



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

TRABAJO FINAL DEL

REALIZADO POR

TUTORIZADO POR

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

Resumen

La reducción de peso de componentes estructurales resulta relevante en cualquier aplicación industrial, pero es de especial relevancia en el ámbito aeronáutico y aeroespacial. Los algoritmos de optimización pueden ser utilizados para reducir el peso de componentes estructurales bajo restricciones de tensión para garantizar su integridad estructural. En este trabajo se pretende estudiar la viabilidad del uso de técnicas de optimización topológica en el diseño estructural de componentes aeronáuticos. En concreto se pretende considerar las técnicas de optimización topológica basadas en el *Cartesian Grid Finite Element Method* (cgFEM) desarrollado por profesorado del Dpto. de Ingeniería Mecánica y Materiales de la UPV. Por sus características, estas técnicas permiten obtener soluciones con buena definición geométrica en tiempos de cálculo muy competitivos. Para realizar este estudio de viabilidad, el estudio se centrará en la optimización de un patín de helicóptero.

Resum

La reducció de pes de components estructurals resulta rellevant en qualsevol aplicació industrial, però és d'especial rellevància en l'àmbit aeronàutic i aeroespacial. Els algoritmes d'optimització poden ser utilitzats per a reduir el pes de components estructurals sota restriccions de tensió per a garantir la seua integritat estructural. En aquest treball es pretén estudiar la viabilitat de l'ús de tècniques d'optimització topològica en el disseny estructural de components aeronàutics. En concret es pretén considerar les tècniques d'optimització topològica basades en el *Cartesian Grid Finite Element Method* (cgFEM) desenvolupat per professorat del Dpto. d'Enginyeria Mecànica i Materials de la UPV. Per les seues característiques, aquestes tècniques permeten obtindre solucions amb bona definició geomètrica en temps de càlcul molt competitiu. Per a realitzar aquest estudi de viabilitat, l'estudi se centrarà en l'optimització d'un patí d'helicòpter.

Abstract

The reduction of weight of structural components is relevant in any industrial application, but it is especially relevant in the aeronautical and aerospace field. Optimization algorithms can be used to reduce the weight of structural components under stress constraints to ensure their structural integrity. This work aims to study the feasibility of using topological optimization techniques in the structural design of aeronautical components. Specifically, the aim is to consider topological optimization techniques based on the *Cartesian Grid Finite Element Method* (cgFEM) developed by professors from the UPV's Department of Mechanical and Materials Engineering. Due to their characteristics, these techniques allow obtaining solutions with good geometric definition in very competitive calculation times. To carry out this feasibility study, the study will focus on the optimization of a helicopter skate.

Índice general

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. Memoria | 9 |
| 1.1. Introducción | 9 |
| 1.1.1. cgFEM-Cartesian Grid Finite Element Method | 11 |
| 1.1.2. Aproximación de SIMP | 14 |
| 1.1.3. Restricción de tensión | 17 |
| 1.1.4. Estrategias de mejora de la optimización topológica | 18 |
| 1.2. Objeto | 22 |
| 1.3. Planteamiento de soluciones alternativas y justificación de la solución adoptada | 23 |
| 1.4. Descripción detallada de la solución adoptada | 25 |
| 1.4.1. Propiedades Físicas y Mecánicas | 25 |
| 1.4.2. Geometría | 26 |
| 1.4.3. Elementos Pasivos | 28 |
| 1.4.4. Condiciones Dirichlet | 29 |
| 1.4.5. Condiciones Neumann | 30 |
| 1.4.6. Malla | 34 |
| 1.4.7. Elasticidad | 35 |
| 1.4.8. Optimización | 37 |
| 1.5. Estudio de necesidades: Limitaciones y condicionantes | 43 |
| 1.6. Conclusiones | 44 |
| 1.7. Futuro | 45 |
| 2. Planos | 46 |
| 3. Pliego de condiciones | 47 |
| 3.1. Objeto | 47 |
| 3.2. Condiciones de los materiales | 47 |
| 3.2.1. Descripción | 47 |
| 3.2.2. Control de calidad | 48 |
| 3.3. Condiciones de la ejecución | 51 |
| 3.4. Condiciones Legales | 51 |
| 3.5. Condiciones Administrativas | 51 |

| | |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| 4. Presupuesto | 53 |
| 4.1. Introducción | 53 |
| 4.2. Equipos y licencias | 53 |
| 4.3. Mano de obra directa | 54 |
| 4.4. Presupuesto de ejecución | 55 |
| 4.5. Presupuesto Total | 55 |
| 5. Anexo: Manual del usuario | 61 |
| 5.1. Preproceso | 61 |
| 5.1.1. Función Principal | 61 |
| 5.1.2. Funciones y herramientas secundarias | 63 |
| 5.2. Postproceso | 67 |

Índice de figuras

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Método de elementos finitos de cuadrícula cartesiana (cg-FEM). Representación del dominio físico y la discretización del dominio ficticio. | 12 |
| 1.2. Diferentes dominios involucrados en un análisis de elementos finitos en cgFEM. | 13 |
| 1.3. Estándar vs Malla vóxeles: representación de ρ | 18 |
| 1.4. Malla h -adaptativa | 19 |
| 1.5. Refinamiento por densidades viga biapoyada con carga vertical en medio y plano de simetría | 20 |
| 1.6. Modelo del dominio en 3D - Vista 2D del problema de optimización, incluyendo la solución analítica ($R_{opt} = 9,0468$) . . | 21 |
| 1.7. Modelo del dominio 3D | 22 |
| 1.8. Geometría Primera Prueba | 23 |
| 1.9. Geometría Segunda Prueba | 24 |
| 1.10. Geometría Tercera Prueba | 24 |
| 1.11. Geometría Sistema Completo | 26 |
| 1.12. Geometría Optimización | 27 |
| 1.13. Elementos Pasivos | 28 |
| 1.14. Superficies Condiciones Dirichlet | 29 |
| 1.15. Bell AH-1 Cobra | 32 |
| 1.16. Superficies Condiciones Neumann | 33 |
| 1.17. Mallado | 34 |
| 1.18. Tensión Von Mises (Pa) | 35 |
| 1.19. Desplazamientos (m) | 36 |
| 1.20. Geometría Algoritmo SIMP | 38 |
| 1.21. Tensiones Geometría Algoritmo SIMP | 39 |
| 1.22. Geometría Final | 41 |
| 1.23. Tensiones Geometría Final | 42 |
| 5.1. Sección primera de la función principal <i>Batch_FEAVox.m</i> . | 61 |
| 5.2. Sección segunda de la función principal <i>Batch_FEAVox.m</i> . | 62 |
| 5.3. Sección tercera de la función principal <i>Batch_FEAVox.m</i> . . | 63 |
| 5.4. Prob_DirichletConditions.m | 64 |
| 5.5. Prob_NeumannConditions.m | 64 |

| | |
|----------------------------------------------------------|----|
| 5.6. Opt_PassiveElements.m | 65 |
| 5.7. Opt_DataInitialization y Opt_DefineVoxels | 66 |
| 5.8. Opt_DataInitialization 2 | 67 |
| 5.9. Elasticity output | 67 |
| 5.10. Optimization output | 68 |
| 5.11. Optimization Stresses output | 69 |

Índice de tablas

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Algoritmo de minimización de <i>compliance</i> | 15 |
| 1.2. Algoritmo de minimización de volumen con restricción de tensión de Von Mises | 17 |
| 1.3. Aleaciones Aluminio Propuestas | 25 |
| 1.4. Datos Test caída límite | 32 |
| 1.5. Presiones utilizadas optimización | 33 |
| 1.6. Valores máximos de tensión para cada iteración de la fracción de volumen | 40 |
| 3.1. Programas utilizados | 50 |
| 4.1. Amortización equipos y licencias | 54 |
| 4.2. Presupuesto de ejecución | 55 |
| 4.3. Presupuesto total | 55 |

Capítulo 1

Memoria

1.1. Introducción

La importancia del peso en la industria aeronáutica resalta por ser su principal preocupación. Es un hecho que constituye uno de los factores más relevantes por detrás de la aerodinámica y el rendimiento de los motores, en definitiva, es una obsesión.

El peso constituye un aspecto fundamental tanto en las etapas de diseño como en su funcionamiento diario. El principal inconveniente se debe a que a pesar de que si que se sabe cómo puede afectar esta variable, no se conoce en que medida puede llegar a hacerlo. Pongo por caso, lo expuesto en el artículo de Peggy Hollinger [1], en concreto una intervención de Ric Parker donde se especifica como una disminución de 454 kg en un motor equivale a una reducción del 1 % en el consumo de combustible. Es decir, cualquier reducción del peso de un elemento permite una mejora en el comportamiento del vehículo.

Frente a esta necesidad la optimización adquiere importancia. La optimización topológica es una técnica englobada dentro del campo de análisis estructural. Se basa en el análisis mecánico de un componente o estructura. Su principal objetivo es el aligeramiento estructural manteniendo las funcionalidades mecánicas del componente objetivo. A diferencia de otros tipos de optimización, la optimización topológica ofrece un nuevo concepto de diseño estructural enfocado a aquellas aplicaciones donde el peso del componente es crucial. En los problemas de optimización estructural es bastante común el uso del Método de Elementos Finitos (FEM) para evaluar tanto la función objetivo como las restricciones.

Por consiguiente, surgen diferentes tipos de optimización, dependiendo de las condiciones del problema que se quiera solventar. En primer lugar la

optimización de forma. Esta modifica la geometría de un determinado dominio sin modificar su topología, es decir, sin crear cavidades en su interior. El principal inconveniente de este tipo de optimización corresponde a que solo se permiten cambios en la frontera del dominio, limitando en gran medida su campo de aplicación.

Por otro lado, la optimización topológica permite modificando la topología de un dominio obtener la configuración deseada partiendo de una morfología inicial distante de la óptima. Es un problema definido por una gran cantidad de parámetros, que dependen del número de elementos utilizados en la discretización del espacio de diseño. Además caracteriza la topología de un problema en función de la densidad. De manera que la solución de un problema corresponde a una distribución ficticia de material, utilizando métodos de penalización para obtener un resultado realmente útil. En este estudio se ha hecho uso de la técnica utilizada por SIMP (*Solid Isotropic Material Definition*) [2], donde se genera un campo de densidades en el espacio de diseño para representar la cantidad de material de cada elemento, variando la densidad entre 0 (no hay material) y 1 (material totalmente denso).

En esencia, la optimización topológica corresponde a un algoritmo de optimización el cuál busca la distribución óptima de material dentro de un espacio de diseño. Sin embargo, no siempre se obtienen imágenes nítidas tras este proceso, en la mayoría de los casos aparecen figuras irregulares que no pueden ser fabricadas de manera directa. Requieren de una mejor definición de los límites, consiguiéndose ésto, por ejemplo, a través del refinamiento de la malla sobre aquellas regiones donde las densidades presentan valores intermedios.

El hecho de que esta técnica (Optimización Topológica) no sea muy común se debe a su elevado coste computacional y a que las soluciones que proporciona pueden resultar geoméricamente muy complejas, lo que dificulta su fabricación mediante técnicas tradicionales. La flexibilidad que proporciona la fabricación aditiva ha hecho crecer enormemente el interés por las técnicas de optimización topológica. En este trabajo se hará uso de una implementación de optimización topológica realizada sobre el Cartesian grid finite element method (cgFEM) . Se hará uso del cgFEM elaborado por el Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales (DIMM)

Para poder comprender el proceso de optimización es necesario entender cómo ha sido creado el programa que permite su ejecución y como éste se ha ido adaptando a las necesidades que han surgido.

1.1.1. cgFEM-Cartesian Grid Finite Element Method

En primer lugar, la eficacia computacional del análisis de elementos finitos constituye un factor muy relevante en la optimización topológica dado que se trata de un proceso iterativo que exigirá la realización de numerosos análisis de elementos finitos. El uso de mallas donde todos los elementos tienen la misma forma ayuda a mejorar el rendimiento del computador de elementos finitos, permitiendo que solamente haga falta evaluar la matriz de rigidez de uno de los elementos.

De esta forma, la matriz de rigidez de cualquier elemento es fácilmente obtenida escalando la matriz original si el elemento es de un tamaño diferente. De hecho, en muchos de los ejemplos numéricos que se presentan en la literatura sobre optimización topológica, el dominio utilizado corresponde a un rectángulo para 2D y un cuboide para 3D, pues estas geometrías son fácilmente malladas mediante elementos cartesianos. Sin embargo, las aplicaciones prácticas no pueden ser restringidas exclusivamente a este tipo de dominios, puesto que no se puede asegurar que todos los elementos de la malla generada vayan a tener la misma forma.

