso de eliminación de soportes y se enfriará hasta la temperatura ambiente (25 °C).

4.1.6. Definición de los parámetros del proceso de corte

Cómo se ha visto en el tercer capítulo, en este caso únicamente hay que introducir la dirección en la que se realizará el corte que separará el sólido de la placa base y hasta que altura se debe realizar con respecto a la placa base.

En el caso de esta primera simulación, la dirección del corte será en sentido positivo del eje X y hasta una altura de 5 mm, la misma altura que se había dejado cuando se posicionó el sólido en la cámara de la máquina.

4.1.7. Definición del proceso de eliminación de soportes

En este caso, la definición de este proceso es sencilla pues únicamente hace falta indicar que se deben eliminar todos los soportes que se muestran en la Figura 4-2. En total serían 25 soportes los que hay que eliminar.

4.1.8. Definición de los mallados

Como se ha visto en el tercer capítulo, en el proceso son necesarios 3 tipos de mallados: el mallado superficial, el mallado de elementos voxel y el mallado volumétrico (esencial para la exportación de los resultados).

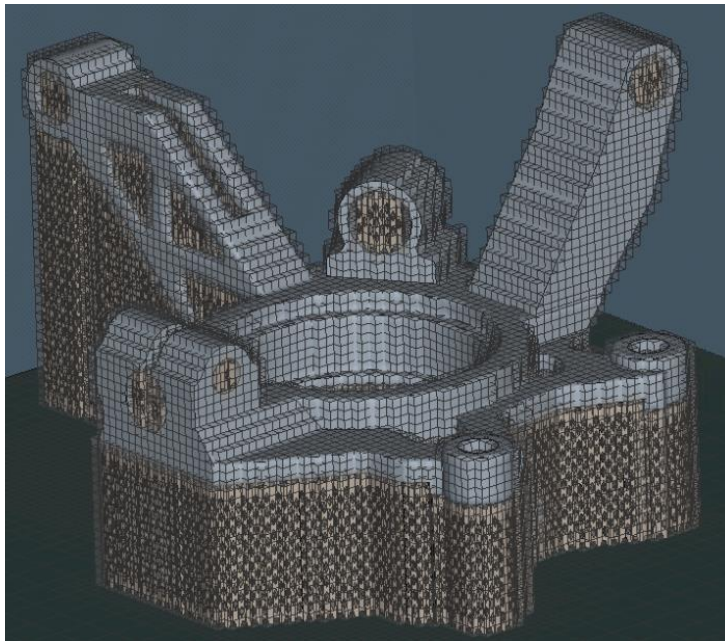


Figura 4-5. Mallado con elementos Voxel

1. *Mallado superficial:* la malla del sólido se ha importado en Simufact Additive con un formato STL. Este formato, por naturaleza, contiene únicamente la información de la frontera del sólido, es decir, de su superficie. Como la malla importada está formada por un número elevado de elementos triangulares 2D para asegurar la precisión, no será necesario realizar un mallado superficial nuevo, se aprovechará el mallado original de la superficie del sólido.

2. *Mallado voxel*: como se ha indicado en el tercer apartado del tercer capítulo de este texto, los elementos voxel representan la cantidad de capas de polvo que se simularán en cada iteración. Estos elementos voxel tienen forma de hexaedros (Figura 4-5) y albergarán en su interior a todo el sólido. Para evitar que el número de iteraciones sea demasiado elevado, pues aumentaría tanto el coste computacional como el tiempo de simulación, se ha determinado que la cota del elemento voxel sea de 2 mm en cada uno de sus lados. Como el espesor de la capa es de 0.05 mm, en cada una de las iteraciones Simufact Additive simulará 40 capas.
3. *Mallado volumétrico*: en este caso sí será necesario realizar un mallado dentro de Simufact Additive porque, como se ha indicado, la malla importada únicamente tiene información de la frontera del sólido y no de su interior. Para realizar este mallado se han empleado elementos tetraédricos y, como en el caso del mallado superficial, se han aprovechado las dimensiones de la malla importada.

De esta manera, la malla volumétrica se compone de 64328 elementos y 17824 nodos.

4.1.9. Análisis de los resultados

Una vez introducidos todos los parámetros que definen el proceso de fabricación, se procede a iniciar la simulación. Cuando termina el proceso, en la aplicación de resultados se pueden consultar un gran número de ellos pero únicamente se revisarán los siguientes, considerándolos los más relevantes para llegar al objetivo deseado:

- Deformación elástica (Figura 4-6)
- Deformación plástica (Figura 4-7)
- Densidad relativa (porosidad) (Figura 4-8)
- Desplazamientos totales (Figura 4-9)
- Desviación de la superficie (Figura 4-10)
- Flujo térmico (Figura 4-11)
- Temperatura (Figura 4-12)
- Tensiones residuales (Figura 4-13)

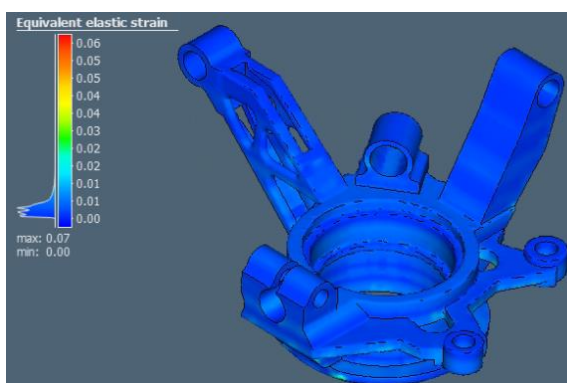


Figura 4-6. Deformación elástica

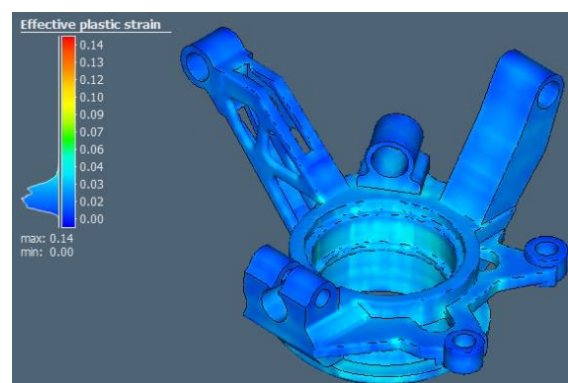


Figura 4-7. Deformación plástica

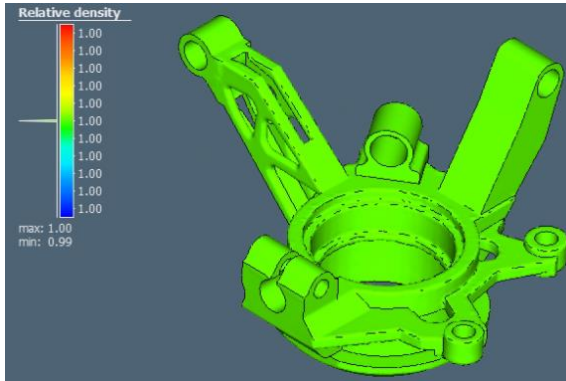


Figura 4-8. Densidad relativa

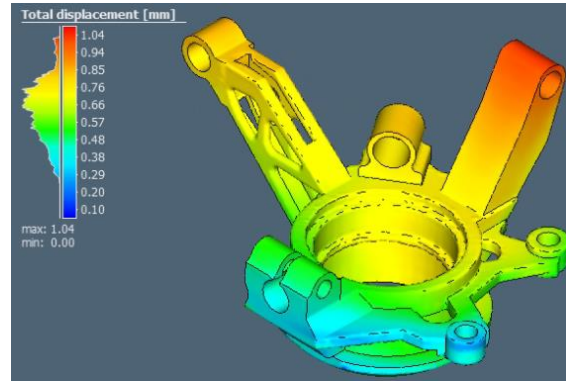


Figura 4-9. Desplazamientos totales

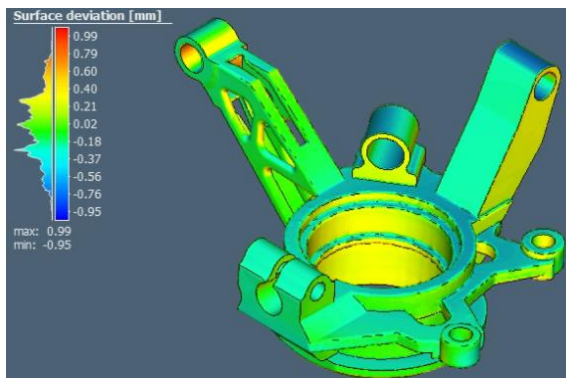


Figura 4-10. Desviación de la superficie

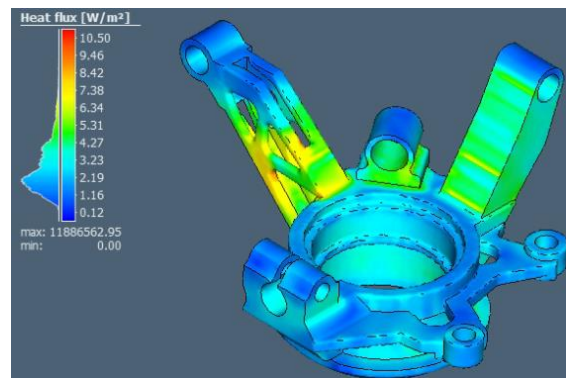


Figura 4-11. Flujo térmico

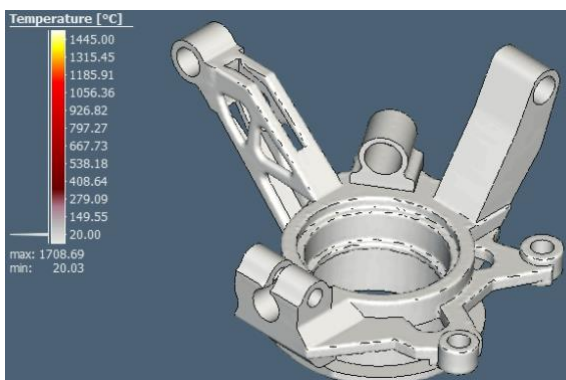


Figura 4-12. Temperatura

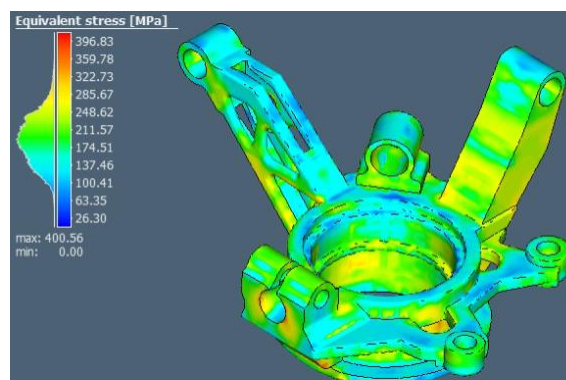


Figura 4-13. Tensiones residuales

En una primera vista se puede comprobar que tanto las deformaciones plásticas como las deformaciones elásticas producidas durante el proceso de fabricación son del orden del 1%, siendo mayores en el caso plástico que en el elástico.

En cuanto a los desplazamientos totales y a la desviación de la superficie se puede observar que no son excesivos y que, en principio, no afectarán a la colocación de la pieza en el lugar que le corresponde en el sistema de suspensión del automóvil.

En cuanto a la densidad relativa, se observa que prácticamente la totalidad de la pieza tiene una densidad relativa cercana al 100% o del 100% por lo que se puede concluir que la porosidad será baja.

Si se presta atención a las tensiones residuales resultantes del proceso se puede observar que, en el sólido, el rango de estas tensiones es [90, 320] MPa. En principio se puede llegar a pensar que son demasiado altas pero, para poder certificar si con estas tensiones residuales el sólido será funcional es necesario realizar un estudio mecánico aplicando las cargas a las que estará sometido en servicio.

Este estudio mecánico no se puede realizar con Simufact Additive, si no que será necesario emplear un software de análisis de elementos finitos que sea capaz de leer los resultados de Simufact Additive para que no se pierda la información de la simulación. El software que se empleará es del grupo HEXAGON, al igual que Simufact Additive, y es Marc MENTAT.

4.2. Estudio de la influencia de los parámetros de fabricación sobre los resultados

En este segundo apartado del cuarto capítulo se analizará la influencia de los parámetros de fabricación sobre los resultados del proceso por medio de la realización de diferentes simulaciones en las que se variará un parámetro específico en cada una de ellas, con el objetivo de optimizar los resultados en tensiones residuales. La variación de los parámetros se hará en base a la teoría expuesta en el cuarto apartado del segundo capítulo de este texto. Se empezará realizando el estudio a los parámetros que afectan directamente a las tensiones residuales y posteriormente se estudiarán aquellos que lo hacen de una forma más tangente.

4.2.1. Influencia de la estrategia de escaneo

Teóricamente la estrategia de escaneo es el parámetro que más influye en las tensiones residuales que se alcanzan en la pieza tras la fabricación. Es por esta razón por la que se analizará su influencia en primer lugar.

La simulación se ha realizado manteniendo todos los parámetros de la primera iteración variando únicamente la estrategia de escaneo, la cual ha pasado de ser una estrategia en tablero de ajedrez a una estrategia unidireccional, tal como se muestra en la Figura 4-14.

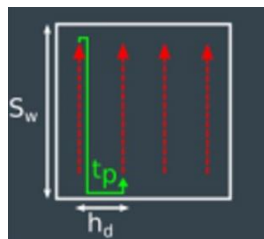


Figura 4-14. Estrategia de escaneo unidireccional

Para que haya coherencia y el área de trabajo del láser sea igual en esta simulación que en la de la primera iteración, el parámetro S_w será en este caso de 10 mm y no de 5 mm como en el caso en el que la estrategia de escaneo es en tablero de ajedrez. Para esta última estrategia de escaneo, el parámetro S_w viene definido en la Figura 3-10.

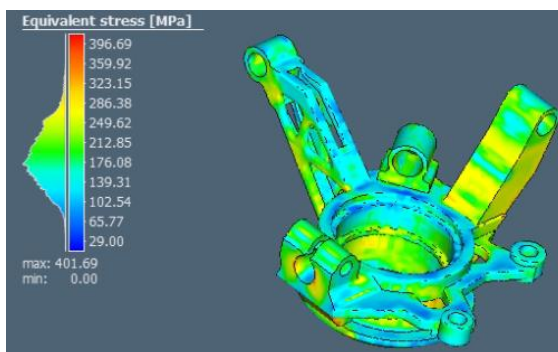


Figura 4-15. Tensiones residuales estrategia escaneo

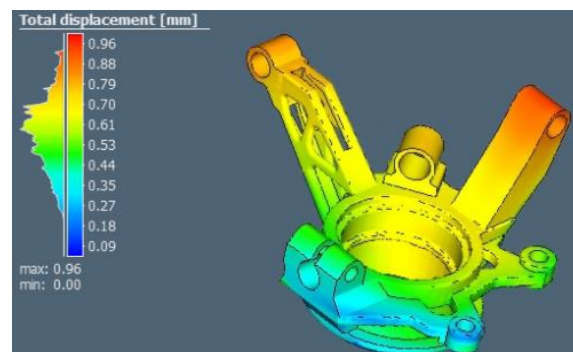


Figura 4-16. Desplazamientos estrategia escaneo

Los resultados obtenidos en esta simulación muestran un aumento del rango de tensiones residuales que se alcanzan en la pieza tal y como se muestra en la Figura 4-15, por lo tanto aunque las tensiones residuales mínimas disminuyen, las máximas aumentan y éstas últimas serán más críticas que las mínimas a la hora

de llegar a la plastificación del material en servicio, por lo que se comprueba que se cumple lo que teóricamente se explicó en capítulos anteriores: las tensiones residuales son menores cuando la estrategia de escaneo elegida es en forma de tablero de ajedrez y no unidireccional. El rango de tensiones residuales pasaría a ser de [90-320] MPa (en el caso de la primera iteración) a [70-335] MPa (en el caso de esta simulación).