Por consiguiente, surge el uso de FDM, donde la malla no necesariamente es conforme a la geometría, como en el caso de Finite Cell Method [7, 8, 9], de CutFEM [10] o el caso de Cartesian Grid Element Method (cgFEM). Es por tanto por lo que se proponen una colección de técnicas desarrolladas dentro del marco de cgFEM [3, 11] para mejorar la actuación del algoritmo de optimización en términos de:

- a. Precisión de los resultados de elementos finitos, para mejorar la fiabilidad de la solución
- b. Precisión en la definición de las fronteras, para mejorar la aptitud para la fabricación del resultado final
- c. Eficiencia computacional, para controlar y reducir el coste del proceso de optimización

No obstante, es necesaria la comprensión de los aspectos más relevantes de cgFEM, como éste se puede adaptar para la resolución de problemas de optimización topológica y qué técnicas de mejora pueden utilizarse.

En primer lugar, el uso de FDM (Fictitious Domain Methods) ha ido ganando popularidad debido a la reducción de la carga computacional de la generación de la malla, convirtiendo el proceso de mallado en algo prácticamente trivial. La idea principal de FDM consiste en trasladar el problema de análisis estructural a un dominio ficticio donde es mucho más sencillo

mallar el dominio físico dentro de unos límites mucho más complejos.

En cgFEM el dominio ficticio es un cuboide que envuelve a la geometría a analizar. En el nivel 0 de malla, la malla de elementos finitos usada para modelar el dominio ficticio estaría formada por un único elemento hexaédrico. Los elementos del nivel 1 de malla se crean subdividiendo dicho elemento en 8 elementos iguales, semejantes al original y de la mitad de tamaño (en cada dirección) que este. Aplicando esta subdivisión de elementos de manera recursiva se obtienen elementos de niveles 2,3...etc.

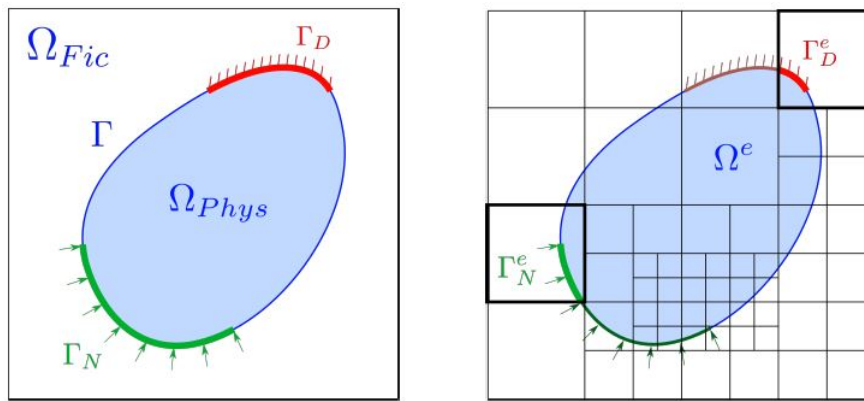


Figura 1.1: Método de elementos finitos de cuadrícula cartesiana (cgFEM). Representación del dominio físico y la discretización del dominio ficticio.

Sin embargo, todas estas ventajas vienen acompañadas de algunos inconvenientes que no se pueden pasar por alto. Como es el caso de aquellos elementos que han sido cortados por la frontera, dónde únicamente se considera la parte del elemento dentro del dominio en la integración.

Recogemos aquí las características principales del software de cgFEM en la discretización del dominio ficticio:

- a. Constituye una eficiente técnica de análisis a través de los elementos finitos que considera la discretización cartesiana del dominio, presentando una estructura jerárquica de datos, que resultan sencillos de gestionar a pesar de los diferentes niveles de refinamiento.
- b. El análisis que realiza de la malla puede considerar elementos de diferentes niveles de refinamiento. Los elementos siempre se encuentran dentro del dominio o han sido intersecados por la frontera pero nunca fuera de ésta.
- c. Utiliza una malla de integración basada en la aproximación de NEFEM

[20] que permite considerar una representación de la frontera exacta mediante NURBS o mediante T-Splines.

- d. Considera procesos de refinamiento basados en la geometría y en la estimación de error de Zienkiewicz y Zhu [34]
- e. Utiliza procedimientos de estabilización para los multiplicadores de Lagrange utilizados para imponer las restricciones de desplazamiento. Se puede consultar las referencias [15, 35] para mayores detalles acerca de la técnica de estabilización usada por cgFEM.

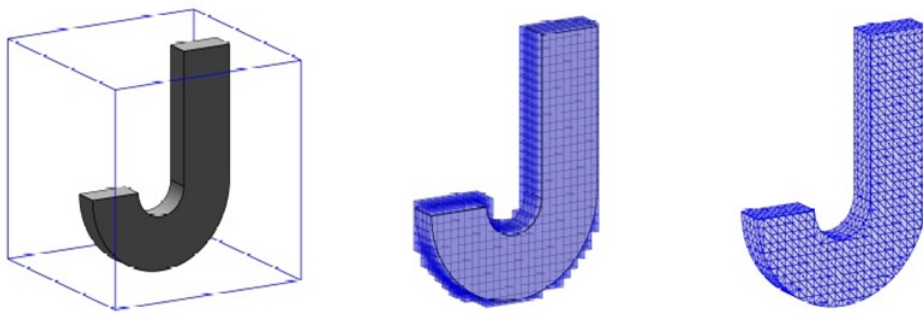


Figura 1.2: Diferentes dominios involucrados en un análisis de elementos finitos en cgFEM.

1.1.2. Aproximación de SIMP

Una vez conocido lo relativo a la discretización del dominio para la integración de la malla, corresponde comentar cual es la aportación de SIMP al programa utilizado.

En optimización topológica se calcula la distribución de material óptima en un dominio Ω . Para resolver el problema de optimización en SIMP la densidad es considerada como una variable continua, en contra de una variable discreta (valor 0 o 1). De manera que para hacer cumplir al máximo la segregación de material, en el método se utiliza un parámetro de penalización p para las densidades intermedias. Entonces SIMP presenta el siguiente problema de optimización:

$$(\text{T}\mathcal{O}) = \begin{cases} \text{mín :} & c(\mathbf{x}) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \int_{\Omega} \epsilon(\mathbf{u}) \mathbf{D}(\rho) \epsilon(\mathbf{u}) \\ \text{subject to:} & \mathbf{D}(\rho) = \rho^p \mathbf{D}_0 \\ & V(\rho) = \int_{\Omega} \rho d\Omega = \bar{V}_e \sum \rho_e = v_f V_0 \\ & \mathbf{K}(\rho) \mathbf{u} = \mathbf{F} \\ & \mathbf{0} \leq \rho_{min} \leq \rho \leq \mathbf{1}, \end{cases} \quad (1.1)$$

Dónde c representa la *compliance*. La minimización de c supone la minimización de la energía de deformación elástica o, de manera equivalente, la maximización de la rigidez del componente. Por otra parte, ϵ corresponde al campo de deformaciones y \mathbf{u} el de desplazamientos. \mathbf{D} es la matriz de la ley de Hook que relaciona las tensiones σ con las deformaciones ϵ . Tal y como se muestra en la ecuación 1.1, en SIMP, \mathbf{D} es definida como una función de \mathbf{D}_0 , que corresponde a la matriz de la ley de Hook para material completamente denso, un campo de densidades ρ y el parámetro de penalización p .

Un valor de $p=3$ es ampliamente utilizado en la literatura, principalmente porque proporciona unos resultados que satisfacen el límite de Hashin-Shtrikamn para materiales compuestos [22]. No obstante, es importante definir el valor del parámetro p , puesto que puede influenciar en la convergencia del algoritmo de optimización. La estrategia propuesta por SIMP comienza con un valor de $p=1$ que va aumentando hasta llegar a $p=3$ durante el proceso de convergencia.

Para actualizar el diseño de la distribución del material, se necesita la sensibilidad de *compliance*. En [23] se aplica un filtro paso bajo para evitar inestabilidades numéricas [25, 26] como un patrón del tipo tablero de ajedrez. Este filtro se evalúa:

$$\widehat{\frac{\partial c}{\partial \rho_e}} = \frac{1}{\rho_e \sum_{f=1}^N \widehat{H}_f} \sum_{f=1}^N \widehat{H}_f \rho_f \frac{\partial c}{\partial \rho_f} \quad (1.2)$$

con \widehat{H}_f definido como:

$$\widehat{H}_f = r_{min} - dist(e, f), \quad (1.3)$$

$$\{f \in N \mid dist(e, f) \leq r_{min}\},$$

$$e = 1, 2, \dots, N,$$

donde e define el elemento que se va a filtrar y f constituyen los vecinos del elemento e . Los vecinos aparecen definidos como los elementos situados a una distancia menor o igual a r_{min} . El uso de esta técnica se debe a su simplicidad.

Como se ha comentado el algoritmo usa las sensibilidades filtradas para obtener la nueva distribución de material. Precisamente este algoritmo corresponde al Optimality Criteria (OC) [23], aunque también existen otras alternativas como el Method of Moving Asymptotes (MMA) [28] y el Sequential Quadratic Programming (SPQ) [29]. Las iteraciones se producen hasta que el criterio de convergencia es alcanzado.

Algoritmo 1: SIMP (v_f) Algoritmo de minimización de cumplimiento

```

Define  $v_f$ 
Iniciar contador:  $i = 0$ 
Iniciar densidad relativa de cada elemento  $e : \rho_{e_i} = v_f$ 
Repetir=1
while Repetir=1 do
    Realizar análisis Elementos Finitos
    Obtener compliance  $c_i$  y sensibilidades  $dc_i/d\rho_{e_i}$ 
    Filtrar sensibilidades
    Actualizar campo de densidades relativas:  $\rho_{e_{i+1}} = f(\rho_{e_i}, dc_i/d\rho_{e_i})$ 
    if  $\|\rho_{e_{i+1}} - \rho_{e_i}\| \leq tolerance$  then
        Repetir=0
    end
     $i = i + 1$ 
end

```

Tabla 1.1: Algoritmo de minimización de *compliance*

Una vez conocido el algoritmo utilizado por SIMP, es preciso implementar algunos cambios para poder trabajar con las características siguientes:

- Elementos de diferente tamaño.
- Que solo la parte del elemento que se encuentre dentro del dominio sea considerada

Para ello el volumen del dominio, es evaluado (una vez discretizado) como la distribución del volumen de cada elemento e dentro del dominio físico:

$$V(\rho) = \sum_e V_e \rho_e \quad (1.4)$$

Por lo tanto, las sensibilidades de volumen deben evaluarse para lograr la restricción de volumen al actualizar la distribución de material ρ , tal que:

$$\frac{\partial V(\rho)}{\partial \rho_e} = V_e, \quad (1.5)$$

Análogamente, la expresión que calcula las sensibilidades filtradas 1.1 deben modificarse para tener en cuenta el volumen de cada elemento V_e de la siguiente manera:

$$\frac{\widehat{\partial c}}{\partial \rho_e} = \frac{1}{\rho_e \sum_{f=1}^N \widehat{H}_f V_f} \sum_{f=1}^N \widehat{H}_f \rho_f V_f \frac{\partial c}{\partial \rho_f} \quad (1.6)$$

Finalmente, para adaptar todas las características mencionadas previamente, la formulación utilizada debe modificarse. Por una parte, considerando que cada elemento tiene su propio volumen ya sea porque la malla esta h -adaptada o porque el elemento esta cortado por la frontera del dominio. Y en segundo lugar, la ecuación $\mathbf{K}(\rho)\mathbf{u} = \mathbf{F}$ debe ser sustituida por $\mathbf{K}^*(\rho)\mathbf{u} = \mathbf{F}^*$ donde $\mathbf{K}^* = \mathbf{K}(\rho) + \mathbf{K}_{Dirichlet}$ y $\mathbf{F}^* = \mathbf{F} + \mathbf{F}_{Dirichlet} + \mathbf{F}_{Stabilization}$, considerando que los términos de $\mathbf{K}_{Dirichlet}$ y $\mathbf{F}_{Dirichlet}$ son impuestos en las condiciones de Dirichlet.

1.1.3. Restricción de tensión

La restricción de tensión es bastante común en problemas estructurales. No obstante el algoritmo utilizado en SIMP está basado en restricción de volumen. Es por ello que se propone una modificación en este para imponer la restricción por tensión. Esta modificación consiste en incluir un bucle en el volumen de la fracción que considera la restricción $\sigma_{VM} \leq S_y$, donde σ_{VM} corresponde a la tensión de Von Misses y S_y al límite de fluencia del material.

De esta forma la fracción de volumen va variando en función de la tensión máxima, iterando hasta alcanzar un valor similar a la tensión máxima de fluencia, tal y como aparece en la Tabla 1.2.

Algoritmo 2: Minimización de volumen con restricción de tensión

Iniciar contador: $i = 0$

Iniciar fracción de volumen v_f^i

Repetir=1

while *Repetir*=1 **do**

$i = i + 1$

 Ejecutar Algoritmo 1 v_f^i

 Obtener las tensiones de la distribución óptima del diseño

 Evaluar la tensión máxima de Von Mises $\max(\sigma_{VM}^i)$

 Actualizar volumen de la fracción: $v_f^{i+1} = f(v_f^i, \max(\sigma_{VM}^i), S_y)$

if $\max(\sigma_{VM}^i) = S_y$ **then**

Repetir=0

end

end

Tabla 1.2: Algoritmo de minimización de volumen con restricción de tensión de Von Mises

1.1.4. Estrategias de mejora de la optimización topológica

Precisamente dentro de cgFEM, se dispone de multitud de herramientas para mejorar el proceso de optimización topológica sobre un componente.

Voxel Integration

Una de las aplicaciones de cgFEM es la creación automática de mallas de elementos finitos a partir de imágenes [30], donde la información se almacena en la memoria usando también un formato cartesiano. Los vóxeles de cada elemento serán acoplados al elemento y considerados como subdominios de integración. De esta forma, en esta técnica de modelado se encuentran dos mallas:

- Malla de análisis.
- Malla de integración.

Precisamente, la malla de integración, que puede ser mucho más fina que la de análisis, está definida por los vóxeles y representa la distribución de material en el modelo.

Se propone por tanto el uso de una malla de análisis para el análisis de elementos finitos, y una malla más fina para la integración, obtenida a partir de la subdivisión de elementos en 2^3 subdominios de integración. En la siguiente figura se aprecia claramente la diferencia entre una aproximación sin vóxeles y una con en una malla con elementos de diferente tamaño.

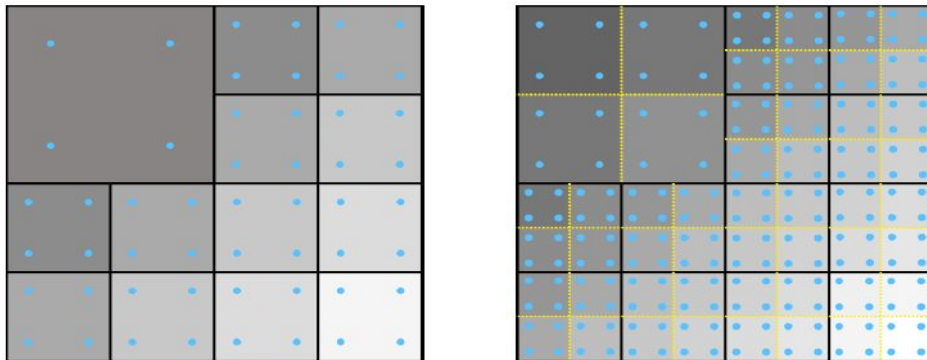


Figura 1.3: Estándar vs Malla vóxeles: representación de ρ

En la integración de vóxeles, las variables diseñadas no están asociadas a los elementos, en su lugar, están asociadas a los subdominios de integración de los elementos. Es por tanto, que las sensibilidades de conformidad deben realizarse al nivel de los subdominios de integración y el radio del filtro debe estar relacionado con el tamaño de los subdominios de integración.

Refinamiento con malla adaptativa

En primer lugar, la precisión de los bordes depende del tamaño del filtro y del tamaño del elemento utilizado para el proceso de optimización. Sin embargo, la complejidad del proceso está directamente relacionada con ambas variables. De manera que, para desacoplarlas obteniendo una definición elevada en la representación de los bordes y un bajo coste computacional, se introduce el refinamiento con malla h -adaptativa. Un claro ejemplo de este tipo de refinamiento se puede apreciar en la Figura 1.4

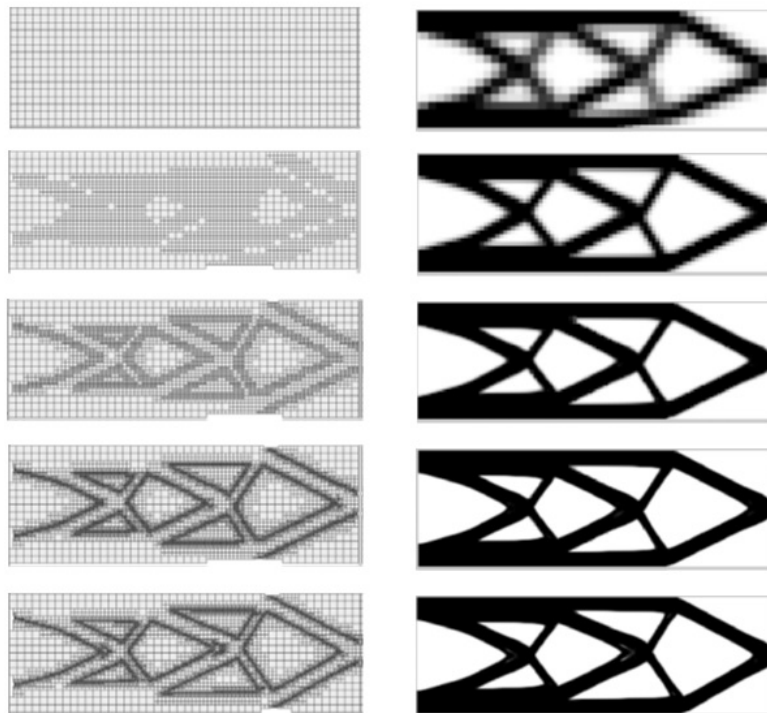


Figura 1.4: Malla h -adaptativa

Diferentes estrategias de refinamiento:

- Refinamiento de densidades; donde la malla se refina en aquellas regiones con densidades intermedias.
- Refinamiento de error; donde la malla se refina en regiones donde el error estimado de la discretización es mayor.

En ambos casos, la malla se refina mediante una división de elementos, donde cada elemento se divide en 8 elementos de mitad de tamaño en cada

dirección, y, además se fijan restricciones para garantizar la continuidad del campo de desplazamientos en todos los niveles [33].

Refinamiento Densidades Este criterio de refinamiento consiste refinar los elementos cuya densidad relativa alcanza valores intermedios, es decir, cuya densidad pertenece al siguiente rango $1 > \rho > \rho_{min}$. Por tanto se definirá un conjunto de elementos a refinar como el conjunto de elementos de tamaño $h > h_{min}$ donde $1 > \rho > \rho_{min}$, donde h_{min} es el tamaño mínimo de elemento definido por el usuario. En la siguiente Figura 1.5, se puede apreciar un ejemplo de este tipo de refinamiento.

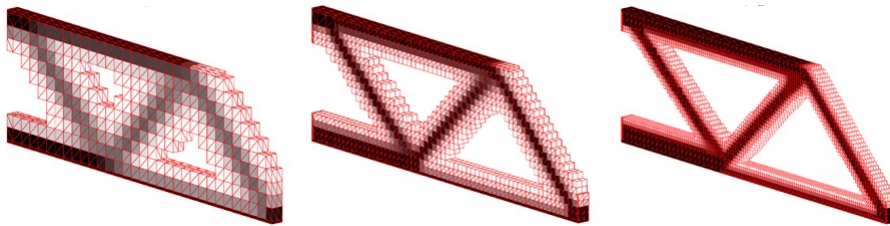


Figura 1.5: Refinamiento por densidades viga biapoyada con carga vertical en medio y plano de simetría

Refinamiento Error Este segundo criterio consiste en adaptar la malla en base a la precisión de la solución numérica, evaluada en términos de la estimación del error de discretización en la norma energética. El refinamiento por error no refina los elementos de valores intermedios de ρ , por lo que no mejorará la representación de la frontera. No obstante combinando esta técnica con la de refinamiento por densidades permite desarrollar una nueva función. Mientras que el objetivo del refinamiento por error será aumentar la precisión de los resultados de los elementos finitos, el objetivo del refinamiento por densidades será mejorar la representación de la frontera.

Para posteriormente seleccionar la combinación más adecuada para la representación de nuestro problema se ha hecho uso de los resultados obtenidos en el artículo [38] donde se comparan las diferentes técnicas respecto a una solución analítica. Lo que permite conocer la precisión de cada una de las combinaciones posibles.

La geometría de referencia es una viga de área transversal hueca constante, con dos planos de simetría perpendiculares en $x=0$ y $z=0$, sometida a una presión interna en la superficie cilíndrica Figura 1.6

Es por tanto que al observar las diferentes técnicas presentadas en comparación con la solución analítica, en el artículo [38] se establece que la me-

La mejor combinación de representación viene dada por la combinación del uso de vóxeles de integración, refinamiento por densidades y refinamiento por error.

Precisamente se estipula que, a pesar de que el uso de vóxeles permite reducir el tamaño de la región de valores de ρ intermedios, la mejora más significativa en la definición de la frontera viene dada por el refinamiento por densidad. No obstante, la mejora de la definición de la frontera no viene acompañada de la colocación de esta en el lugar adecuado. Este hecho requiere del uso de refinamiento por error para obtener una solución lo más definida y precisa posible.

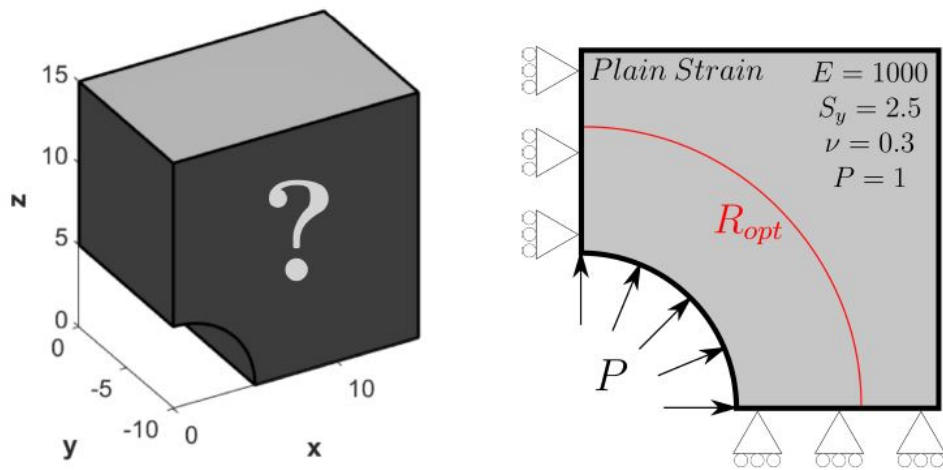


Figura 1.6: Modelo del dominio en 3D - Vista 2D del problema de optimización, incluyendo la solución analítica ($R_{opt} = 9,0468$)

1.2. Objeto

Con el presente documento se pretende analizar la viabilidad del uso de técnicas de optimización topológica, haciendo uso del software diseñado por el DIMM (cgFEM), para diseñar componentes aeronáuticos, centrando el análisis, con ejemplo, en el diseño de un patín de un helicóptero.

También surgen objetivos indirectos como el aprendizaje de un lenguaje de programación, en el caso que nos concierne MatLab, el uso de programas de diseño (Autodesk Fusion 360 y GiD 12.0.11) para la realización de la geometría a optimizar. También el estudio de las tensiones y desplazamientos, y el aprendizaje de las diferentes técnicas de refinamiento de la malla a optimizar para la obtención de resultados que puedan ser llevados a la fabricación.