Es interesante tener en cuenta los resultados referidos a los desplazamientos totales pues éstos disminuyen con respecto a la primera iteración mientras que el resto de resultados son bastante similares. Aunque se produzca un menor desplazamiento (Figura 4-16), es más relevante el aumento de las tensiones residuales, por lo que se concluye que, para buscar optimizar el proceso de fabricación con el objeto de que se produzcan las menores tensiones residuales, la estrategia de escaneo debe ser en tablero de ajedrez.

4.2.2. Influencia de la longitud de escaneo

Otros de los parámetros con mayor influencia sobre la aparición de tensiones residuales en el material es la longitud de escaneo. La longitud de escaneo empleada en la primera iteración se calculó de manera automática por el software empleado mientras que las usadas en este análisis han sido introducidas manualmente.

Así pues, se tienen las siguientes longitudes de escaneo:

- Primera iteración: 0.7 mm
- Simulación 1: 0.4 mm
- Simulación 2: 2.4 mm

El resto de los parámetros de fabricación se mantendrán invariables para poder comparar de una manera más precisa los resultados de las simulaciones.

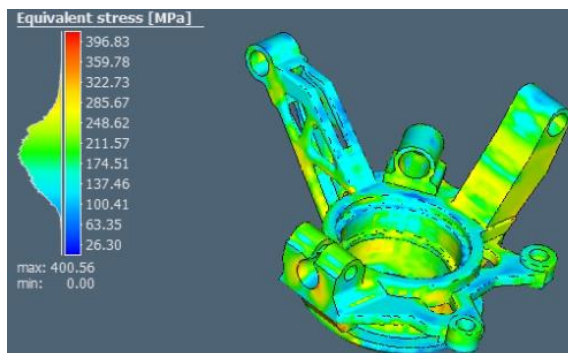


Figura 4-17. Tensiones residuales longitud escaneo S1

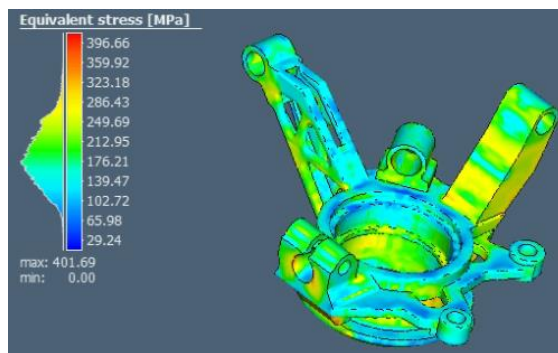


Figura 4-18. Tensiones residuales longitud escaneo S2

Partiendo de que el rango de tensiones residuales en el que se encuentra la pieza de la primera iteración es [90-320] MPa, se puede observar que, tanto en los resultados de la simulación 1 (Figura 4-17) como en los de la simulación 2 (Figura 4-18), este rango aumenta, siendo más considerable el aumento en el caso de la segunda simulación.

Si se comparan los resultados de ambas simulaciones, se puede apreciar como en el caso de la simulación 2, la franja verde y amarilla es mayor que en el caso de la simulación 1, lo que denota que hay un mayor volumen de la pieza con tensiones residuales más altas.

En este caso se cumple parcialmente lo esperado teóricamente, es decir, que no siempre que se disminuye la longitud de escaneo van a aparecer unas tensiones residuales menores en el material, llega un punto en el que reducir demasiado esta longitud se vuelve contraproducente para el material, aumentando las tensiones residuales.

Es por esta razón por la que se concluye y se decide que para las siguientes simulaciones se escogerá como longitud de escaneo la calculada automáticamente por el software, entendiendo que éste calcula la mejor longitud de escaneo posible en función de los demás parámetros introducidos en el proceso.

4.2.3. Influencia de la temperatura inicial

Este parámetro es el último que tiene una influencia directa sobre las tensiones residuales que se alcanzan en el material tras el proceso de fabricación. En la teoría se ha visto que a medida que aumenta la temperatura inicial del polvo en la cámara de la máquina, menores tensiones residuales aparecen en el material.

Es por ello por lo que se ha realizado una simulación en la que se ha definido el proceso de fabricación manteniendo los parámetros de la primera iteración variando únicamente la temperatura inicial del polvo. De este modo, la temperatura inicial del polvo pasará de ser de la temperatura ambiente (25 °C) a 300 °C.

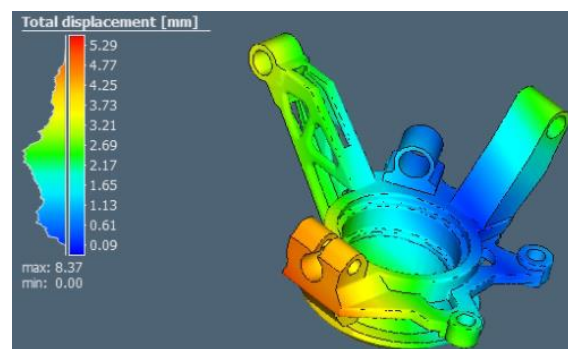
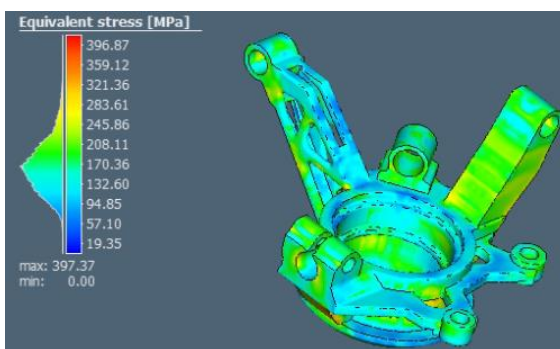


Figura 4-19. Tensiones residuales temperatura inicial Figura 4-20. Desplazamientos totales temperatura inicial

Analizando los resultados de las tensiones residuales mostrados en la Figura 4-19, se puede observar cómo aproximadamente el 90% del volumen de la pieza presenta unas tensiones residuales menores a 245 MPa (75 MPa menores que las tensiones máximas de la primera iteración) por lo que, como teóricamente se esperaba, las tensiones residuales disminuyen al aumentar la temperatura inicial del sólido. Además, se puede ver como las tensiones residuales mínimas son 60 MPa, considerablemente menores que en la primera iteración y, por otra parte, la zona azul y verde es la dominante en el volumen de la pieza, significando que las tensiones bajas son las dominantes.

En contraposición, los desplazamientos totales de la pieza aumentan de manera considerable, provocando distorsiones y desviaciones de la superficie. Esto puede dar problemas en el montaje de la pieza en su lugar de trabajo debido a que tiene que unir numerosos sistemas del automóvil. Es por esto por lo que no se puede validar por completo esta simulación. Habrá que buscar la manera de realizar una simulación aumentando la temperatura inicial de la pieza pero sin que se produzcan unos desplazamientos tan grandes.

Para ello se analizará la influencia de los parámetros que tienen influencia indirecta sobre las tensiones residuales como son la velocidad de escaneo y la potencia del láser.

4.2.3.1. Influencia de la velocidad de escaneo

El primero de los parámetros que no tiene una dependencia directa con los resultados en tensiones residuales que se estudiará, será la velocidad de escaneo. Hasta el momento, en las simulaciones que se han realizado se ha utilizado una velocidad de escaneo de 1000 mm/s. Aunque no es la velocidad máxima permitida por la máquina, es una velocidad de escaneo alta. Al no tener una influencia directa sobre las tensiones residuales, la elección de la velocidad de escaneo ha venido determinada por la reducción del tiempo del proceso.

Así pues se ha realizado una simulación en la que se han mantenido invariables los parámetros de la anterior simulación (apartado 4.2.3.) a excepción de la velocidad de escaneo, la cual se ha bajado a 600 mm/s. Los resultados se muestran tanto en la Figura 4-21 como en la Figura 4-22.

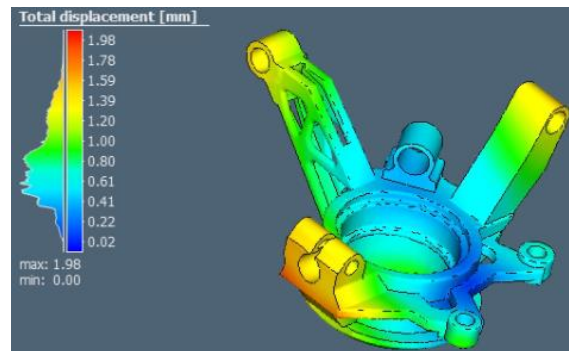
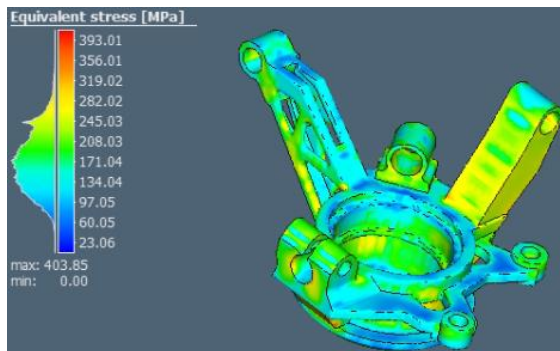


Figura 4-21. Tensiones residuales velocidad escaneo Figura 4-22. Desplazamientos totales velocidad escaneo

En la Figura 4-21 se observa cómo las tensiones residuales apenas varían en comparación con la Figura 4-19 por lo que se obtiene lo esperado teóricamente, al no haber apenas dependencia de las tensiones residuales con la velocidad de escaneo.

Sin embargo, sí que se puede apreciar una importante reducción de los desplazamientos totales si se compara la Figura 4-22 con la Figura 4-20. Como se ha visto en el capítulo 2, disminuir la velocidad de escaneo se traduce en un aumento de la energía suministrada, provocando que la viscosidad del líquido disminuya permitiendo una mejor unión del material, hecho que estaría detrás de alcanzar menores desplazamientos. Los desplazamiento obtenidos empiezan a ser compatibles con un buen montaje de la pieza en su lugar de trabajo, por lo que se concluye que la disminución de la velocidad de escaneo contribuye a mejorar las propiedades del sólido resultante cuando se aumenta la temperatura inicial del polvo en el proceso.

4.2.3.2. Influencia de la potencia del láser

En todas las simulaciones realizadas hasta el momento se ha empleado la máxima potencia del láser que la máquina de fabricación es capaz de desarrollar. De esta manera, estaba asegurado que el láser iba a ser capaz de fundir el polvo por completo.

Al aumentar la temperatura inicial del polvo, no será necesario que la potencia del láser sea el máximo, pues se requerirá un menor aporte de energía para alcanzar la fusión, por lo que ésta se ha reducido a 700 W. Por otra parte, mantener una potencia del láser alta, puede hacer que se produzcan salpicaduras durante la fabricación o el efecto balling, lo cual es contraproducente debido a que se traduce en un aumento de la porosidad y, por tanto, una menor densidad relativa.

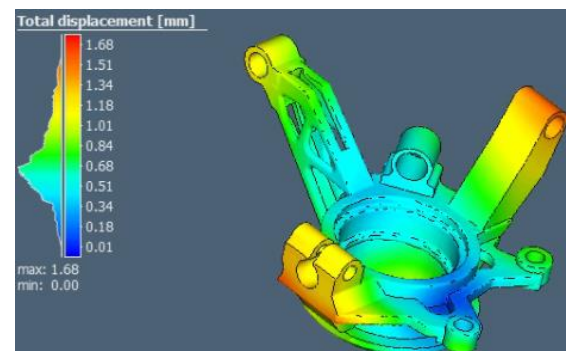
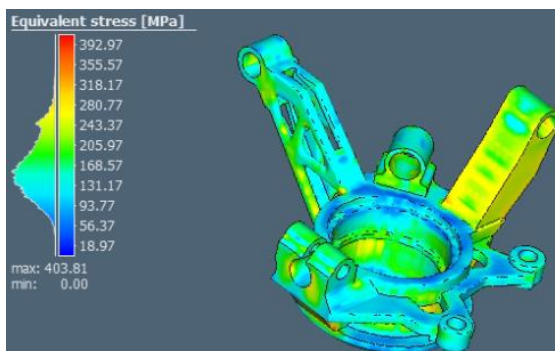


Figura 4-23. Tensiones residuales potencia

Figura 4-24. Desplazamientos totales potencia láser

En la Figura 4-23 se ve cómo el rango de tensiones residuales alcanzado como resultado de esta simulación es muy similar al de las Figuras 4-19 y 4-21, por lo que una vez más se demuestra la poca influencia de este parámetro sobre las tensiones residuales. Si bien es cierto, en este último caso, el volumen de la pieza con unas tensiones residuales más cercanas a las máximas del rango ha crecido en comparación con las otras 2.

En cuanto a los desplazamientos, los que se muestran en la Figura 4-24 son ligeramente menores que los mostrados en la Figura 4-22. En ambos casos, los resultados son muy similares a los mostrados en el apartado 4.2.3.1.

4.2.3.3. Influencia de ambos parámetros

Viendo que la influencia de ambos parámetros es bastante similar, resulta interesante ver la influencia conjunta que éstos tienen sobre los resultados finales, por lo que se ha realizado una simulación en la que se varían tanto la potencia del láser como la velocidad de escaneo. Así pues, se han utilizado los valores de los apartados 4.2.3.1 y 4.2.3.2 para dichos parámetros, mientras que el resto se han dejado invariables.

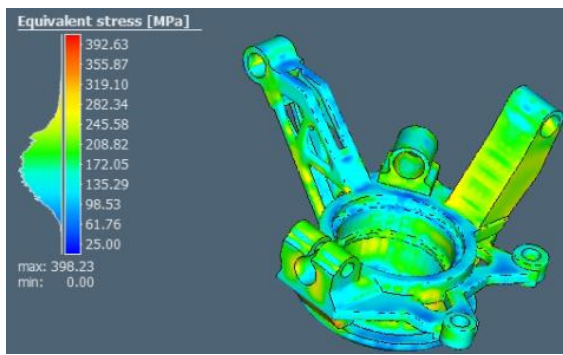


Figura 4-25. Tensiones residuales P y v

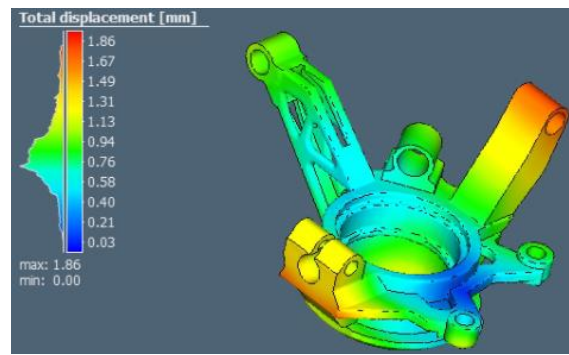


Figura 4-26. Desplazamientos totales P y v

En este caso, se ve en la Figura 4-25 cómo las tensiones son ligeramente mayores que en los casos anteriores habiendo más volumen de material con tensiones residuales por encima de los 280 MPa. En la Figura 4-26 se observa que los desplazamientos totales también han aumentado con respecto a los casos anteriores. Es por ello por lo que se descartará este caso y se elegirá mejor caso el del apartado 4.2.3.2 en el que la potencia del láser es de 700 W ya que tanto los desplazamientos como la tensión residual máxima son menores que en los demás casos.

5 POSTRATAMIENTOS

Hasta el momento, únicamente se han llevado a cabo simulaciones de los procesos de fabricación teniendo en cuenta 3 etapas: construcción, separación de la placa base y eliminación de los soportes. Estas simulaciones han dado lugar a unos resultados que han sido desglosados y analizados en capítulos anteriores de este texto.

El alcance del proyecto, como se ha determinado en el primer capítulo, es estudiar los parámetros más influyentes en la fabricación del sólido por medio de SLM, de tal manera que se diseñe un proceso de fabricación en el que se obtenga como resultado un pieza que pueda desarrollar sus funciones en servicio, es decir, que se comporte en todo momento como un sólido elástico sin llegar a plastificar. Para ello hay que prestar especial atención a las tensiones residuales originadas en el proceso de fabricación para que, sumadas a las tensiones a las que el sólido estará sometido en servicio, no sobrepasen el límite elástico.

En el análisis de los resultados realizado en capítulos anteriores se llegó a la conclusión de que las tensiones residuales obtenidas no eran despreciables, si no que podrían llegar a tener una influencia importante en el comportamiento de la pieza. Es por ello por lo que se decide someter a la pieza a un postratamiento. Este postratamiento tendrá como objetivo aliviar las tensiones residuales originadas en el sólido.

El postratamiento seleccionado para ello es un tratamiento térmico. Existen diferentes tipos de tratamientos térmicos dependiendo del objetivo que se quiera conseguir: temple, normalizado, recocido, revenido, etc. En este caso, con el objetivo que se quiere conseguir, el tratamiento térmico escogido es el recocido.

5.1. Tratamiento térmico de recocido

El recocido es un tratamiento térmico que consta de 3 fases:

1. Calentamiento de la pieza hasta la temperatura determinada.
2. Mantenimiento de la pieza a la temperatura determinada durante un periodo de tiempo definido.
3. Enfriamiento de la pieza desde la temperatura de la fase anterior hasta la temperatura ambiente. Este enfriamiento podrá ser controlado o al aire.

En estas 3 fases existen 2 variables fundamentales las cuales determinarán el tipo de recocido. Estas variables son el tiempo de calentamiento y de enfriamiento y en menor medida, el de duración del proceso, y la temperatura. En función de los valores elegidos para estas variables se obtendrán diferentes resultados debido a que el proceso de recocido tiene varios objetivos:

- Rebajar la dureza del material
- Aliviar tensiones residuales
- Aumentar la tenacidad, la plasticidad o la ductilidad
- Reducir el tamaño de grano o la segregación

Para lograr estos objetivos existen diferentes tipos de procesos que son:

- *Recocido de regeneración*: consiste en calentar el acero hasta temperaturas cercanas al punto A_3 y dejarlo enfriar lentamente. De esta forma se obtiene una microestructura de grano fino y se ablanda el acero al regenerar su estructura.
- *Recocido de globalización*: en este caso se calienta el acero hasta una temperatura intermedia entre los puntos A_1 y A_3 y posteriormente se deja enfriar lentamente.
- *Recocido subcrítico*: se calienta el acero hasta temperaturas inferiores al punto A_1 y, tras mantenerlo a esa temperatura durante un periodo de tiempo, se realiza un enfriamiento lento controlado o al aire. De esta manera se consigue ablandar el acero y eliminar las tensiones residuales.

- *Recocido isoterma*: con este tipo de recocido se consigue que la estructura y la dureza del acero sean los propios para el mecanizado con arranque de viruta. En este caso se calienta el acero por encima de la temperatura A_3 , se enfría rápidamente hasta la nariz perlítica del diagrama de transformación de fases y se mantiene a dicha temperatura hasta que se complete la transformación.

Teniendo presente el objetivo que se pretende alcanzar, el tipo de recocido que habrá que aplicar al sólido para reducir las tensiones residuales será un recocido subcrítico.

5.2. Definición de la ley de fluencia

En primer lugar, es necesario definir la ley de fluencia del material (“*creep law*”) debido a que ésta no viene definida por defecto en el software para el material seleccionado. Esta ley describe la deformación plástica como una función dependiente del tiempo y de la temperatura estando el material sometido a ciertas condiciones de carga tales como las tensiones residuales. Los efectos de la fluencia consiguen disminuir las tensiones residuales transformándolas en deformación plástica.

Esta ley de fluencia se representa mediante un diagrama ϵ - t (deformación-tiempo) tal como el de la Figura 5-1. En este diagrama se diferencian 3 fases, que dependen del comportamiento del material en cada una de ellas. De las 3 fases, únicamente la secundaria es interesante y aplicable a este estudio, por lo que es la única que se tendrá en cuenta. Esta fase secundaria se rige la ley de fluencia estacionaria (“*Steady creep law*”) la cual se define por medio de la siguiente expresión:

$$\epsilon'_s = A\sigma^n e^{\left(\frac{-Q_c}{RT}\right)} \quad (10)$$

Dónde:

ϵ'_s = velocidad de deformación por fluencia [1/s]

A = constante dependiente de la temperatura [1/Pa·s]

σ = tensión [Pa]

n = exponente de tensión

Q_c = energía de activación [J/mol]

R = constante universal de los gases [J/mol·K]

T = temperatura [K]

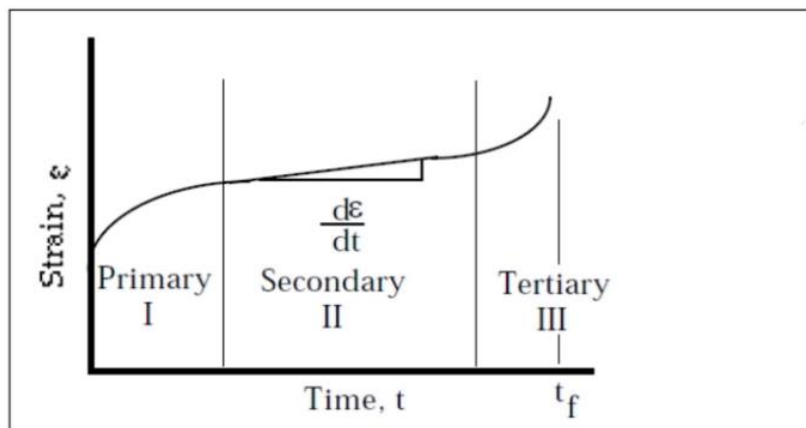


Figura 5-1. Diagrama ϵ - t [12]

En la Figura 5-1. el punto t_f se refiere al tiempo de fallo del material.

Los valores de los parámetros de la curva para el material empleado, el cual ha sido descrito en capítulos anteriores, se han obtenido a partir del estudio realizado por Gonçalves et al [12]. En el artículo donde se ha publicado se expone que:

$$Q_c = 388000 \text{ J/mol}$$

$$n = 6.8$$

$$R = 8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

El valor de la constante A no lo proporciona directamente el estudio pero se puede obtener a partir de los resultados mostrados en él. De esta forma en el artículo se indica que para una tensión de 500 MPa, los valores de la velocidad de deformación son los siguientes en función de la temperatura:

Temperatura [°C]	$\dot{\epsilon}_s$ [1/s]
550	1.91×10^{-7}
600	6.14×10^{-6}
650	1.31×10^{-4}

Tabla 5-1. Velocidad de deformación en función de T

Teniendo esta información, la única incógnita es la constante A. Para calcularla se empleará la temperatura de 550 °C y su velocidad de deformación. Así pues, se obtiene lo siguiente:

$$A = \frac{\dot{\epsilon}'_s}{\sigma^n e^{\left(\frac{-Q_c}{R \cdot T}\right)}} \quad (11)$$

En esta expresión, los datos deben ser introducidos en las unidades que se han descrito anteriormente, para que ésta sea dimensionalmente consistente. Por tanto, se obtiene el valor de A:

$$A = \frac{1.91 \times 10^{-7}}{(500 \times 10^6)^{6.8} \cdot e^{\left(\frac{-388000}{8.314 \cdot 823.15}\right)}} = 5.63 \times 10^{-42} \left[\frac{1}{\text{Pa} \cdot \text{s}} \right] \quad (12)$$

Es fácil comprobar cómo este valor de la constante A es válido para las otras 2 temperaturas, llegando a la velocidad de deformación que aparece en las tablas. Por tanto, la ley estacionaria de fluencia para el material empleado en el estudio de la fabricación queda definida por la siguiente expresión:

$$\dot{\epsilon}'_s = 5.63 \times 10^{-42} \cdot \sigma^{6.8} e^{\left(\frac{-388000}{8.314 \cdot T}\right)} \quad (13)$$

5.3. Aplicación del tratamiento térmico a la pieza

En este apartado se desarrollará el análisis del recocido subcrítico aplicado a la pieza obtenida para alcanzar el objetivo mencionado anteriormente.

Ante la falta de información específica encontrada sobre este tipo de tratamiento térmico en el material seleccionado, se ha decidido realizar un análisis de sensibilidad para ver la influencia de las condiciones del tratamiento térmico en las tensiones residuales resultantes. Para ello se tendrán en cuenta estudios encontrados en la bibliografía en los que se muestran tratamientos térmicos realizados a materiales similares o con diferente objetivo al buscado [27].

Se parte por tanto de los resultados obtenidos en la primera iteración mostrada en el cuarto capítulo, en la que se obtuvieron unos resultados cuyas tensiones residuales se encontraban en el siguiente rango [90, 320] MPa.

El primer caso de estudio se realizará para analizar la influencia de la temperatura a la que se realiza el tratamiento térmico. Todas las simulaciones del tratamiento térmico en este primer caso se realizarán con un tiempo de proceso isoterma de 1 hora, con una velocidad de calentamiento de 200 °C/h y con una velocidad de enfriamiento de 100 °C/h debido a que se ha encontrado en bibliografía que se obtienen buenos resultados para

casos análogos. Como el recocido subcrítico se realiza a temperaturas inferiores de la temperatura de austenización A1 (692.85 °C), el estudio se iniciará a una temperatura de 610 °C.

Los tratamiento térmicos simulados son los que se muestran en la Figura 5-2.

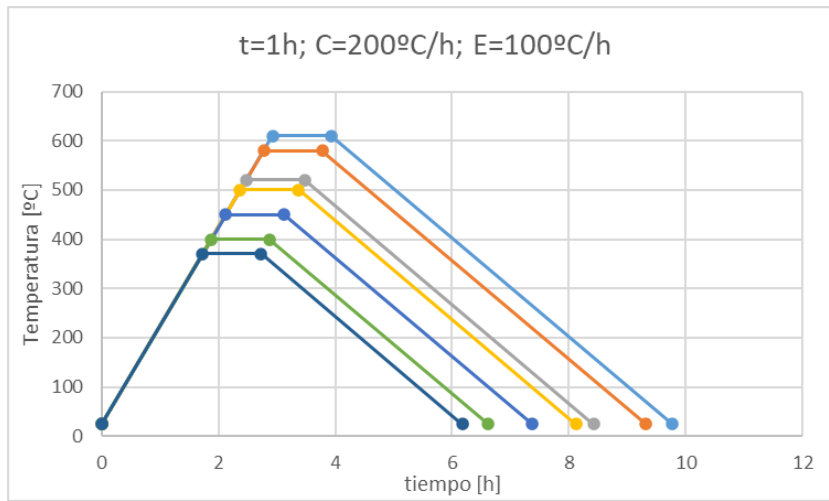


Figura 5-2. Tratamientos térmicos primer caso

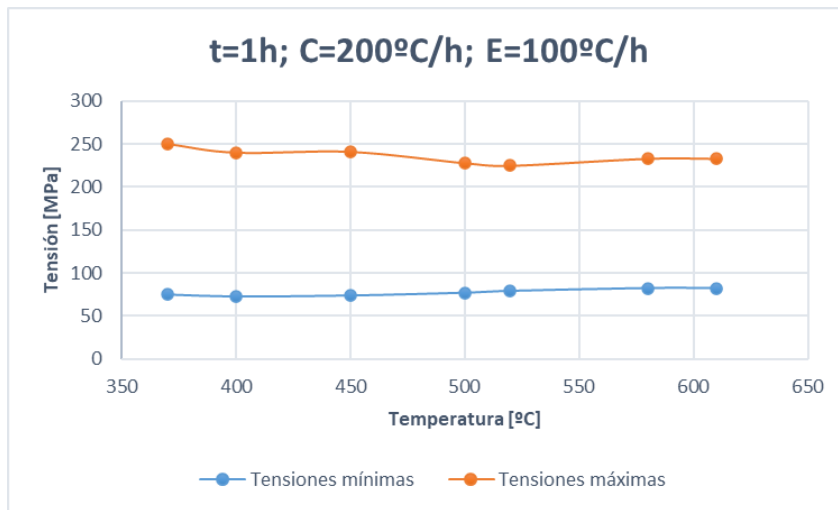


Figura 5-3. Resultados caso 1 análisis

T [°C]	Tensión mínima [MPa]	Tensión máxima [MPa]	Calentamiento [°C/h]	Enfriamiento [°C/h]
610	82	233	200	100
580	82	233	200	100
520	79	225	200	100
500	77	228	200	100
450	74	241	200	100
400	73	240	200	100
370	75	250	200	100

Tabla 5-2. Resultados caso 1 análisis

Los resultados obtenidos de este primer caso de análisis se muestran tanto en la Figura 5-3 como en la Tabla 5-2.

Como se puede observar en la Figura 5-3, a medida que aumenta la temperatura a la que se mantiene la pieza en el horno durante una hora, se va reduciendo ligeramente el rango de las tensiones residuales, es decir, disminuyen las tensiones máximas y aumentan las tensiones mínimas.

De todos los resultados obtenidos, destacan especialmente 2 de ellos. Estos son los casos en los que el proceso se realiza a 520 °C y 400 °C. En ambos casos hay un punto de inflexión. En el primer caso, cuando la temperatura del proceso es de 520 °C, se produce un punto de inflexión en las tensiones máximas obtenidas, es decir, se obtienen las menores tensiones máximas; mientras que en el segundo caso, cuando la temperatura del proceso es de 400 °C, se produce un punto de inflexión en las tensiones mínimas, es decir, se obtienen las menores tensiones mínimas.