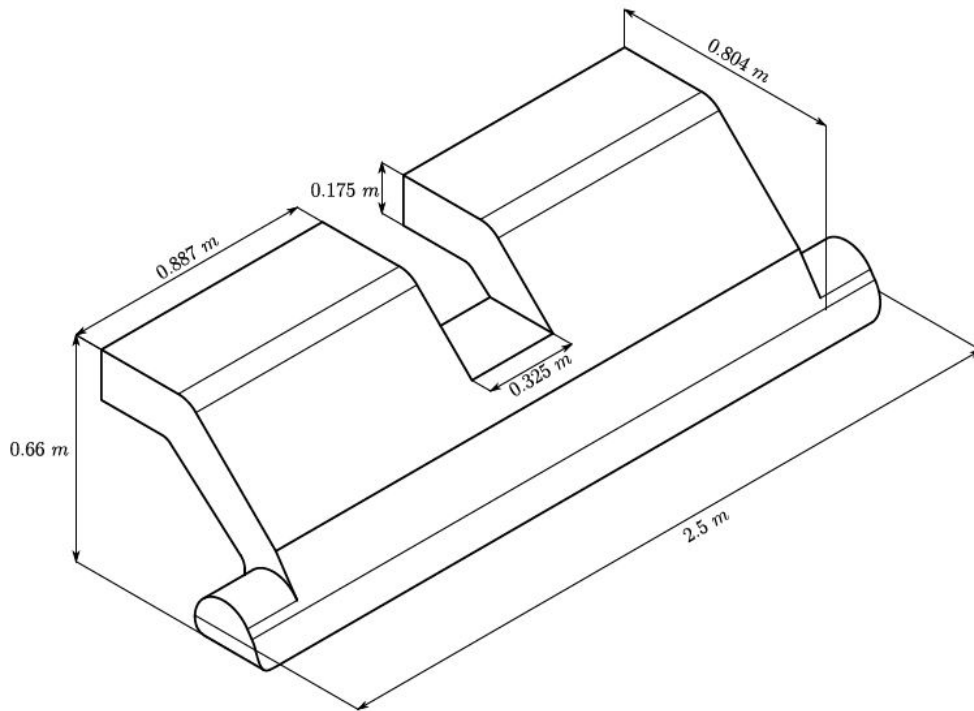


Figura 1.7: Modelo del dominio 3D

1.3. Planteamiento de soluciones alternativas y justificación de la solución adoptada

La optimización topológica es una herramienta que ayuda al ingeniero en el sentido de que es esta la que propone una geometría frente a las restricciones que se planteen sobre el problema. Carece de sentido analizar posibles alternativas puesto que la optimización propone la mejor opción posible de manera automática. No obstante si que se pueden presentar las diferentes geometrías y condiciones de las que se ha partido para la obtención de la solución final.

Debido a que cgFEM es una herramienta de análisis en desarrollo y, por tanto, no 100 % robusta, la selección de la geometría inicial se ha obtenido a partir de un método de prueba y error, matizando y modificando ésta, para obtener aquella que nos reduzca los problemas al máximo al cargar la geometría en MatLab y así facilitar la optimización. A continuación se muestran algunos ejemplos de geometrías que han sido descartadas, cuyos planos se encuentran en la sección correspondiente **Capítulo 2: Planos**.

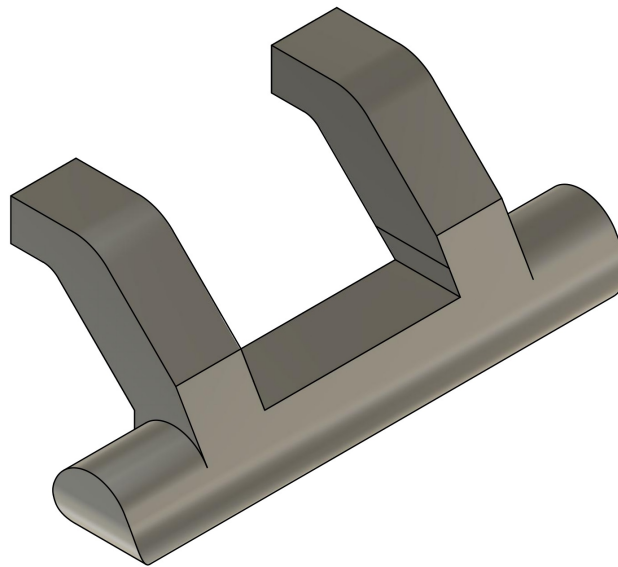


Figura 1.8: Geometría Primera Prueba

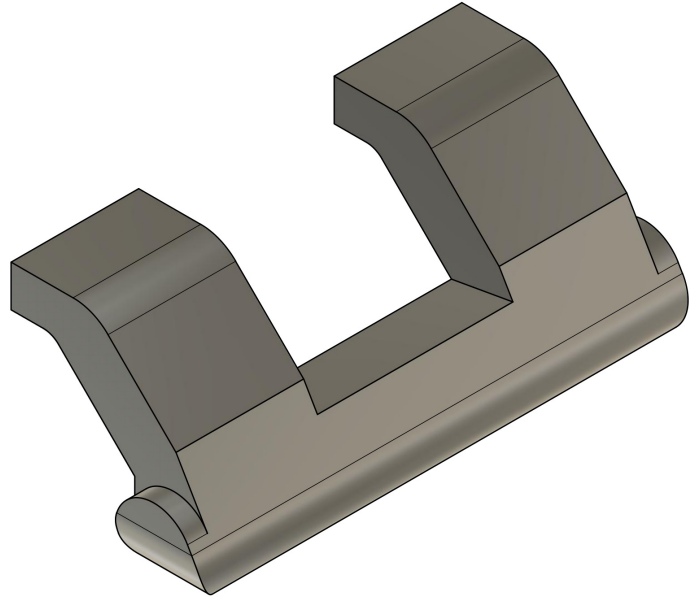


Figura 1.9: Geometría Segunda Prueba

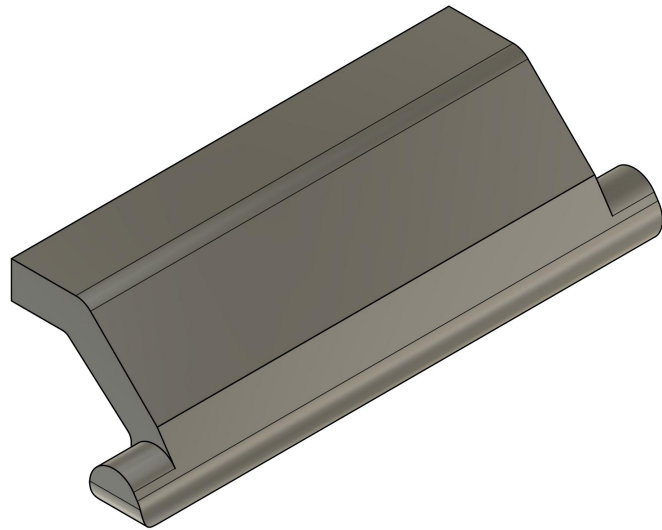


Figura 1.10: Geometría Tercera Prueba

1.4. Descripción detallada de la solución adoptada

1.4.1. Propiedades Físicas y Mecánicas

Antes de iniciar con la optimización de la geometría cabe mencionar el proceso de selección de los parámetros utilizados. En primer lugar, la selección del material. El más comúnmente utilizado para este sistema en particular corresponde al Al7075-T6. Se caracteriza por tener una elevada resistencia, utilizado para piezas estructurales sometidas a altos niveles de tensión, además de contar con un temple que ofrece una resistencia mejorada al agrietamiento por corrosión bajo tensión.

No obstante, tal y como se ha comentado, al incorporar al algoritmo de optimización de SIMP la variación de la fracción de volumen en función de las tensiones máximas, la cantidad de material irá ligada a las tensiones producidas por las cargas aplicadas. Cuánto mayores sean las cargas, mayor cantidad de material será necesaria para poder soportarlas sin producirse el fallo del componente por fluencia que será considerado en este trabajo.

Sin embargo es preciso considerar el material y el sistema utilizado en el ensayo [37], pues de éste extraemos las cargas que aplicaremos sobre nuestro sistema. Al encontrarse cgFEM en desarrollo, y no ser completamente robusto, se han obtenido problemas cuando las fracciones de volumen son pequeñas. Para el caso del aluminio de alta resistencia (Al7075-T6) se ha dado este caso, fracciones de volumen pequeñas. Por esta razón, se decide utilizar el Al1100-0, que al ser mecánicamente inferior, proporciona fracciones de volumen menos problemáticas para el estado de desarrollo actual de cgFEM.

| Propiedades | Al7075-T6 | Al1100-0 |
|-------------------------|---------------|---------------|
| Densidad | 2.81 g/cm^3 | 2.71 g/cm^3 |
| Dureza, Brinell | 150 | 23 |
| Resistencia a tracción | 503 MPa | 20 MPa |
| Carga de rotura | 572 MPa | 90 MPa |
| Módulo de Young | 71.7 GPa | 68.9 GPa |
| Coefficiente de Poisson | 0.33 | 0.33 |

Tabla 1.3: Aleaciones Aluminio Propuestas

1.4.2. Geometría

Bien es cierto que existen una serie de elementos que un patín debe contener. Sin embargo, se ha decidido aproximar todo el sistema a una pieza única para que el proceso de optimización tenga mayor libertad y nos permita el desarrollo de un elemento más innovador, cumpliendo siempre con todas las funciones que el sistema requiere.

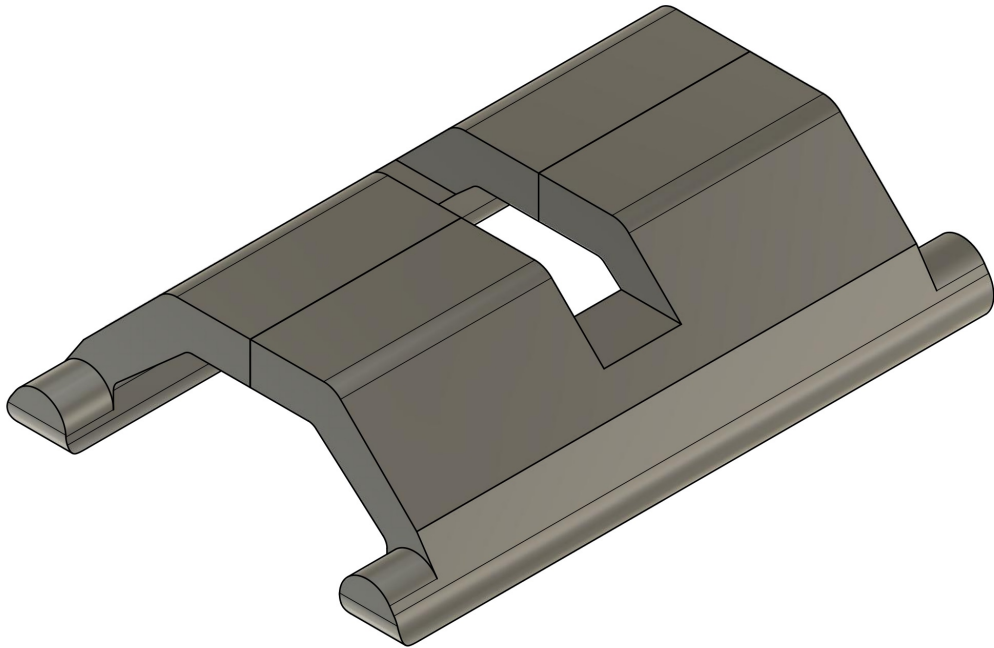


Figura 1.11: Geometría Sistema Completo

Para el proceso de optimización se ha hecho uso de solo la mitad de la geometría debido a su simetría. Dentro de cgFEM se han impuesto las condiciones necesarias para simular esta condición y así disminuir el coste computacional al trabajar con la mitad de elementos. Por tanto la geometría con la que se ha trabajado corresponde a la de la Figura 1.12 y constituirá nuestro espacio de trabajo.

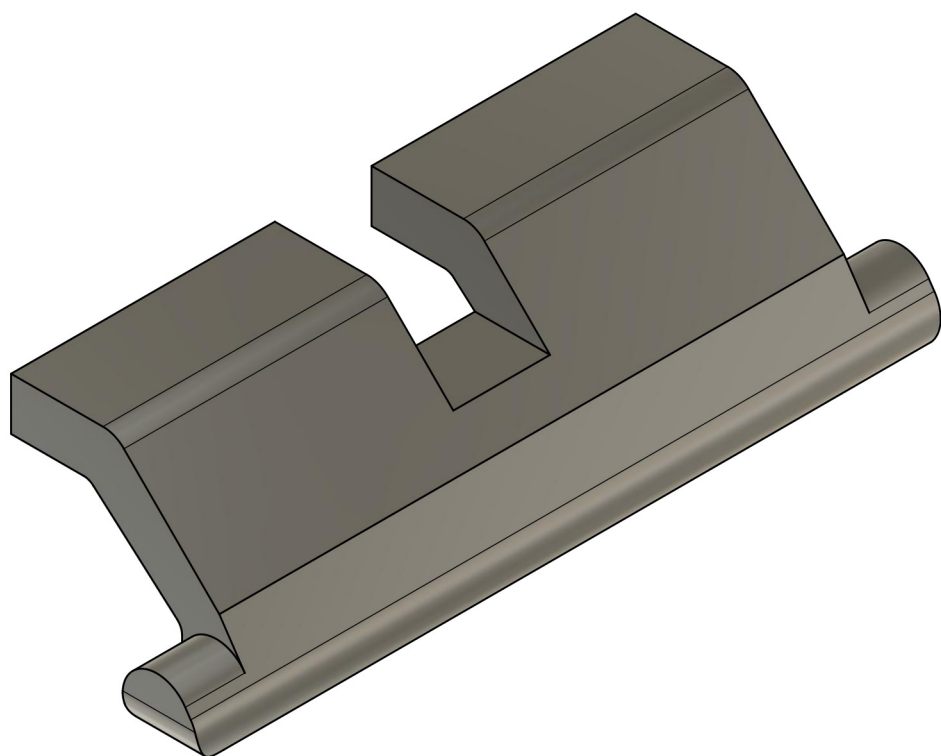


Figura 1.12: Geometría Optimización

1.4.3. Elementos Pasivos

Dentro de la optimización, es necesario que el resultado final desempeñe la función para la cual está siendo optimizada. Es por ello que, aunque durante la optimización se vaya eliminando material que resulta prescindible para el funcionamiento de la pieza, algunas superficies es necesario que permanezcan para garantizar precisamente su función final.