A la hora de realizar un análisis estructural, es preferible que la pieza tenga las menores tensiones residuales posibles por lo que los resultados en tensiones máximas son más determinantes que los de las tensiones mínimas. De este modo, el resultado elegido como óptimo en este caso sería el del proceso realizado a 520 °C por ser el que presenta menores tensiones residuales máximas. Aun así, en los siguientes casos de estudio, se fijarán las temperaturas tanto a 520 °C como a 400 °C.

El segundo caso de estudio consta de 2 partes: el estudio de la influencia de la velocidad de calentamiento de la pieza hasta llegar a la temperatura del proceso y el estudio de la influencia del enfriamiento de la pieza desde la temperatura del proceso hasta la temperatura ambiente. En este caso se fijarán las temperaturas y el tiempo del proceso (éste será de una hora como en el primer caso) y se variarán, por separado, tanto la velocidad de calentamiento como el de enfriamiento.

Este análisis no se realizará para todas las temperaturas del primer caso de estudio, si no que se fijarán únicamente las temperaturas de los casos óptimos, es decir, para una temperatura del proceso de 520 °C y de 400 °C. Los procesos realizados se muestran en las Figuras 5-4, 5-5, 5-7 y 5-8. A continuación de cada una de estas Figuras se muestran los resultados obtenidos en cada tratamiento.

En primer lugar se analizará la influencia de la variación de la velocidad de calentamiento y de enfriamiento para una temperatura de 520 °C. Los tratamientos térmicos realizados para el caso de la variación del calentamiento se muestran en la Figura 5-4, mientras que para el caso de la variación del enfriamiento, éstos se muestran en la Figura 5-5.

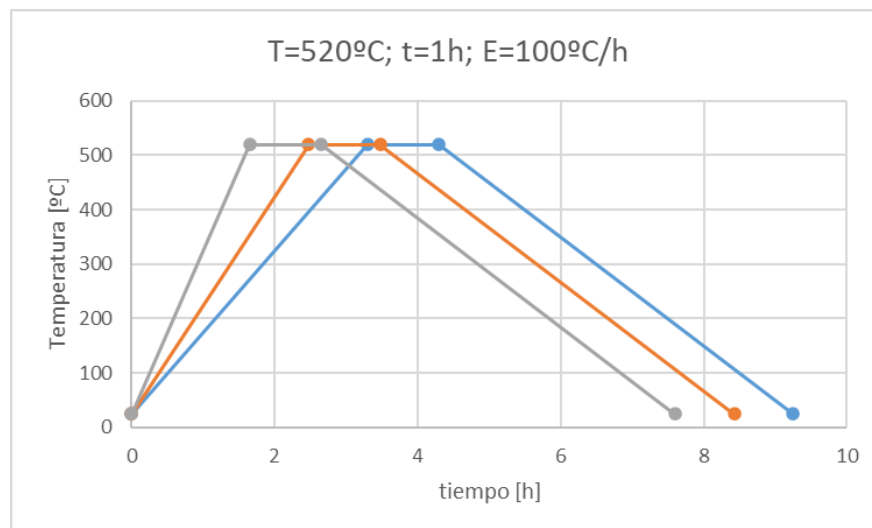


Figura 5-4. Tratamientos térmicos variando el calentamiento para 520 °C

Los resultados obtenidos al realizar estos tratamientos térmicos corresponden a los datos recogidos tanto en la Figura 5-6. como en la Tabla 5-3, donde:

TminE = Tensiones mínimas en el caso de la variación de la velocidad de enfriamiento

TmaxE = Tensiones máximas en el caso de la variación de la velocidad de enfriamiento

TminC = Tensiones mínimas en el caso de la variación de la velocidad de calentamiento

TmaxC = Tensiones máximas en el caso de la variación de la velocidad de calentamiento

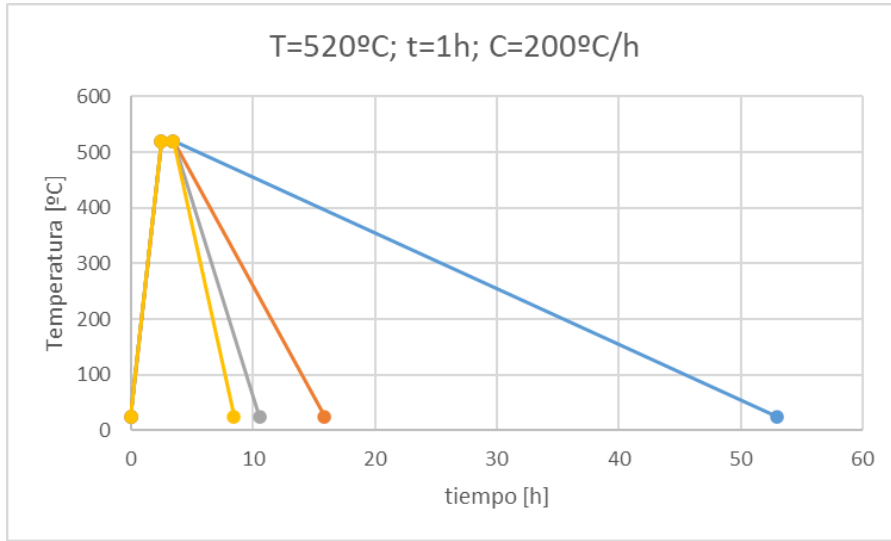


Figura 5-5. Tratamientos térmicos variando el enfriamiento para 520 °C

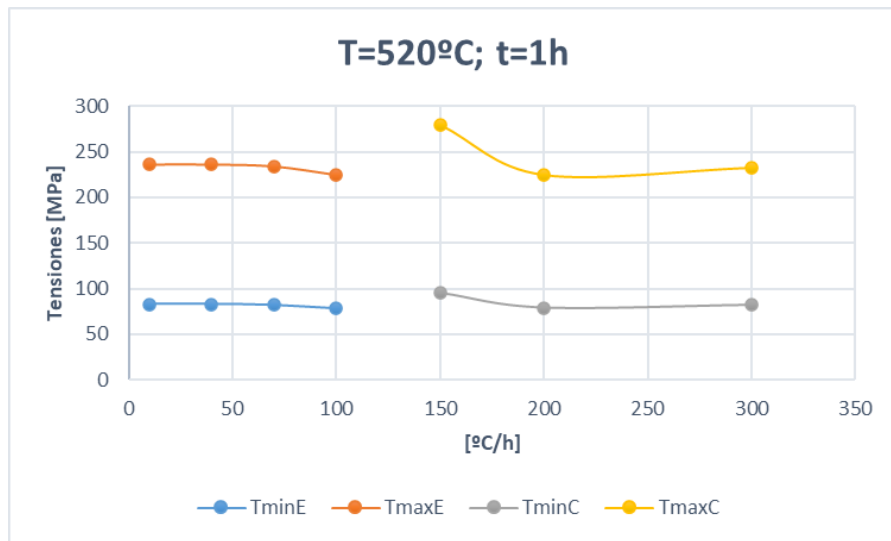


Figura 5-6. Resultados obtenidos para el segundo caso a 520°C

T [°C]	Tensión mínima [MPa]	Tensión máxima [MPa]	Calentamiento [°C/h]	Enfriamiento [°C/h]
520	95	280	150	100
520	79	225	200	100
520	82	233	300	100
520	82	234	200	70
520	83	236	200	40
520	83	236	200	10

Tabla 5-3. Resultados del segundo caso para 520 °C

Observando los resultados se llega a las siguientes conclusiones: al realizar una variación de la velocidad de calentamiento en diferentes tratamientos térmicos se aprecia cómo se obtienen unas tensiones residuales menores, tanto mínimas como máximas, en el caso en el que esta velocidad es de 200 °C/h. Es por esta razón por la que se decide fijar esta velocidad de calentamiento para hacer el análisis de la variación de la velocidad de enfriamiento.

Así pues, si se observa ahora el estudio de la variación de la velocidad de enfriamiento desde la temperatura a la que se ha realizado el proceso hasta la temperatura ambiente, se puede observar que, a medida que aumenta la velocidad de enfriamiento, se reducen ligeramente las tensiones residuales máximas en la pieza mientras que las tensiones residuales mínimas se mantienen prácticamente invariables. La velocidad de enfriamiento óptima es, por tanto, 100 °C/h. En este análisis no se sigue aumentando la velocidad de enfriamiento debido a que el tratamiento térmico se alejaría de ser un recocido, acercándose más bien a un normalizado, por el cual se obtendrían unas propiedades diferentes en el material. Así pues, para el tercer caso de estudio, los valores de las velocidades de enfriamiento y calentamiento que se fijarán serán los mismos que en el primer caso, 200 °C/h para el caso del calentamiento y 100 °C/h para el caso del enfriamiento.

La segunda parte del segundo caso de estudio se basa en realizar el mismo análisis que en la primera parte pero fijando en este caso la temperatura de realización del proceso a 400 °C. Los tratamientos térmicos realizados para el caso de la variación del calentamiento se muestran en la Figura 5-7, mientras que para el caso de la variación del enfriamiento, éstos se muestran en la Figura 5-8.

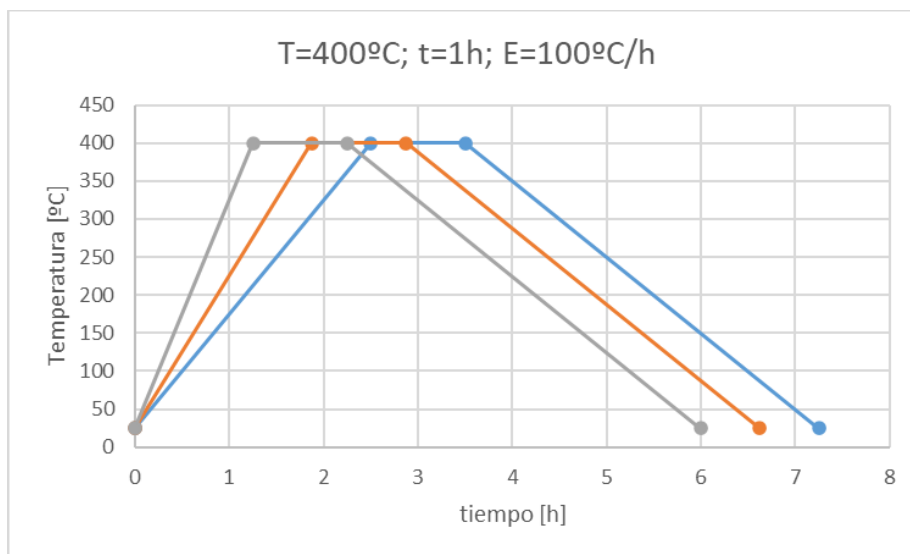


Figura 5-7. Tratamientos térmicos variando el calentamiento para 400 °C

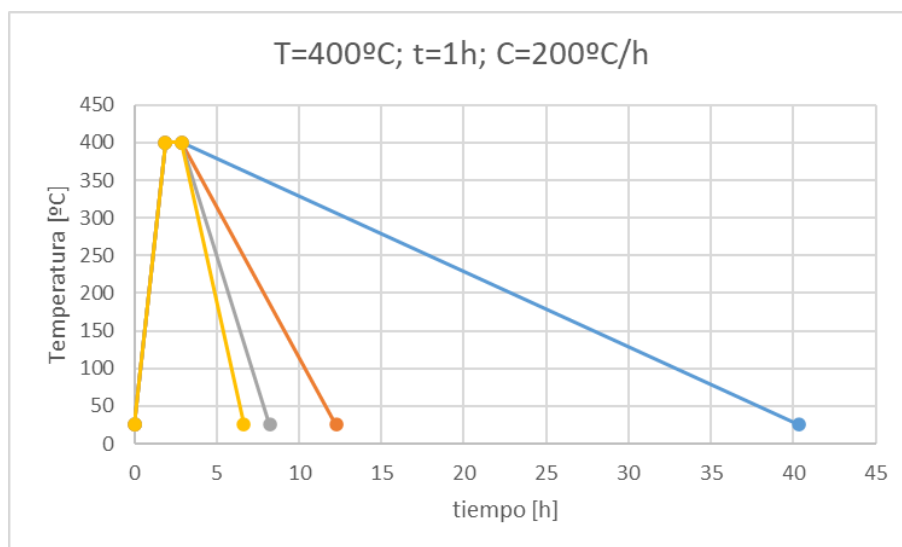


Figura 5-8. Tratamientos térmicos variando el enfriamiento para 400 °C

Los resultados obtenidos al realizar estos tratamientos térmicos se encuentran recogidos tanto en la Figura 5-9, como en la Tabla 5-4.

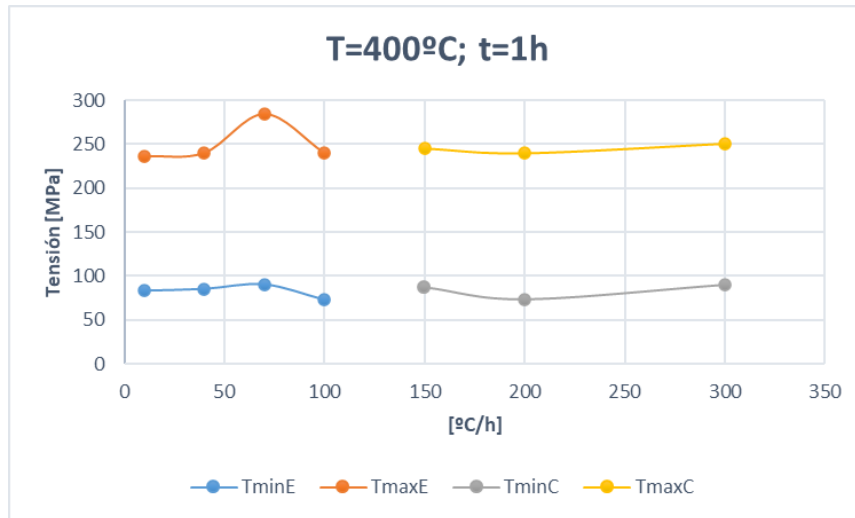


Figura 5-9. Resultados obtenidos para el segundo caso a 400°C

Dónde:

TminE = Tensiones mínimas en el caso de la variación de la velocidad de enfriamiento

TmaxE = Tensiones máximas en el caso de la variación de la velocidad enfriamiento

TminC = Tensiones mínimas en el caso de la variación de la velocidad de calentamiento

TmaxC = Tensiones máximas en el caso de la variación de la velocidad de calentamiento

T [°C]	Tensión mínima [MPa]	Tensión máxima [MPa]	Calentamiento [°C/h]	Enfriamiento [°C/h]
400	87	245	150	100
400	73	240	200	100
400	90	250	300	100
400	90	284	200	70
400	85	240	200	40
400	83	236	200	10

Tabla 5-4. Resultados del segundo caso para 400 °C

Al igual que en el caso en el que la temperatura del proceso es de 520 °C, tanto las tensiones residuales máximas como mínimas obtenidas al variar la velocidad de calentamiento son menores cuando éste es de 200 °C/h. Por tanto, al igual que se hizo en la primera parte de este segundo caso, se fijará esta velocidad de calentamiento para analizar la influencia en las tensiones residuales de la variación de la velocidad de enfriamiento.