Estas superficies imprescindibles dentro del programa se conocen como los elementos pasivos. Estos elementos son fijados antes del proceso iterativo para asegurarse de su presencia al obtener el resultado final optimizado.

En este caso en concreto, fueron las superficies pertenecientes al tubo longitudinal donde el patín se apoya en el suelo, tanto la parte plana como la curva de la punta, tal y como se encuentra en la Figura 1.13

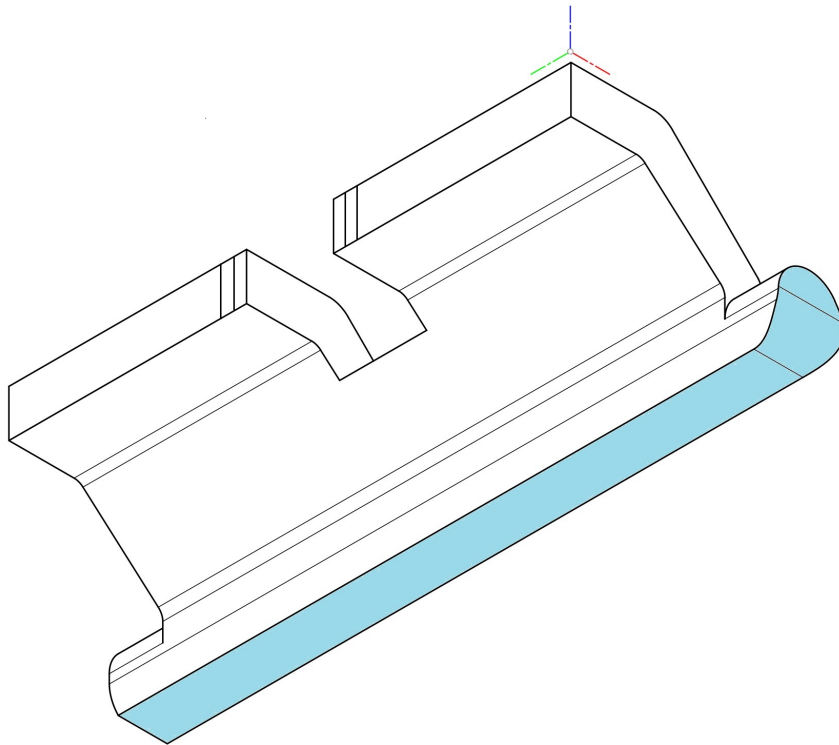


Figura 1.13: Elementos Pasivos

1.4.4. Condiciones Dirichlet

La optimización de la geometría depende en gran medida de las restricciones que se impongan, con el objetivo de aproximarse lo máximo posible a la realidad. Es por ello que se han impuesto las siguientes (Figura 5.3):

- Condiciones de frontera de Dirichlet
 - Superficie morada; se ha fijado una restricción que impide el desplazamiento vertical (Eje Azul Figura 1.14).
 - Superficie amarilla; se ha fijado una restricción impidiendo el desplazamiento en el plano horizontal (Ejes Rojo y Verde Figura 1.14)

Por consiguiente se ha restringido el desplazamiento de nuestro componente, intentando aproximarse a una situación real donde el sistema se encuentra anclado a la parte baja del fuselaje del helicóptero.

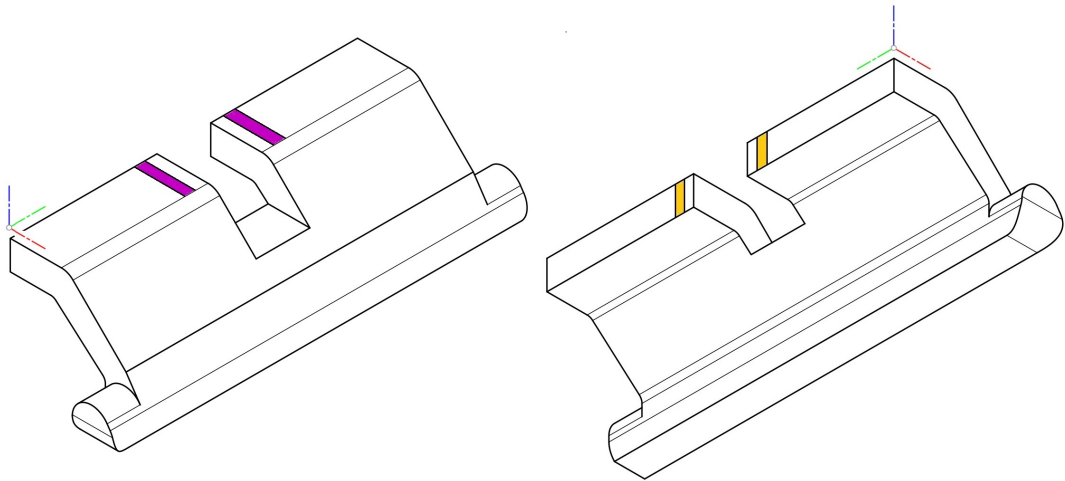


Figura 1.14: Superficies Condiciones Dirichlet

1.4.5. Condiciones Neumann

Las Condiciones de Neumann constituyen unas condiciones de frontera, que nos permite simular las cargas que la aeronave debe soportar en el aterrizaje, siendo las más críticas para el proceso de optimización. Durante la fase de vuelo, el tren de aterrizaje se considera como un elemento resistivo que se incluye en el término que hace referencia a la resistencia generada por el fuselaje, por lo que las cargas que el tren soporta en vuelo no han sido consideradas relevantes para el proceso de optimización.

Para ello, se ha considerado la normativa correspondiente **CS-27 Book 1, subparte C (Cargas) y D (Diseño y construcción)**. Dentro de ellas encontramos los puntos que nos afectan directamente:

a) CS 27.725 Limit drop test La prueba de caída límite debe realizarse de la siguiente forma. En primer lugar, la altura de la caída debe ser 0.33 m desde el punto más bajo del tren de aterrizaje hasta el suelo o cualquier altura no inferior a 0.20 m. Considerándose esta elevación, el sistema debe ser capaz de soportar la prueba haciendo uso de los dispositivos de absorción de energía apropiados o bien mediante el uso de una masa efectiva, cuya fórmula se muestra a continuación:

$$W_e = W \frac{h + (1 - L)d}{h + d} \quad (1.7)$$

Siendo W_e el peso efectivo que se utilizará en la prueba de caída, h la altura de caída libre especificada, L la relación entre la elevación supuesta del rotor y el peso del rotor y d la deflexión bajo impacto del neumático más el componente vertical del recorrido del eje en relación con la masa de caída.

b) CS 27.501 Ground loading conditions: landing gear with skids Dentro de este apartado se encuentra que las cargas finales de diseño deberán calcularse para una altura de caída en el "Limit drop test" de 1.5 veces la distancia estipulada en este, y distribuirse de manera homogénea a lo largo de la parte inferior del tubo deslizante. En cada situación (de aterrizaje), las cargas externas deben estar en equilibrio con las cargas inerciales lineales y angulares de manera conservativa. Además de que deben considerarse como cargas externas que actúan sobre la aeronave que se considera como un cuerpo rígido.

Una vez calculado el valor de las cargas verticales a través de la prueba de caída límite según lo dicho, se destaca que el patín deberá ser capaz de soportar las siguientes condiciones:

- Reacciones verticales, con el valor calculado en el "Limit drop test", combinadas con reacciones horizontales con un valor del 50 % del valor de la reacción vertical.

- Reacciones verticales, con el valor calculado en el "Limit drop test", combinadas con unas cargas laterales horizontales con un valor del 25 % de las verticales. Las cargas laterales deberán aplicarse por igual entre los patines, a lo largo de la longitud de ellos y tanto para cargas laterales de acción interna como para cargas laterales de acción hacia fuera.
- Reacciones verticales, con el valor calculado en el "Limit drop test", pero en este caso aplicadas sobre un único patín, suponiéndose que los momentos desequilibrados son resistidos por la inercia angular.
- Reacciones oblicuas, actuando hacia arriba y hacia atrás del patín con un ángulo de 45° al eje longitudinal, distribuidas simétricamente entre los patines, concentradas y aplicadas solo en el extremo delantero de la parte del tubo deslizante, con un valor de 1.33 veces el peso máximo de la aeronave.

Una vez conocidas todas las cargas que el sistema debería soportar para certificar su diseño, es preciso comentar que se ha decidido trabajar con el primero de los casos, considerando éste como el más común dentro de las maniobras de aterrizaje que un helicóptero realiza.

Para darle veracidad a la magnitud de las fuerzas utilizadas en el proceso de optimización se han hecho uso de los valores obtenidos en un ensayo de caída límite sobre helicóptero liviano [37]. En la Tabla 1.4, se encuentra el valor calculado de la fuerza vertical resultante para un test de caída límite sobre un Bell AH-1 Cobra (Figura 1.15) extrapolado a partir de los cálculos obtenidos en el artículo [37]

| Datos | Helicóptero Liviano | Bell AH-1 Cobra |
|----------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Peso máximo al despegue (W) | 480 <i>kg</i> | 4310 <i>kg</i> |
| Altura de la caída (h) | | 0,5 <i>m</i> |
| Aceleración máxima (a_{max}) | | 26 <i>m/s</i> ² |
| Fuerza vertical resultante (F) | 8450 <i>N</i> | 112060 <i>N</i> |

Tabla 1.4: Datos Test caída límite

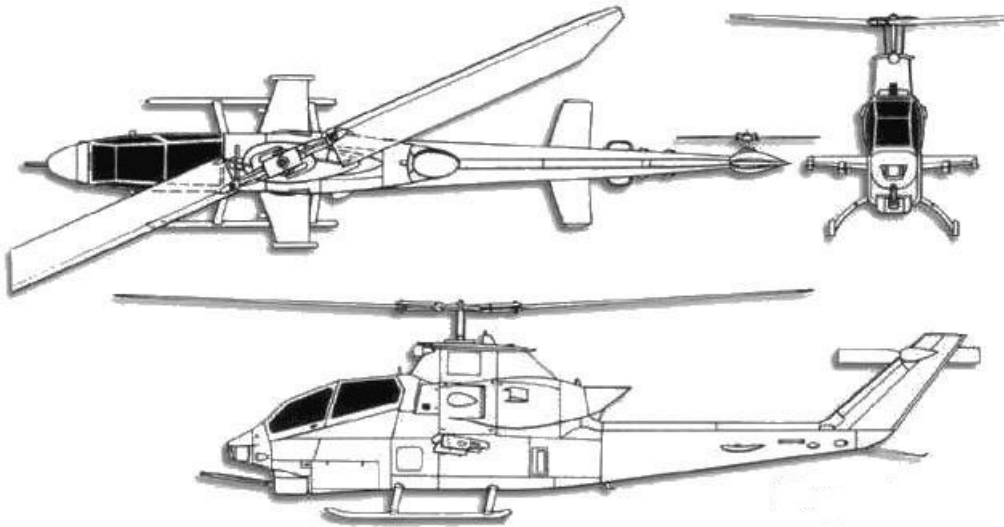


Figura 1.15: Bell AH-1 Cobra

Una vez conocidas la fuerza vertical que el sistema debe soportar, es preciso comentar la aproximación que se ha hecho. Teniendo en cuenta, que lo más común en el aterrizaje de un helicóptero corresponde a que la mayor parte de la fuerza que ejerce el suelo sobre el sistema se encuentre en el parte del tubo longitudinal (Superficie azul Figura 1.16), se ha considerado que actúa sobre esta la fuerza obtenida del test de caída límite. Para las otras superficies solamente se ha considerado que un 20 % de la fuerza vertical total se encuentre actuando perpendicular a la superficie roja (Figura 1.16) y que solo un 10 % se encuentre actuando sobre la superficie amarilla (Figura 1.16)

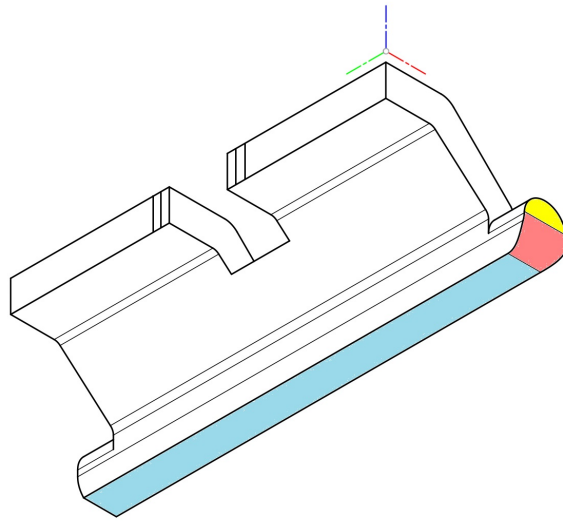


Figura 1.16: Superficies Condiciones Neumann

Una vez conocidas las fuerzas debemos calcular las presiones que afectarán a las superficies sobre las que van a ser aplicadas. Principalmente por el hecho de que las fuerzas se encuentran distribuidas a lo largo de toda la superficie de apoyo del patín. Las tensiones finales se encuentran recogidas en el Tabla 1.5 junto con las superficies que han sido aplicadas.

| Superficies y presiones | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Fuerza superficie Azul | $8450 \cdot 10^3 \text{ N}$ |
| Fuerza superficie Amarilla | $8450 \cdot 10^2 \text{ N}$ |
| Fuerza superficie Roja | $1690 \cdot 10^3 \text{ N}$ |
| Superficie Azul | $1,245 \text{ m}^2$ |
| Superficie Amarilla | $0,094 \text{ m}^2$ |
| Superficie Roja | $0,333 \text{ m}^2$ |
| Presión superficie Azul | $6,787 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ |
| Presión superficie Amarilla | $8,8984 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ |
| Presión superficie Roja | $5,0751 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ |

Tabla 1.5: Presiones utilizadas optimización

1.4.6. Malla

Fijadas las condiciones de contorno, las cargas y los materiales, para la optimización es preciso definir cuales van a ser los parámetros de la malla.

En primer lugar se fija un nivel de malla inicial de 6 (Figura 1.17), pues queremos trabajar con unos elementos iniciales que ya sean bastante pequeños como para adaptarse de manera adecuada al espacio de trabajo. El nivel de máximo refinamiento se ha fijado en 7, limitado en 15, por lo que el último nivel de malla será bastante pequeño como para disponer de una geometría perfectamente definida en su frontera.

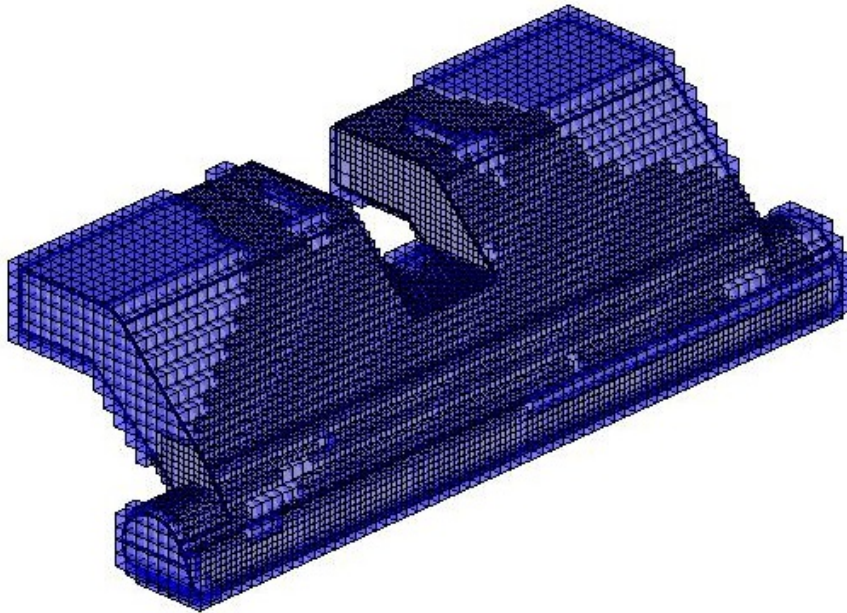


Figura 1.17: Mallado

1.4.7. Elasticidad

En primer lugar y antes de iniciar la optimización, es preciso fijarse en los desplazamientos y tensiones que la geometría esta soportando bajo las cargas que se le han sido asignadas. Utilizando la fuerza vertical máxima obtenida del test de caída límite del artículo [37] se obtienen unos desplazamientos máximos de $5 \cdot 10^{-4}m$ en la zona del tubo más cercana a donde se encontraría el suelo. Respecto a las tensiones máximas de Von Mises, se alcanzan unos valores de $11 \cdot 10^6 Pa$, por debajo del límite de fluencia, no obstante con la restricción de tensiones la geometría final obtenida tras el proceso de optimización presentará unos valores muy parejos a este (S_y).

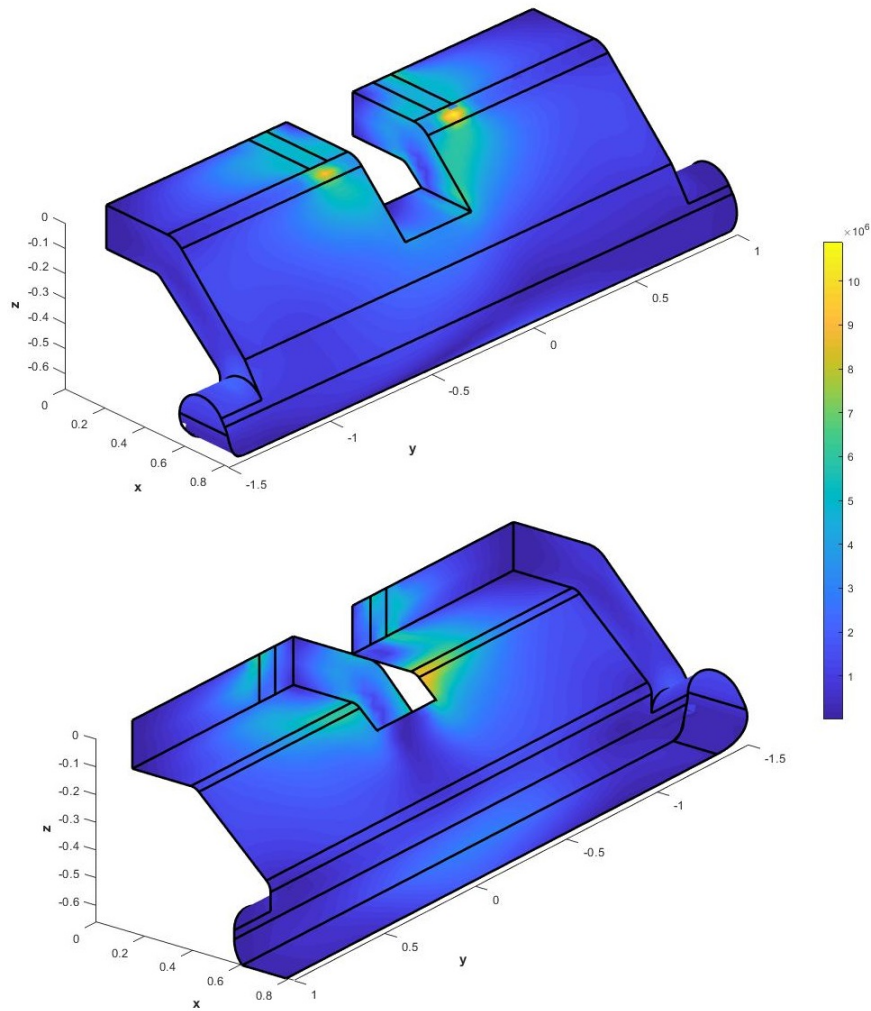


Figura 1.18: Tensión Von Mises (Pa)

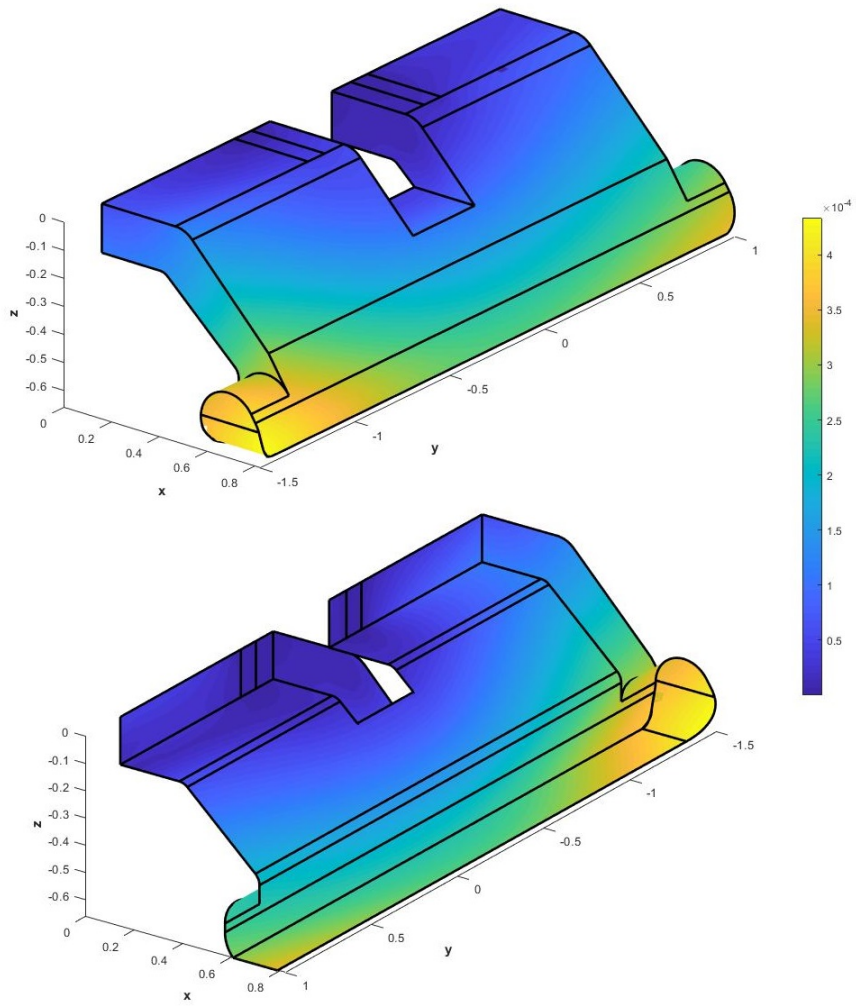


Figura 1.19: Desplazamientos (m)

1.4.8. Optimización

Minimum Compliance - Algoritmo de SIMP El primer tipo de optimización realizada corresponde a la ejecución del Algoritmo 1 (**1.1.2 Aproximación de SIMP**). Respecto al tipo de refinamiento utilizado, se ha combinado el uso de vóxeles, refinamiento por densidades y refinamiento basado en estimadores de error.

El uso de vóxeles permite una división del dominio de cada elemento en subdominios de integración, de manera que en cada subdominio de cada elemento puede representarse una densidad. Por tanto el coste computacional está asociado al número de elementos, pero la geometría se representa con mayor resolución, la del tamaño de los subdominios de integración en cada elemento.

El refinamiento de densidades se ha activado (consultar línea **16** del *Anexo 2: Manual del usuario*). El refinamiento por error de discretización permite reducir el error de discretización en la norma energética reduciendo el tamaño de los elementos en las zonas donde el error es mayor mejorando así la precisión del análisis, lo que conduce a mejorar también la posición en que ha de situarse la frontera. Para ello, en nuestro caso se ha fijado el error objetivo en un 15 %, con una reducción del error a cada iteración del 5 %. No obstante, debido a que el software utilizado todavía se encuentra en desarrollo, solamente es posible llegar a niveles de refinamiento intermedios. Esto ha echo que solamente se haya conseguido alcanzar un error relativo del 19,30 %, combinando refinamiento por densidades y por nivel de error de discretización, tal y como fue expuesto en el apartado **1.1.4 Estrategias de mejora de la optimización topológica**. Si solamente se considera el refinamiento por error de discretización, únicamente se ha conseguido alcanzar un error de un 24,91 %. Aún cuando no se ha podido llegar al nivel de refinamiento prescrito por el estado de desarrollo en que se encuentra el software, se ha observado que el refinamiento se realiza adecuadamente. Por tanto, el problema encontrado dejará de ser una limitación en cuanto el software sea capaz de trabajar con mallas más refinadas. En la actualidad se está trabajando ya para solucionar este problema.