Ahora, al contrario de lo que ocurría en el caso en el que la temperatura del proceso estaba fijada en 520 °C, las menores tensiones residuales se alcanzan cuando la velocidad de enfriamiento es de 10 °C/h. Todos los resultados obtenidos, a excepción del resultado para una velocidad de enfriamiento de 70 °C/h, son muy similares pero sí que se puede apreciar el ligero descenso de las tensiones residuales resultantes a medida que disminuye la velocidad de enfriamiento. Por tanto, el caso óptimo en esta segunda parte del segundo caso de estudio sería en el que la velocidad de calentamiento tiene un valor de 200 °C/h y la velocidad de enfriamiento tiene un valor de 10 °C/h. Estos valores serán los empleados en el tercer caso de estudio para el caso en el que la temperatura

del proceso esté fijada en 400 °C.

Si se comparan los casos óptimos de cada una de las partes de este segundo caso (como se muestra en la Tabla 5-5), se observa que cuando la temperatura del proceso es de 520 °C, se alcanza un menor rango de tensiones residuales, es decir, que tanto las tensiones mínimas como las tensiones máximas son menores que cuando la temperatura del proceso está fijada en 400 °C.

T [°C]	Tensión mínima [MPa]	Tensión máxima [MPa]	Calentamiento [°C/h]	Enfriamiento [°C/h]
520	79	225	200	100
400	83	236	200	10

Tabla 5-5. Comparación de los tratamientos óptimos del segundo caso

En el tercer caso de estudio se analizará la influencia de la duración de la parte isoterma del tratamiento térmico sobre las tensiones residuales que aparecerán en la pieza. En este caso se fijarán los siguientes parámetros que definen el tratamiento térmico: la temperatura del proceso, la velocidad de calentamiento y la velocidad de enfriamiento. Como se ha mencionado anteriormente, en ambos casos se fijarán los puntos óptimos, los cuales aparecen en la Tabla 5-5. Para una temperatura de 520 °C, la velocidad de calentamiento será de 200 °C/h y la velocidad de enfriamiento será de 100 °C/h; y para una temperatura de 400 °C, la velocidad de calentamiento será igualmente de 200 °C/h mientras que la velocidad de enfriamiento será de 10 °C/h.

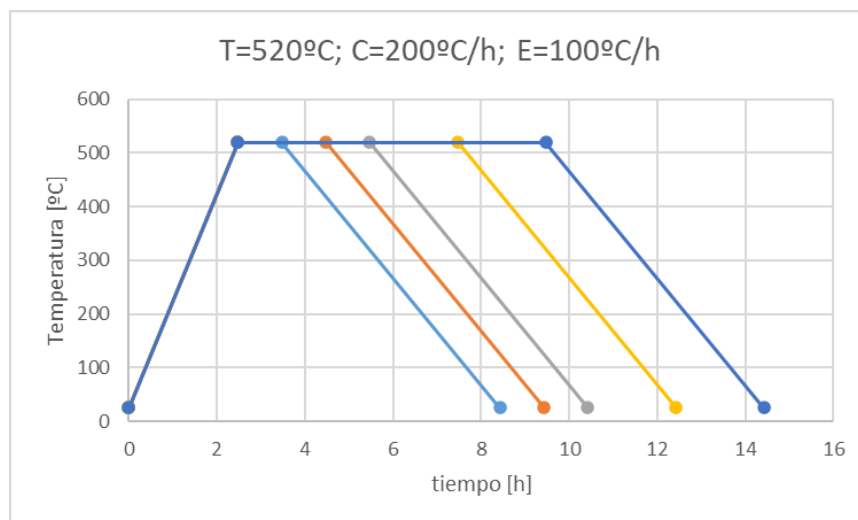


Figura 5-10. Tratamientos térmicos variando el tiempo isoterma para 520 °C

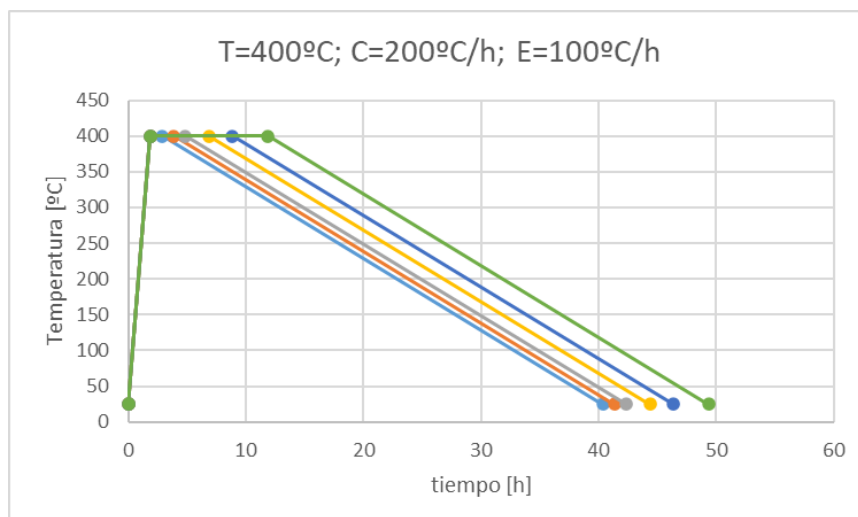


Figura 5-11. Tratamientos térmicos variando el tiempo isoterma para 400 °C

Los diferentes tratamientos térmicos que se han realizado en este tercer caso de estudio vienen definidos tanto en la Figura 5-10 como en la Figura 5-11, para una temperatura de proceso de 520 °C y para una temperatura de proceso de 400 °C respectivamente.

Los resultados que se han alcanzado tras simular los diferentes tratamientos térmicos se muestran en la Figura 5-12. Los resultados numéricos para las simulaciones realizadas con una temperatura del tratamiento térmico de 520 °C se exponen en las Tabla 5-6 y los resultados para una temperatura de 400 °C se exponen en la Tabla 5-7.

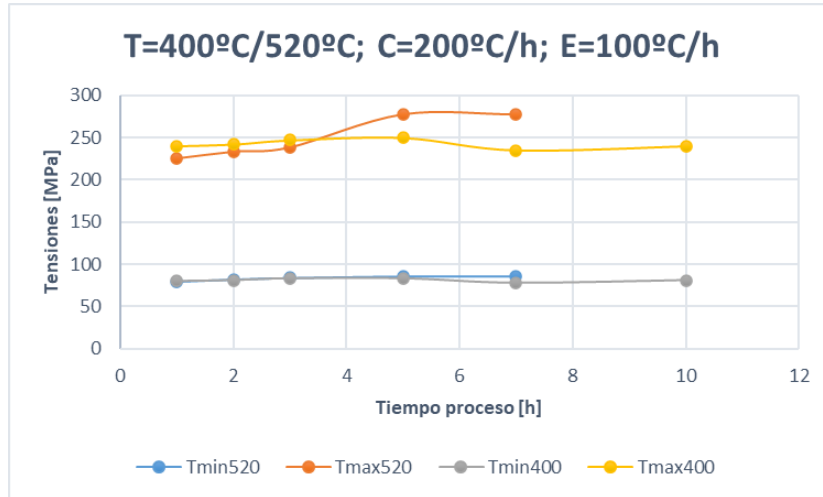


Figura 5-12. Resultados obtenidos para el tercer caso

<i>t</i> [h]	Tensión mínima [MPa]	Tensión máxima [MPa]	Calentamiento [°C/h]	Enfriamiento [°C/h]
1	79	225	200	100
2	82	233	200	100
3	84	238	200	100
5	86	277	200	100
7	86	277	200	100

Tabla 5-6. Resultados del tercer caso para 520 °C

<i>t</i> [h]	Tensión mínima [MPa]	Tensión máxima [MPa]	Calentamiento [°C/h]	Enfriamiento [°C/h]
1	80	240	200	10
2	81	242	200	10
3	83	247	200	10
5	83	250	200	10
7	78	235	200	10
10	81	240	200	10

Tabla 5-7. Resultados del tercer caso para 400 °C

En una primera vista de la Figura 5-12 se puede apreciar que no existe una gran dependencia entre la duración de la parte isoterma del tratamiento térmico y los resultados en tensiones residuales, pues son bastante similares tanto cuando se realiza el tratamiento a 520 °C como cuando se realiza a 400 °C. Esta primera impresión se confirma al comprobar los valores en las Tablas 5-6. y 5-7.

Si se pone el foco de atención en las simulaciones realizadas a una temperatura de 520 °C, se puede observar que tanto las tensiones mínimas como las tensiones máximas aumentan de forma linealmente proporcional con el aumento del tiempo del proceso, hasta llegar un punto en el que las tensiones residuales máximas aumentan de manera considerable.

Por el contrario, si el tratamiento térmico se realiza a una temperatura de 400 °C, el rango de tensiones residuales va aumentando ligeramente a medida que aumenta el tiempo del proceso isoterma al igual que con una temperatura de 520 °C, pero al contrario que en ese caso, cuando la parte isoterma tiene una duración de 7 horas, la pieza alcanza las menores tensiones residuales siendo este un punto de inflexión, ya que si se sigue aumentando la duración del tratamiento, las tensiones residuales vuelven a aumentar.

Comparando los resultados obtenidos en el proceso para ambas temperaturas, se puede comprobar como las menores tensiones residuales máximas se alcanzan cuando el tratamiento térmico se realiza a una temperatura de 520 °C, con una duración de la parte isoterma de 1 hora, con una velocidad de calentamiento de 200 °C/h y con una velocidad de enfriamiento de 100 °C/h. Por otra parte las menores tensiones mínimas se alcanzan en un tratamiento térmico realizado a 400 °C, con una duración de la parte isoterma de 7 horas, con una velocidad de calentamiento de 200 °C/h y con una velocidad de enfriamiento de 100 °C/h.

Por las razones mencionadas anteriormente en este capítulo sobre por qué es más determinante la tensión máxima que la tensión mínima, se elegirá tratamiento térmico aquel en el que se alcanzan las menores tensiones residuales máximas, es decir, el realizado a 520 °C. Además, este tratamiento térmico será más eficiente desde el punto de vista energético debido a que se requiere un menor tiempo del horno en el que se vaya a realizar dicho tratamiento.

<i>Tratamiento térmico</i>	<i>Antes</i>	<i>Después</i>
<i>Tensiones mínimas [MPa]</i>	90	79
<i>Tensiones máximas [MPa]</i>	320	225

Tabla 5-8. Comparación de las tensiones residuales

En la Tabla 5-8. se muestra la comparativa de las tensiones residuales que presenta el sólido antes y después de realizar el tratamiento térmico. Se puede apreciar cómo estas tensiones residuales son menores que las que resultan directamente del proceso de fabricación pero, este descenso no es tan significativo como lo esperado, pues en el mejor de los casos (en cuanto a las tensiones residuales máximas), las tensiones residuales descienden 95 MPa.

5.3.1. Tratamiento térmico para la pieza fabricada con $T_i = 300$ °C

Hasta el momento, se ha realizado un estudio en vías de determinar el tratamiento térmico que mejores resultados en tensiones residuales ofrece. Para ello se empleó la pieza resultante de la primera iteración mostrada en el primer apartado del cuarto capítulo de este texto.

Una vez obtenido dicho tratamiento térmico, la pieza resultante del proceso de fabricación considerado óptimo al que se llegó en el apartado 4.2.3.2 será sometida a él con para seguir reduciendo las tensiones residuales resultantes.

Así pues, se parte del siguiente rango de tensiones residuales tras el proceso de fabricación: [56-280] MPa. Como se puede apreciar, este rango ya tiene menores tensiones residuales que las obtenidas de partida en la primera iteración. Para seguir reduciendo este rango, y en especial las tensiones residuales máximas, se somete a la pieza al tratamiento térmico mostrado en la Figura 5-13.

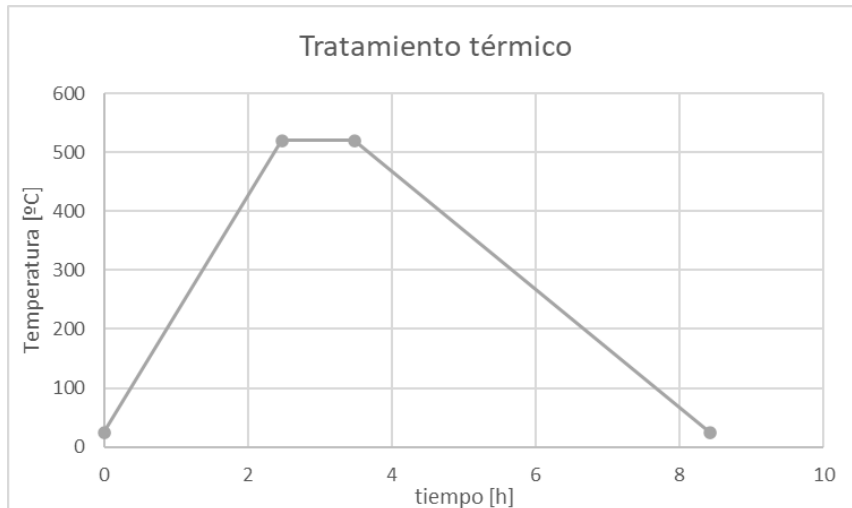


Figura 5-13. Tratamiento térmico elegido

Los resultados en tensiones residuales obtenidos tras realizar este tratamiento térmico se muestran en la Figura 5-14. En ella se puede observar cómo este rango apenas permanece invariable con respecto a los resultados de la primera iteración.

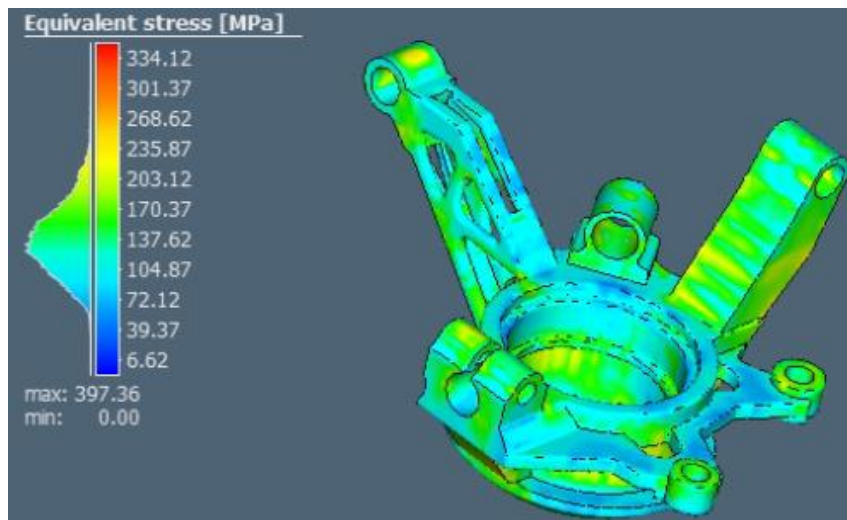


Figura 5-14. Resultados en tensiones residuales tras tratamiento óptimo

Las tensiones residuales máximas serán ligeramente superiores a las obtenidas tras someter al tratamiento térmico a la pieza resultante de la primera iteración. Se concluye que, si se eleva la temperatura inicial del polvo en la cámara de la máquina, se reduce la efectividad del tratamiento térmico aplicado con el fin de seguir reduciendo las tensiones residuales alcanzadas en la pieza. Es por esta razón por la que se elegirá como mejor opción las condiciones del proceso de fabricación y del tratamiento térmico de la primera iteración debido a que se llegan a unas tensiones residuales menores que en los demás casos.