Otro aspecto relevante constituye la fracción de volumen de cada elemento, partiendo de una fracción de volumen de 0,6, y un tamaño del filtro, de 1,5 veces el lado del elemento de la malla inicial, en nuestro caso de 0,039844. El filtro corresponde al radio de influencia en el alisado por densidades. Cuanto mayor sea el tamaño del filtro, mayor cantidad de elementos cogerá el algoritmo para alisar las sensibilidades de un elemento en concreto. No obstante debe existir cierto equilibrio y no fijar un tamaño del filtro desmedido, lo que provocaría que el resultado tardará en converger en una duración con la que no sería eficiente trabajar.

Una vez terminado el proceso, el resultado que nos propone la optimización topológica es el de la Figura 1.20, que constituye el más idóneo para las cargas y restricciones que le han sido impuestas. No obstante, es preciso volver al cálculo de tensiones para ver que valores de tensión ha alcanzado el algoritmo y compararlas con el límite de fluencia.

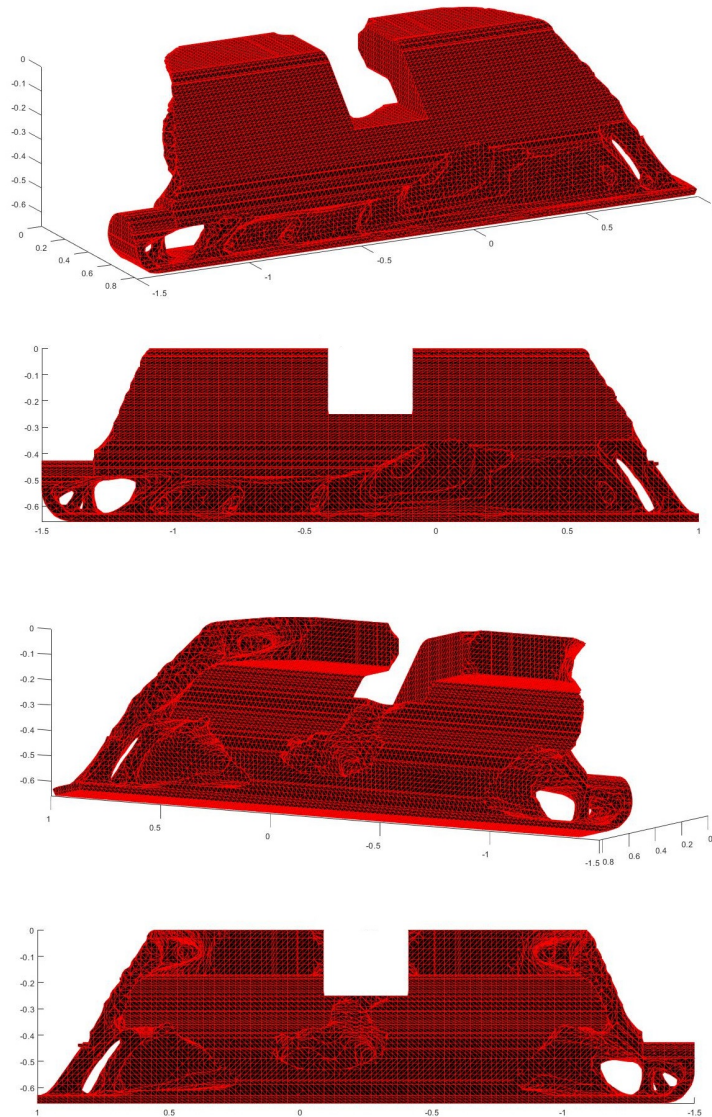


Figura 1.20: Geometría Algoritmo SIMP

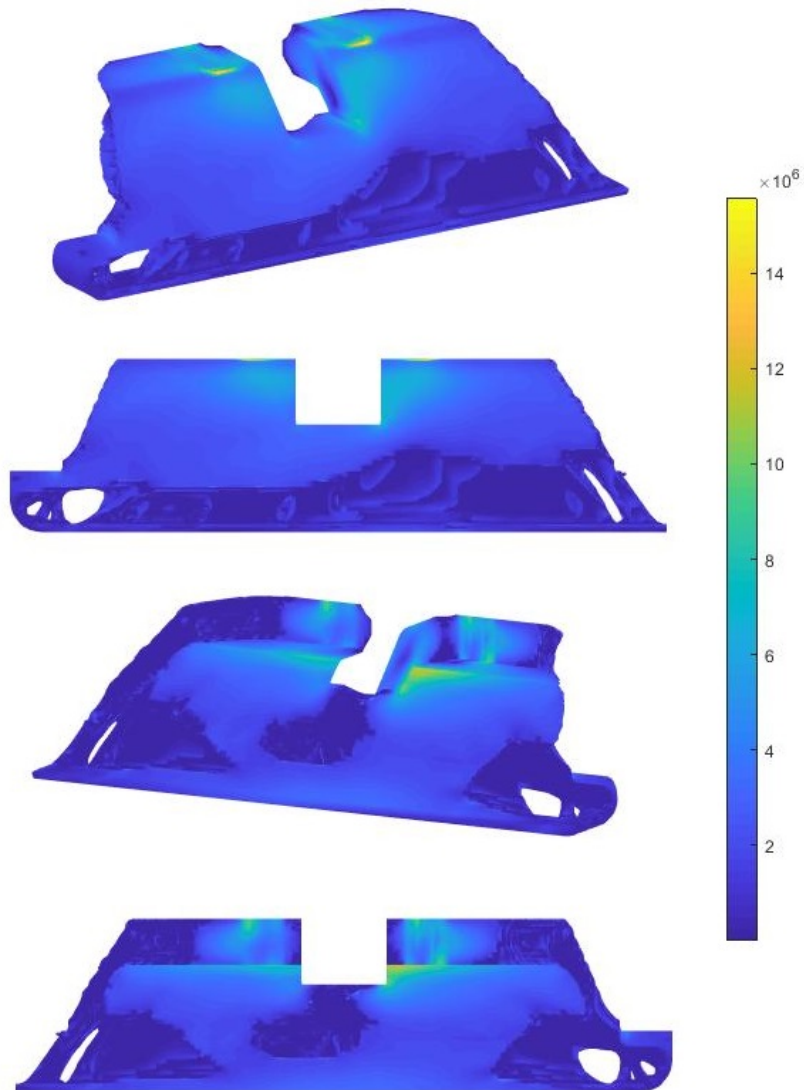


Figura 1.21: Tensiones Geometría Algoritmo SIMP

Se observa como los valores de tensiones alcanzadas (Figura 1.21) presentan aún cierto margen hasta alcanzar el límite de fluencia del material, por lo que al ejecutar el Algoritmo 2 (**1.1.3 Restricción por tensión**) la fracción de volumen a la cuál convergerá será bastante lejana a la fijada en este apartado.

Max Stress - Algoritmo Minimización de volumen con restricción de tensión El segundo tipo de optimización realizada corresponde a la ejecución del Algoritmo 2 (*1.1.3 Restricción por tensión*). Respecto al tipo de refinamiento utilizado, se ha combinado en este caso el uso de vóxeles y refinamiento por densidades.

En este caso la fracción de volumen de cada elemento, parte de un volumen de una fracción de volumen inicial de 0,6, valor que irá modificándose hasta que las tensiones máximas de la geometría se aproximen al límite de fluencia del material. Observamos en la Tabla 1.6 como el valor de la tensión máxima va variando con la fracción de volumen hasta converger al límite de fluencia. Por otra parte, el tamaño del filtro es igual que en el caso anterior.

| Fracción de volumen | Tensión máxima alcanzada (Pa) |
|---------------------|-------------------------------|
| 0,60 | $1,1168 \cdot 10^7$ |
| 0,4787 | $1,1538 \cdot 10^7$ |
| 0,2921 | $1,499 \cdot 10^7$ |
| 0,2413 | $1,7718 \cdot 10^7$ |
| 0,2257 | $1,891 \cdot 10^7$ |
| 0,2143 | $1,9778 \cdot 10^7$ |
| 0,2114 | $2,001 \cdot 10^7$ |

Tabla 1.6: Valores máximos de tensión para cada iteración de la fracción de volumen

Una vez terminado el proceso iterativo, el resultado que nos propone la optimización topológica es el de la Figura 1.22. No obstante, es preciso observar las tensiones alcanzadas para verificar que el algoritmo esta funcionando correctamente y que se verifica el valor de tensión máxima de la tabla 1.6 (Figura 1.23).

Se podría comentar de la solución que aparecen algunas ramificaciones que no se encuentran conectadas del todo, producto del tipo de representación gráfica utilizado y de haber usado un nivel máximo de refinamiento de la malla de 7, con valores superiores esas ramificaciones llegan a juntarse por completo.

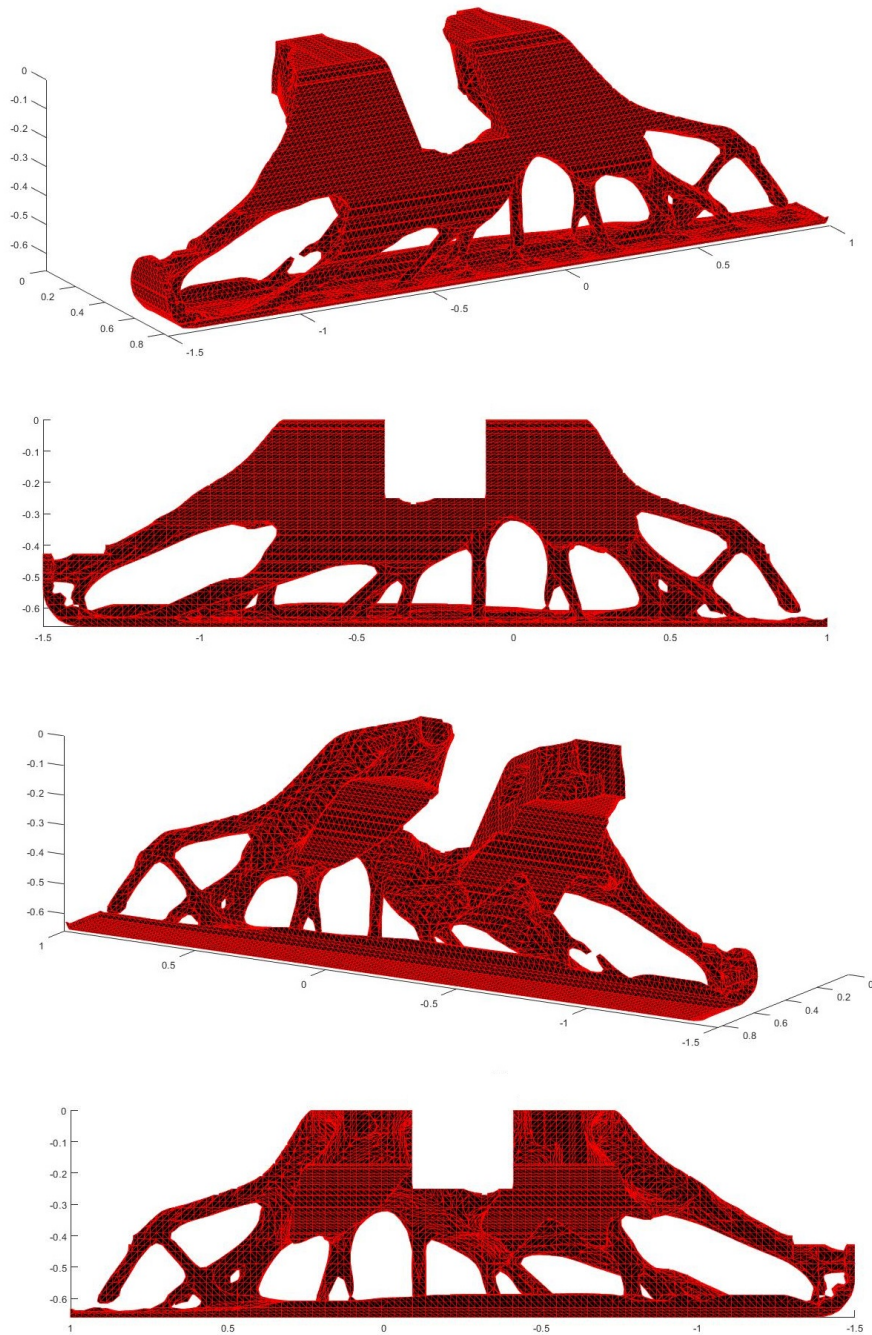


Figura 1.22: Geometría Final

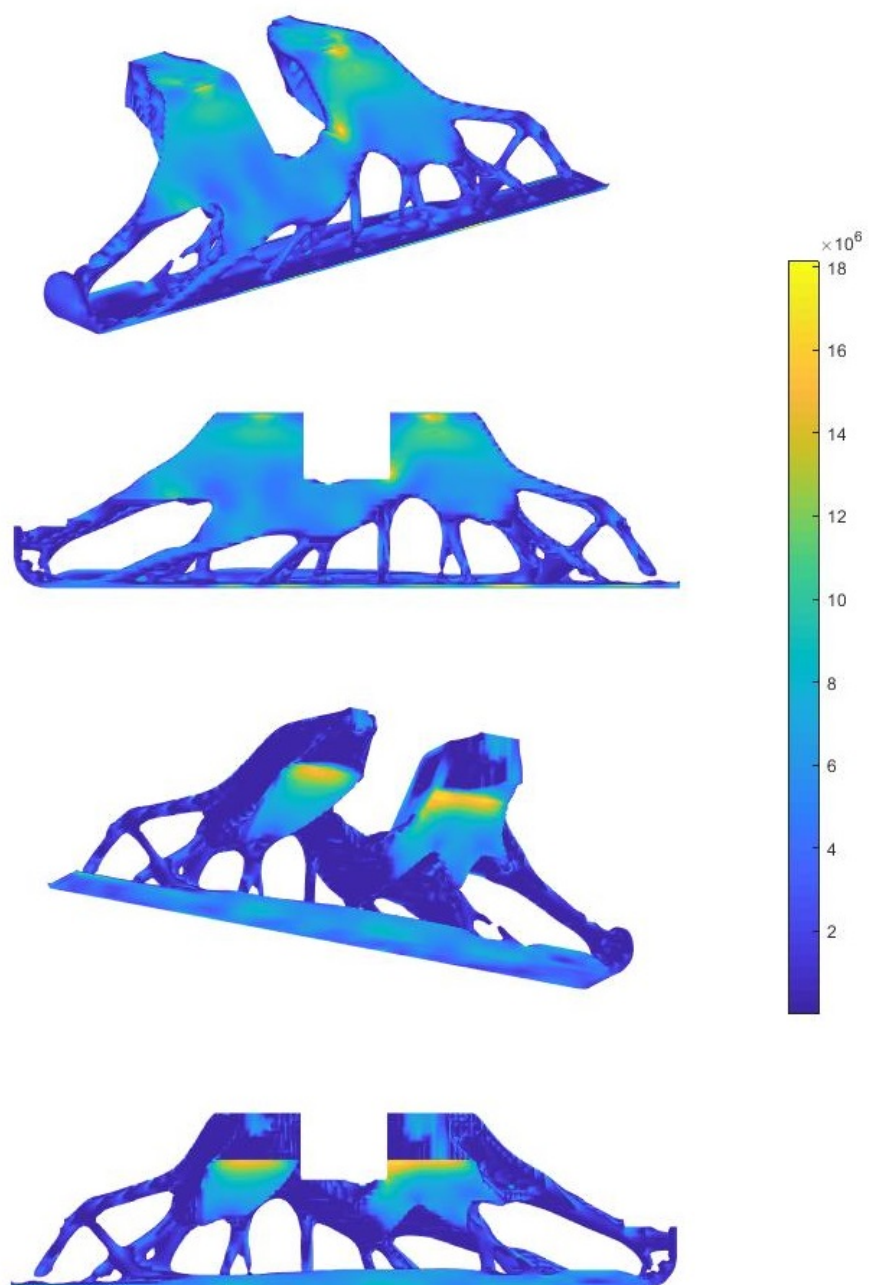


Figura 1.23: Tensiones Geometría Final

1.5. Estudio de necesidades: Limitaciones y condicionantes

A lo largo del desarrollo del proyecto uno de los principales inconvenientes ha sido la aparición de elementos anómalos (*Felon*). En la creación de la malla, dentro de MatLab, aparecen diferentes tipos de elementos:

- **Elementos Anómalos**, constituyen aquellos que todos sus nodos se encuentran fuera de la geometría creada.
- **Elementos Internos**, todos sus nodos están dentro de la geometría.
- **Elementos Intersectados**, tienen algunos nodos dentro de la geometría y otros fuera.

El hecho de que una geometría presente elementos de este tipo, impide una correcta evaluación de las intersecciones y por lo tanto impide trabajar con esta. Es impredecible la generación de este tipo de elementos por lo que hasta que no es cargada la geometría en MatLab, es imposible ser consciente de su existencia. Lo que implica trabajar de manera iterativa con la geometría hasta obtener una que no presente este tipo de elementos.

Otro limitante a la hora de realizar el proyecto constituye la falta de potencia del ordenador utilizado, lo que viene traducido a simulaciones de larga duración que han ralentizado el proceso e impedido simulaciones con niveles máximos de malla superiores.

1.6. Conclusiones

El objetivo de este TFG era el de estudiar la viabilidad del uso de técnicas de optimización topológica, que se están desarrollando en el Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la UPV, en el diseño estructural de componentes aeronáuticos. El software utilizado está en proceso de desarrollo y, por tanto, no es totalmente funcional. En cualquier caso, pese a las limitaciones del mismo, se ha comprobado que resulta viable utilizar las técnicas de optimización topológica que se están desarrollando en el DIMM en el diseño de componentes estructurales del ámbito de la aeronáutica. El hecho de haber considerado geometrías complejas ha permitido también avanzar en el proceso de depuración del programa.

El proceso previo a los análisis ha recogido la selección de la geometría, material y las condiciones de contorno del problema a tratar, donde se ha cumplido con varios de los objetivos indirectos en cuanto al aprendizaje de programas de diseño. Por otra parte, la selección de material y las condiciones de contorno han permitido simular sobre el espacio de trabajo una situación lo más real posible basándose en la normativa existente al respecto.

En cuanto al análisis, se han podido verificar de manera efectiva, para el algoritmo de SIMP, tanto la técnica de integración basada en vóxeles como las técnicas de refinamiento de la malla basadas en niveles de gris y en nivel de error de discretización. Sin embargo, para el algoritmo de restricción de tensión la incorporación del refinamiento basado en estimadores de error no ha permitido obtener una solución adecuada, debido a la situación de desarrollo en la que el programa se encuentra. No obstante, con los análisis realizados se ha depurado el programa al mismo tiempo que se han ampliado sus capacidades motivando el desarrollo de proyectos futuros.

Respecto a los resultados, a pesar de trabajar con un software en desarrollo, se ha conseguido obtener una geometría bastante próxima a la posible fabricación de esta, capaz de cumplir la función principal que se requiere de un sistema como este.

Adicionalmente es necesario resaltar que, la realización de este trabajo fin de grado, ha permitido adquirir conocimientos sobre técnicas de optimización, de especial relevancia en los sectores aeronáutico y aeroespacial, en particular en las técnicas de optimización topológica. Este aspecto es muy relevante dado que, gracias a los desarrollos de los últimos años en las técnicas de fabricación aditiva (impresión 3D), que resultan muy adecuadas para fabricar las estructuras que se obtienen mediante optimización topológica, este tipo de optimización está siendo objeto de continuos avances que hacen que su uso en aplicaciones industriales se extienda día a día.

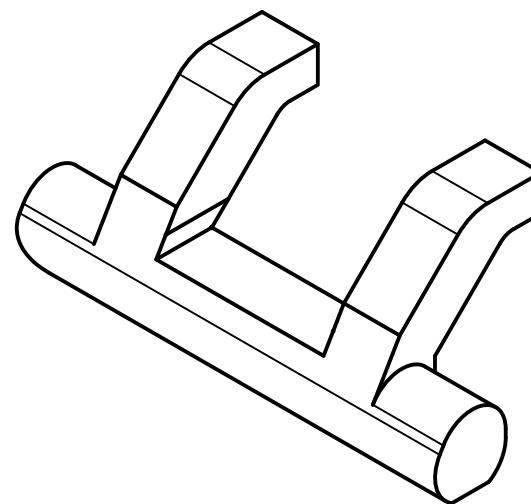
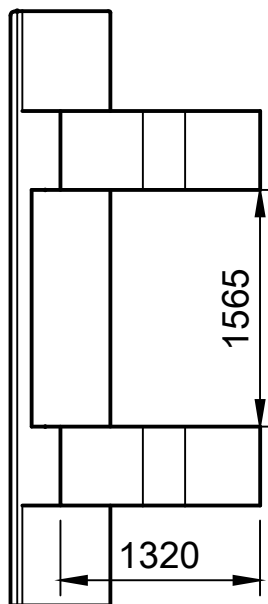
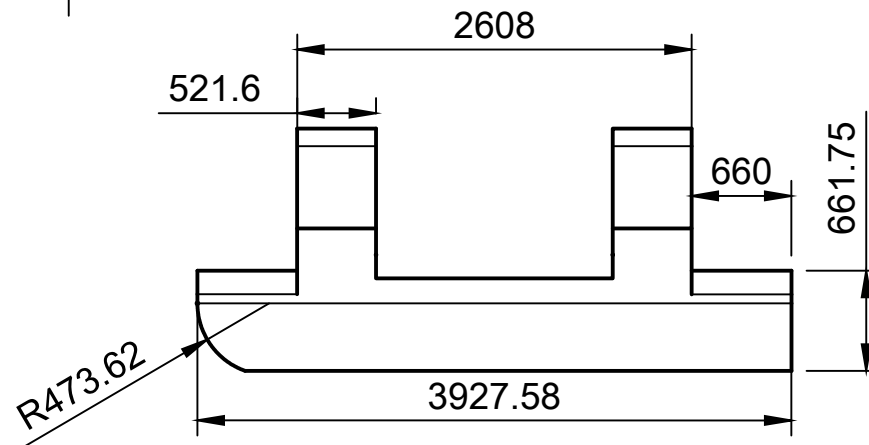
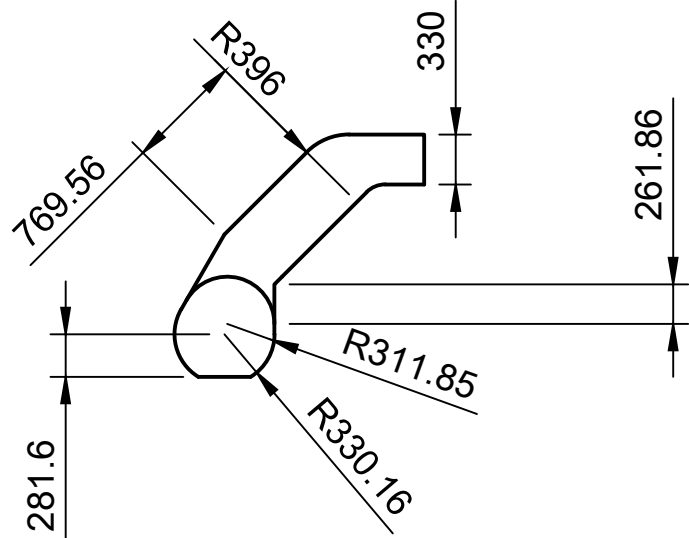
1.7. Futuro

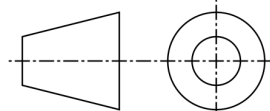
La experiencia adquirida a través de la gran multitud de análisis realizados permite plantear los siguientes trabajos futuros, que, en muchos casos, dado el estado de desarrollo del software utilizado, no han podido ser abordados en el desarrollo de este TFG:

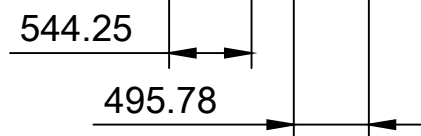
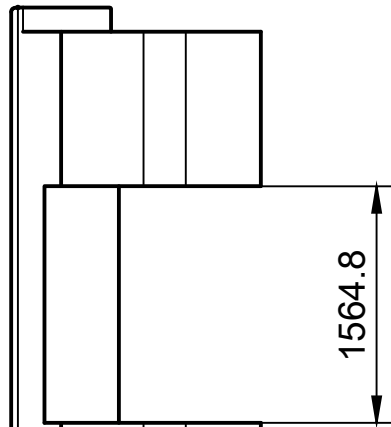
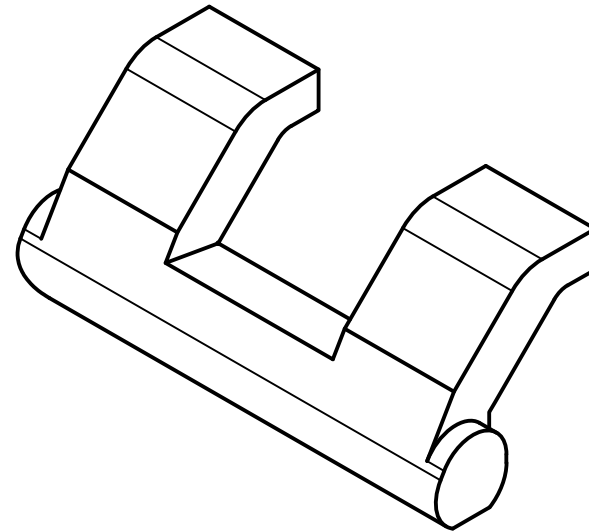