5.4. HIP

Aunque en capítulos anteriores se habla de este postratamiento, de sus ventajas y de su influencia sobre las propiedades finales de la pieza, se ha decidido no realizar este postratamiento por las siguientes razones:

- La densidad relativa obtenida en la pieza es de un 100% en casi la totalidad de su volumen, y en el caso que no es del 100%, está realmente cerca de serlo. Esto quiere decir que apenas existe porosidad en el material tras la fabricación. Así pues, realizar el proceso supondría un coste energético y de tiempo alto y el resultado final no diferiría mucho del caso inicial.

- Se ha comprobado que el tratamiento térmico no tiene tanta influencia sobre la reducción de las tensiones residuales como se esperaba. De esta manera, si se realizase un segundo postratamiento como el HIP en vías de mejorar los resultados, las tensiones residuales tampoco se verían muy afectadas por lo que resulta ineficaz la realización de este postratamiento.

6 ESTUDIO MECÁNICO DE LA PIEZA RESULTANTE

En este capítulo se llevará a cabo el estudio mecánico de la pieza obtenida como resultado de la simulación de la fabricación aditiva. Para ello será necesario la utilización de un software de elementos finitos en el que poder aplicar al sólido las cargas a las que estaría sometido en servicio y que permita emplear como estado inicial de la pieza el obtenido tras la fabricación.

6.1. Exportación de datos a Marc MENTAT

Es por ello por lo que se empleará un software que pertenece al mismo fabricante que Simufact Additive debido a que permite utilizar los resultados obtenidos en Additive como estado inicial del estudio mecánico. Este software de elementos finitos es Marc MENTAT.

El paso de Simufact Additive a Marc MENTAT no es inmediato si no que hay que hacer un proceso ficticio intermedio en Simufact Forming. Los pasos a dar son los siguientes:

1. Se exportan los resultados de Simufact Additive en una malla volumétrica que contenga toda la información relevante que se ha mostrado anteriormente. Por esta razón era importante realizar un mallado volumétrico, porque de lo contrario no se podrían exportar estos resultados. El formato de la malla que se exportará y tendrá toda la información requerida es .UNV.

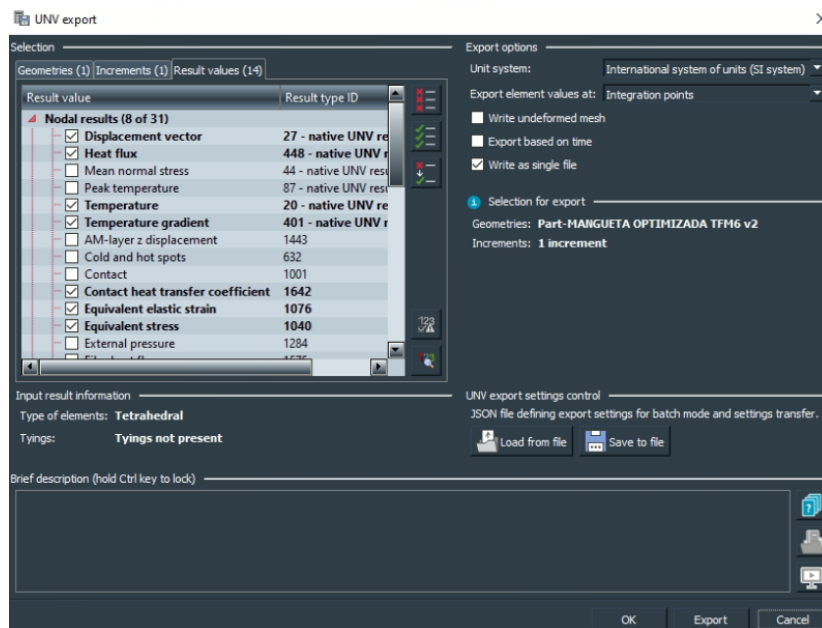


Figura 6-1. Exportación de la malla UNV

2. Esta malla se importará en Simufact Forming donde se realizará un proceso ficticio. Este proceso será un enfriamiento (“cooling”) que se hará a 25°C y tendrá una duración de un 0.1 segundos.

La finalidad de realizar este proceso es generar un archivo binario .t16. Este archivo binario es el que se importará en Marc MENTAT con toda la información resultante de la fabricación, es decir, no se pierde ningún resultado.

Es necesario pasar por Simufact Forming debido a que este software sí que crea un archivo .t16 tras la simulación de un proceso. Por el contrario, Simufact Additive no crea este archivo.

Es importante comprobar que los resultados exportados de Simufact Additive coinciden con los

resultados del primer incremento del proceso de cooling en Simufact Forming.

3. Abrir el archivo .t16 en Marc MENTAT y comprobar que el primero incremento del estado de la malla importada contiene los mismos resultados que se obtuvieron en Simufact Additive.

Se debe elegir como estado inicial de la pieza en el estudio mecánico las importadas desde Simufact Forming y, de todos los incrementos, se elegirán las del primero. Esto es debido a que durante el proceso de enfriamiento, Forming crea numerosos incrementos que pueden compararse con iteraciones que da el software para llegar a la solución. Para evitar que se modifiquen mínimamente los resultados obtenidos en Simufact Additive en dicho proceso de enfriamiento, se deben elegir los datos del incremento 0, pues serán los que coincidan al 100% con Simufact Additive.

Una vez se han realizado estos pasos, ya se puede comenzar con el estudio mecánico del sólido.

6.2. Aplicación de cargas

Las fuerzas a las que el sólido estará sometido en servicio fueron calculadas bajo unas hipótesis expuestas en el trabajo fin de grado en el que se obtuvo la geometría optimizada de la pieza empleada en este proyecto y que fue realizado por el mismo autor de este texto.

Las cargas obtenidas en las distintas hipótesis son las siguientes:

6.2.1. Hipótesis 1: Paso por curva

En esta hipótesis se estudió las fuerzas generadas sobre la mangueta estudiada (perteneciente a la rueda delantera izquierda) durante el paso del vehículo por una curva de 350 metros de radio y a una velocidad de 110 km/h.

Las fuerzas obtenidas fueron [11]:

$$F_{z \text{ exterior delantera}} = 4300 \text{ N}$$

$$F_{y \text{ exterior delantera}} = 1169 \text{ N}$$

$$F_{\text{brazo dirección}} = 1321 \text{ N}$$

En la Figura 6-2. se muestran las reacciones que aparecen en los neumáticos del vehículo en la hipótesis del paso por curva, diferenciando entre ruedas exteriores e interiores (pues el giro es a la derecha). Una vez que se obtuvieron los valores de estas fuerzas, se diferenció entre la reacción sobre las ruedas delanteras y traseras en función de la distribución de pesos en el interior del vehículo.

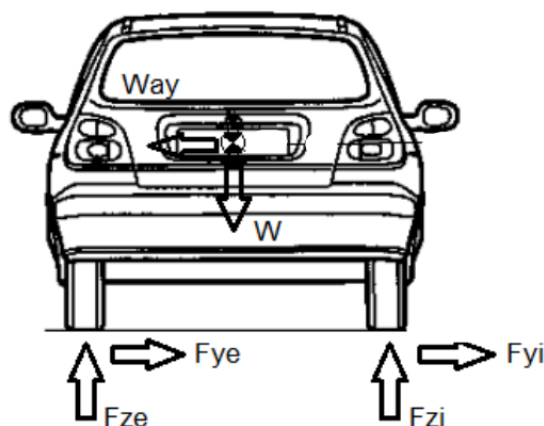


Figura 6-2. Hipótesis paso por curva [11]

Como la mangueta no se encuentra en la vertical del punto de contacto entre la calzada y el neumático (donde se genera la reacción) si no que tiene un cierto offset, al trasladar las fuerzas a la mangueta hay que trasladar también el momento que éstas generan sobre ella. De esta manera se obtienen los siguientes momentos [11]:

$$M_x = -52 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_z = 24 \text{ N}\cdot\text{m}$$

6.2.2. Hipótesis 2: Frenada hasta la detención

En esta hipótesis se calcularon las fuerzas que actúan sobre la mangueta estudiada cuando el vehículo al que pertenece frena desde una velocidad de 110 km/h hasta la detención absoluta en una distancia de 80 metros.

Las fuerzas obtenidas fueron [11]:

$$F_z \text{ izquierda delantera} = 4195 \text{ N}$$

$$F_x \text{ izquierda delantera} = 1996 \text{ N}$$

$$F_{\text{mordaza de freno}} = 9580 \text{ N}$$

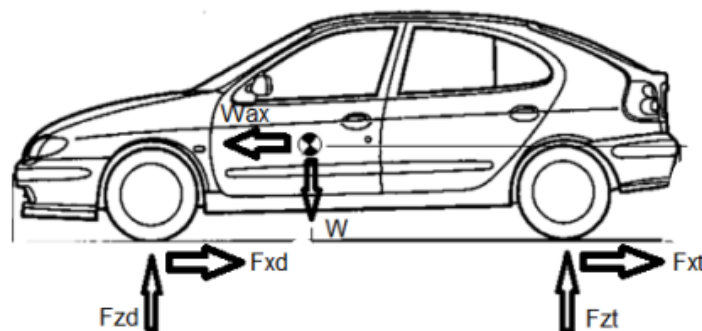


Figura 6-3. Hipótesis frenada hasta la detención [11]

En la Figura 6-3 se muestran las reacciones que aparecerán en los neumáticos del vehículo. A diferencia del caso anterior, ahora se diferencia entre las reacciones en las ruedas delanteras y las reacciones en las traseras. La reacción en la rueda izquierda será igual que en la derecha, debido a que la distribución de fuerzas es simétrica en el eje y del vehículo.

Al igual que en el momento anterior, hay que calcular los momentos que generan las reacciones en la mangueta. En este caso son [11]:

$$M_x = 287 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_z = -3 \text{ N}\cdot\text{m}$$

6.3. Estudio en Marc MENTAT

Este estudio únicamente se realizará al caso considerado óptimo en el capítulo anterior debido a que, como las cargas a las que estará sometido el sólido no varían de un caso a otro, lo único que puede causar variaciones en los resultados entre un caso y otro es el estado inicial del estudio, es decir, los resultados a los que se llega en Simufact Additive. Es por esta razón por la que se ha elegido el caso en el que menos tensiones residuales se producen.

En el estudio, como es lógico, se ha empleado el mismo material que en las simulaciones en Simufact Additive y en Simufact Forming, para que el caso sea coherente. También se han tenido en cuenta diferentes casos de carga, los cuales coinciden con las hipótesis mencionadas anteriormente, para ver la respuesta de la pieza a cada uno de estos casos, así como a todos juntos. Por tanto, los casos de carga son:

- Paso por curva.
- Frenada hasta la detención.
- Giro de la dirección en seco.
- Actuación de todas las hipótesis juntas.

En Marc MENTAT el sólido importado es directamente una malla, es decir, nodos y elementos, el software no reconoce sólidos ni caras. Por esta razón, todas las fuerzas distribuidas en las respectivas superficies del sólido

deberán aplicarse directamente en los nodos.

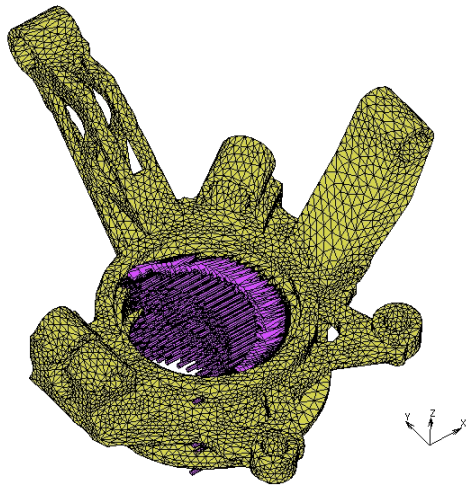


Figura 6-4. F_z paso por curva

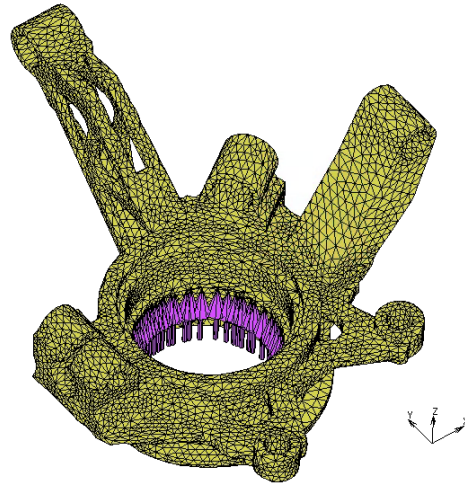


Figura 6-5. F_y paso por curva

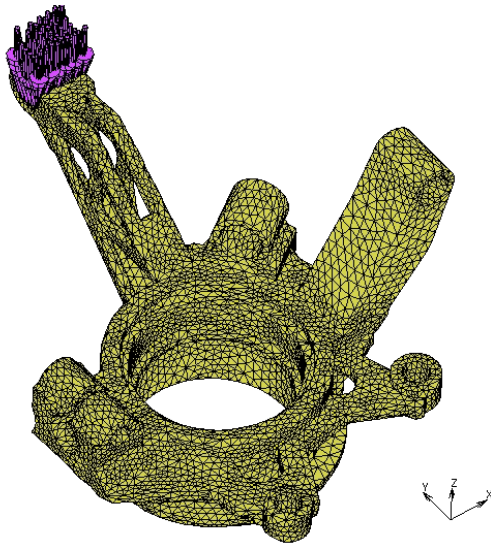


Figura 6-6. F dirección paso por curva

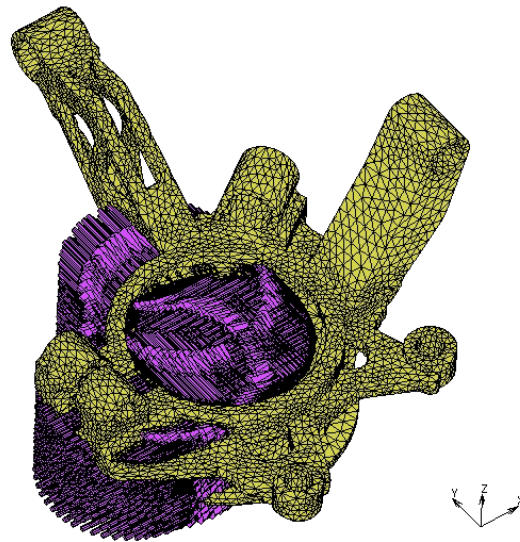


Figura 6-7. Momentos paso por curva

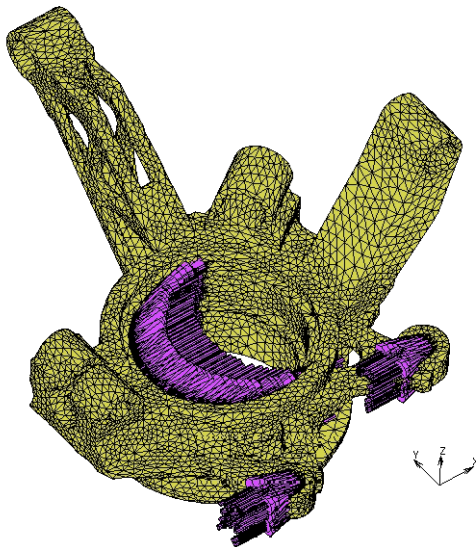


Figura 6-8. F mordaza frenada hasta detención

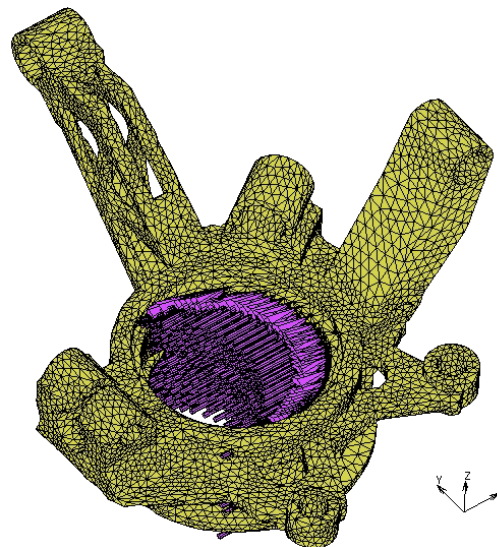


Figura 6-9. F_z frenada hasta detención

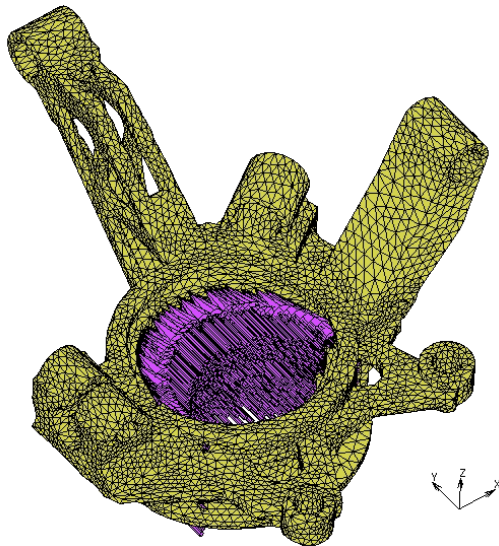


Figura 6-10. Fx frenada hasta detención

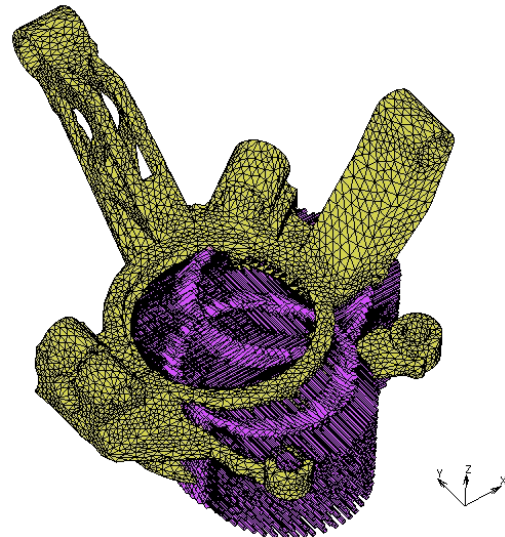


Figura 6-11. Momentos frenada hasta detención

En el caso de carga del paso por curva, la aplicación de las fuerzas mostradas en el apartado 6.1.1, se muestran en las Figuras 6-4, 6-5 y 6-6 mientras que los momentos aplicados se muestran en la Figura 6-7. Por otra parte, la aplicación de las fuerzas en el caso de carga de la frenada hasta la detención, mostradas en el apartado 6.1.2., se muestran en las Figuras 6-8, 6-9 y 6-10 mientras que los momentos aplicados se muestran en la Figura 6-11.

Las condiciones de contorno del sólido serán las que se muestran en las Figuras 6-12 y 6-13. Estas condiciones corresponden con un empotramiento en la unión entre la mangueta y el vástago de la suspensión tipo McPherson que monta este vehículo tal y como se muestra en la Figura 6-12. Por otra parte, la mangueta tiene un apoyo simple en la cara que se muestra en la Figura 6-13 debido a una unión articulada entre la pieza y la estructura autoportante del vehículo.

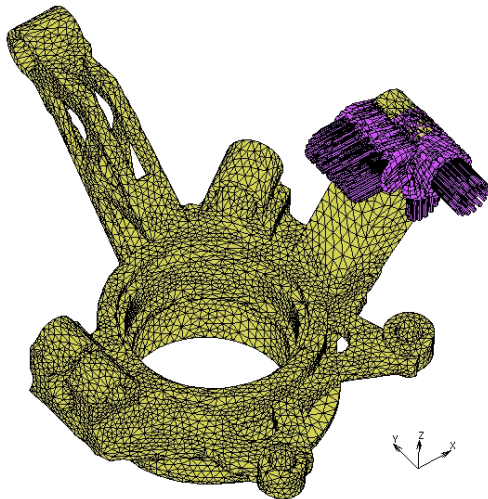


Figura 6-12. Empotramiento

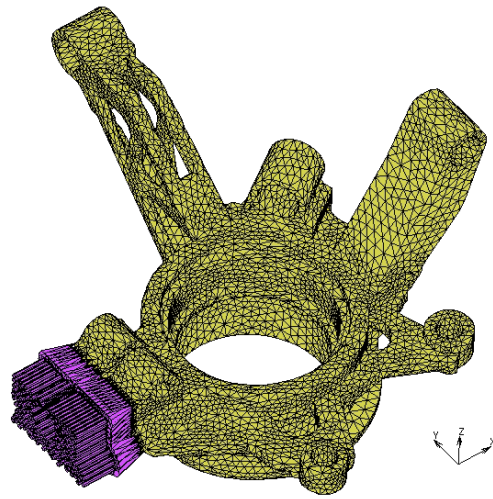


Figura 6-13. Apoyo simple

Los resultados del estudio mecánico para los diferentes casos de cargas mencionados son los que se muestran a continuación:

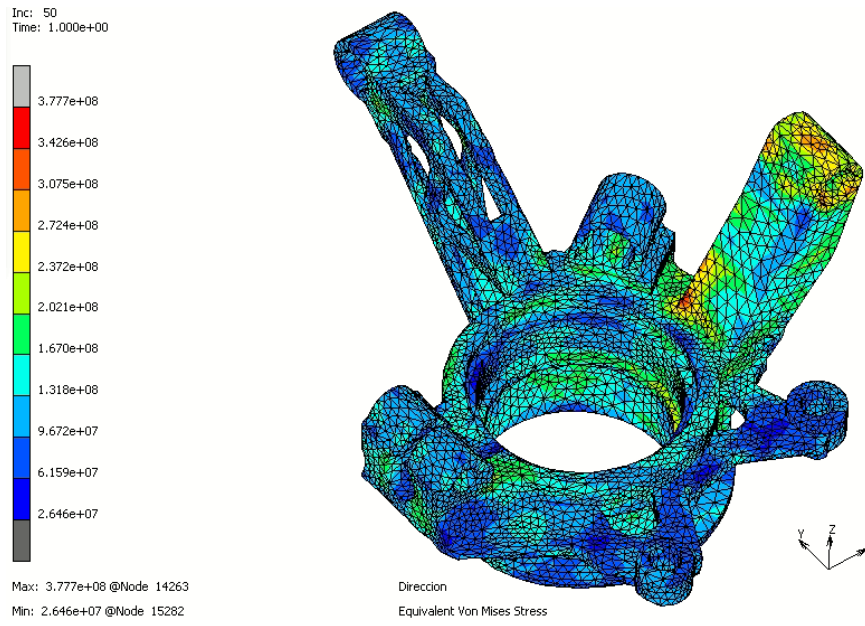


Figura 6-14. Von Mises giro de dirección en estático

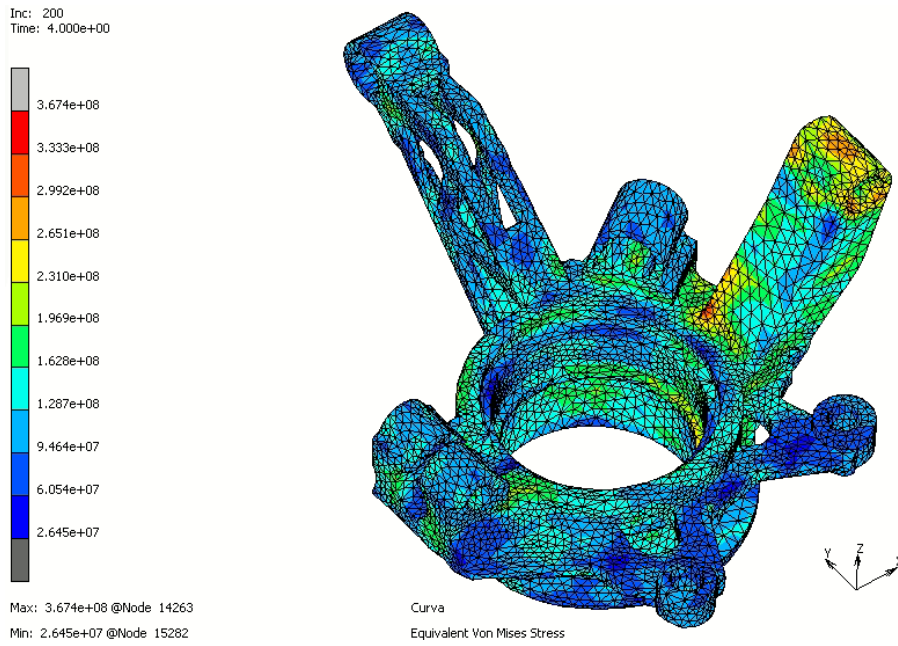


Figura 6-15. Von Mises paso por curva

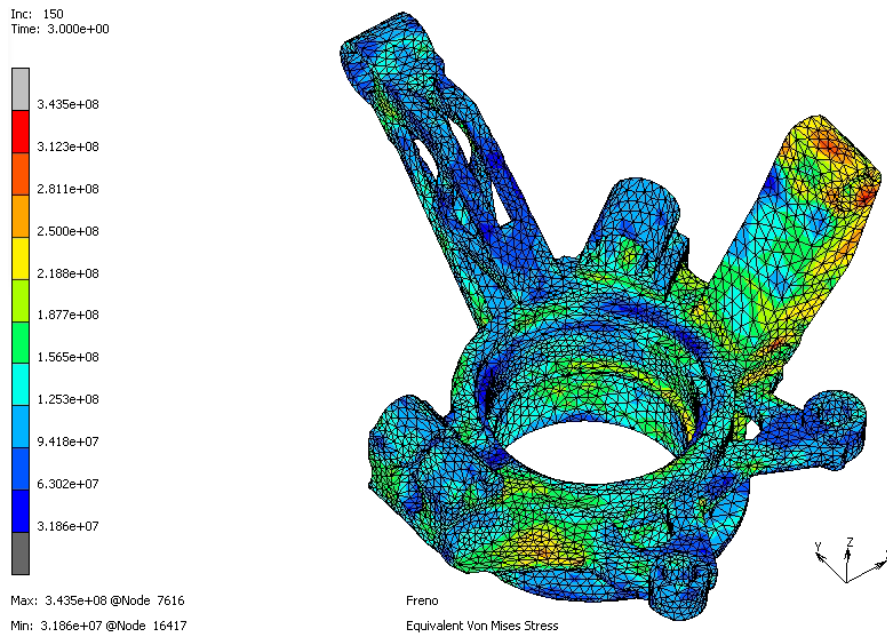


Figura 6-16. Von Misses frenada hasta la detención

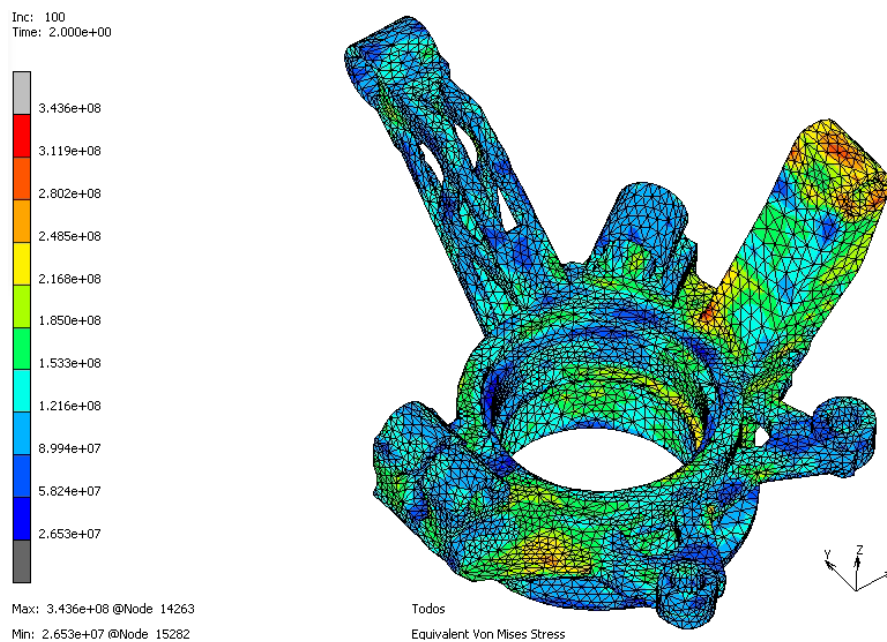


Figura 6-17. Von Misses todos los casos juntos

Se puede observar que en todos los casos de carga, el estado tensional de la pieza es similar, siendo la tensión máxima de 378 MPa en el caso de carga de girar la dirección en seco tal y como se puede apreciar en la Figura 6-14.

Como el límite elástico del material es de 1100 MPa aproximadamente, en ninguno de los casos estudiados se va a alcanzar la plastificación del material en ningún punto de la pieza, por lo que se puede certificar que el sólido será funcional una vez abordada su fabricación mediante las condiciones propuestas en este proyecto.

7 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

En este último capítulo se recogen las principales conclusiones a las que se ha llegado durante el transcurso del estudio, así como se recogen también las posibles vías de mejora de dicho estudio a desarrollar en futuros trabajos.

7.1. Conclusiones

En primer lugar, se puede certificar que el método de fabricación elegido para llevar a cabo la manufactura de una mangueta cuya geometría es intrincada ya que ha sido sometida a una optimización topológica, es válido y se obtienen buenos resultados. Además, este método de fabricación comparte algunos parámetros con el proceso de la optimización topológica por lo que, en futuros trabajos, en la fase de diseño se pueden llegar a mejores resultados si desde un primer momento se trabaja teniendo en cuenta en los procesos de optimización las características de los procesos de manufactura.

Por otra parte, se ha podido comprobar que existen herramientas lo suficientemente potentes como para obtener resultados fiables mediante simulaciones de los procesos de fabricación. Esto supondría un ahorro de tiempo y gasto de material en las fases de diseño de piezas y mecanismos. Además, estas herramientas permiten realizar el flujo completo de trabajo mostrado en la Figura 3-1. en el que se parte de un modelo CAD y se llega a obtener cómo sería su comportamiento final en servicio.

En el caso de la mangueta con la que se ha realizado el estudio numérico de la fabricación en este proyecto, se ha podido certificar en el capítulo 6 que, tras llevar a cabo su manufactura por medio del método de fabricación aditiva SLM, ésta sería funcional y bajo ninguna hipótesis de carga considerada crítica llegaría a plastificar. Además, el factor de seguridad sería bastante alto pues la tensión máxima que se alcanzaría en el sólido sería de 378 MPa, tal y como se ha reflejado en el capítulo 6, mientras que el límite elástico del material empleado es de aproximadamente 1100 MPa. Esto hace que el mencionado factor de seguridad sea de 2.91.

Es interesante realizar un razonamiento acerca de la influencia del material empleado en este proyecto en los resultados obtenidos pues, como se justificó en el cuarto capítulo de este texto, no es el mismo material que el de la pieza original.

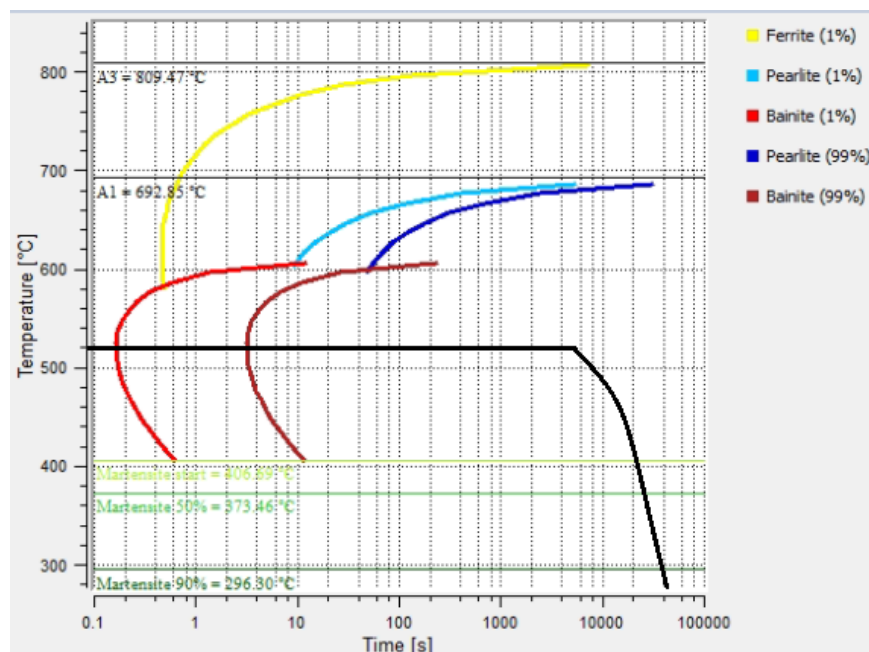


Figura 7-1. Tratamiento térmico en el diagrama TTT

El material empleado en este proyecto es un Maraging Steel. Éste es un tipo de acero martensítico el cual

contiene una baja cantidad de carbono ($< 0.03\%$) y una gran cantidad de níquel (17-19%), junto con cantidades de cobalto, molibdeno, titanio y aluminio principalmente, lo que le confiere al acero una gran dureza, tenacidad, ductilidad y maleabilidad. Por otra parte, las precipitaciones de estos materiales en la microestructura martensítica del material provocan que se restrinjan los movimientos de las dislocaciones. Es decir, este tipo de acero está endurecido por precipitación.

La heterogeneidad de las precipitaciones de estos elementos sobre la microestructura del material provoca que los tratamientos térmicos que se le aplican no produzcan apenas efecto sobre la reducción de las tensiones residuales producidas en el material. Este hecho que se ha podido comprobar en el análisis de sensibilidad realizado en el capítulo 5 de la memoria, lo reflejaron Conde et al. en su artículo [8]. En él proponen además una serie de trabajos futuros enfocados a realizar tratamientos capaces de mejorar las propiedades del material por medio de la luz sincrotrón.

Si se observa el diagrama TTT del material empleado y el tratamiento térmico realizado (Figura 7-1) la microestructura que cabe esperar tras la finalización de este proceso es la martensita original de la microestructura del sólido con los elementos precipitados y algunas partes de bainita en caso de que algún punto de la microestructura haya alcanzado el estado austenítico.

Aunque no se haya conseguido una reducción considerable de las tensiones residuales alcanzadas en la pieza tras la fabricación, se ha demostrado que la pieza sería funcional en condiciones normales de funcionamiento. Es cierto que, si el estado tensional final de la pieza mostrado en las Figuras 6-14, 6-15, 6-16 y 6-17 se hubiese alcanzado con el material original, la conclusión sería que la pieza plastificaría pues, 378 MPa supera el límite elástico del acero original, el cual es 275 MPa.

También es cierto que, este tipo de aceros convencionales sí que admiten tratamientos térmicos convencionales para relajar las tensiones residuales internas en el material, pero como se introdujo en el cuarto capítulo, este material no está disponible en polvo, por lo que no se podría abordar una fabricación aditiva con él por ahora.

Si con el acero S275 las tensiones residuales generadas se pudiesen reducir al mínimo con un tratamiento térmico, es altamente probable que la pieza también fuese funcional pues, el resultado obtenido en la Figura 6-14 es aproximadamente una suma del estado tensional de la pieza sin tensiones residuales (caso del que se parte en este proyecto) mostrado en la Figura 7-2. y las tensiones residuales alcanzadas tras el proceso de fabricación. La suma no es exacta debido a que hay una pequeña diferencia entre los módulos de elasticidad entre ambos materiales.

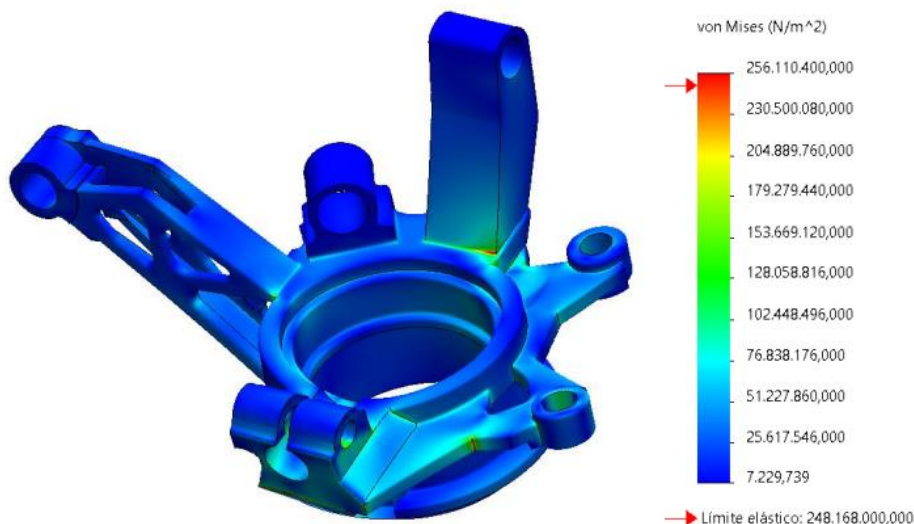


Figura 7-2. Estudio mecánico tras optimización topológica [11]

Por tanto, se concluye que tras realizar el estudio numérico de la fabricación de la mangueta de un automóvil optimizada topológicamente, dicha fabricación sería viable siempre y cuando se escojan los parámetros apropiados en función de las características finales de la pieza deseadas y únicamente se podrán emplear los materiales que estén disponibles en forma de polvo, el cual en este caso, sería válido para lograr que la pieza fuese funcional durante su vida útil.

7.2. Desarrollos futuros

A continuación se enumeran las posibles vías de mejora del estudio propuesto dentro del contexto de las herramientas utilizadas para realizarlo:

1. El estudio numérico se ha realizado empleando un material diferente al material original de la pieza fabricada virtualmente por lo que se han tenido que hacer una serie de suposiciones, las cuales han sido desarrolladas en capítulos anteriores, para poder llevar a cabo el estudio. La principal razón por la que se ha hecho este cambio de material es debido a que el material original actualmente no se encuentra disponible en forma de polvo, por lo que no se puede trabajar con él en SLM. De esta manera, la primera vía de mejora está enfocada a volver a realizar todo el estudio numérico una vez que el material original esté disponible. De esta manera, las conclusiones serán mucho más certeras.
2. Los parámetros que definen la fabricación mediante SLM son varios y en este estudio no se ha tratado la influencia de cada uno de ellos en las propiedades de la pieza final, únicamente se ha hecho de los que afectaban de una forma más directa a las tensiones residuales. Sería interesante poder trabajar de cara al futuro en conocer la influencia real de todos y cada uno de los parámetros sobre todas las propiedades de la pieza (tensiones residuales, porosidad, calidad superficial, etc.)
3. Este estudio se limita a analizar de forma numérica la fabricación de una pieza por medio de softwares de simulación pero no se llega a fabricar realmente la pieza final. Otra de las vías de mejora sería poder llevar a cabo la fabricación real del componente para comprobar si las propiedades obtenidas de la fabricación virtual, realmente se alcanzan en la pieza real. De esta forma también se analizarían las diferencias entre los resultados virtuales y los reales y se mediría el grado de fiabilidad del software de fabricación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acevedo, F., 2016. *Estudio sobre la aplicación de las tecnologías de fabricación aditiva al sector aeronáutico y espacial. Impresión 3D.*, Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- [2] Alzyod, H. & Ficzero, P., 2022. Finite Element Modeling of Additive Manufacturing in Case of Metal Part. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 50(4), pp. 330-335.
- [3] Bellido, J. & Donoso, A., 2013. Optimización estructural y diseño de materiales: una incursión matemática en ingeniería. *Gaceta Real Sociedad Matemática Española*, XVI (1), pp. 61-68.
- [4] Bendsøe, M. & Kikuchi, N., 1988. Generating optimal topologies in optimal design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. LXXI(2), pp. 197-224.
- [5] Bendsøe, M. & Sigmund, O., 1999. Material interpolation in topology optimization. *Archive of Applied Mechanics*, Volumen LXIX, pp. 635-654.
- [6] Bendsøe, M. & Sigmund, O., 2003. *Topology optimization: Theory, methods and applications*, Berlin: Springer-Verlag.
- [7] Bernasconi, R., 2022. *3D Printing Technologies*. Milano: MDPI.
- [8] Conde, F. y otros, 2019. Austenite reversion kinetics and stability during tempering of an additively manufactured maraging 300 steel. *Additive Manufacturing*, Volumen 29.
- [9] Donoso, A. & Ruiz, D., 2018. *Topology optimization course in Matlab*, s.l.: Universidad de Castilla La-Mancha, Departamento de matemáticas (ETSII).
- [10] EOS GmbH Electro Optical Systems, 2022. *Material data sheet. EOS MaragingSteel MS1*. s.l.:s.n.
- [11] García, C., 2021. *Optimización topológica de la mangueta de dirección de un automóvil*, Universidad de Castilla La-Mancha: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.
- [12] Gonçalves, A. y otros, 2017. Short-term Creep Properties and Fracture Surface of 18 Ni (300) Maraging Steel Plasma Nitrided. *Materials Research*, 2(20), pp. 2-9.
- [13] Gratton, A., 2012. *Comparison of Mechanical, Metallurgical Properties of 17-4PH Stainless Steel between Direct Metal Laser Sintering (DMLS) and Traditional Manufacturing Methods*. s.l., s.n.
- [14] HEXAGON, 2022. *Simufact Additive Tutorial*. s.l.:s.n.
- [15] Huo, Y., Hong, C., Li, H. & Liu, P., 2020. Influence of different Processing Parameter on distortion and Residual Stress of Inconel 718 Alloys Fabricated by Selective Laser Melting (SLM). *Materials Research*, 6(23).
- [16] Jorge, J., 2018. *Desarrollo de una metodología simplificada para la simulación del proceso de fabricación aditiva por sinterizado laser basado en el método de los elementos finitos*, s.l.: IDONIAL Centro Tecnológico.
- [17] Konda, P., 2020. *Selective Laser Melting*. Austria: Austrian Academy of Sciences.
- [18] Le, C., 2015. *Topology Optimization Overview. TopShape*. [En línea] Available at: <http://topshape.bmrd.com/topology-optimization-overview/>
- [19] McEwen, I. y otros, 2018. Design & Manufacture of a High-Performance Bicycle Crank by Additive Manufacturing. 8(8).
- [20] Meza, C., 2012. Optimización Topológica En El Diseño De Elementos Estructurales Mecánicos. *Proyecto Fin de Carrera. Universidad Autónoma de Occidente*.
- [21] Michell, A., 1904. The limits of economy of material in frame structures.. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science.*, Volumen VII, pp. 589-597.
- [22] Mouritz, A., 2012. 11.3 Maraging steel. En: *Introduction to Aerospace Materials*. s.l.:s.n.

- [23] Paz, R., 2022. *Design and Application of Additive Manufacturing*. s.l.:University of Las Palmas de Gran Canaria.
- [24] Schmit, L., 1960. Structural Design by Systematic Synthesis. *Proceedings, 2nd Conference on Electronic Computation, ASCE, New York,*, pp. 105-132.
- [25] Sufiiarov, V., 2022. *Materials, Design and Process Development for Additive Manufacturing*. St. Petersburg: Polytechnic University.
- [26] Svanberg, K., 1987. The method of moving asymptotes— a new method for structural design. *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Volumen 24, pp. 359-373.
- [27] The Minerals, Metals & Materials Society, 2019. *TMS 2019 148th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. s.l.:TSM.
- [28] Universidad Tecnológica Nacional, s.f. VIII. Tratamientos con enfriamientos modereados y lentos. En: *Metalografía y Tratamientos térmicos*. s.l.:s.n.
- [29] Vega, S., 2014. *Fabricación aditiva mediante sinterizado láser de polvos de acero inoxidable martensítico AISI 420*, s.l.: Universidad de Oviedo.
- [30] Vilanova, M. y otros, 2021. The limit of hot isostatic pressing for healing cracks present in an additively manufactured nickel superalloy. *Journal of Materials Processing Tech.*
- [31] <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines>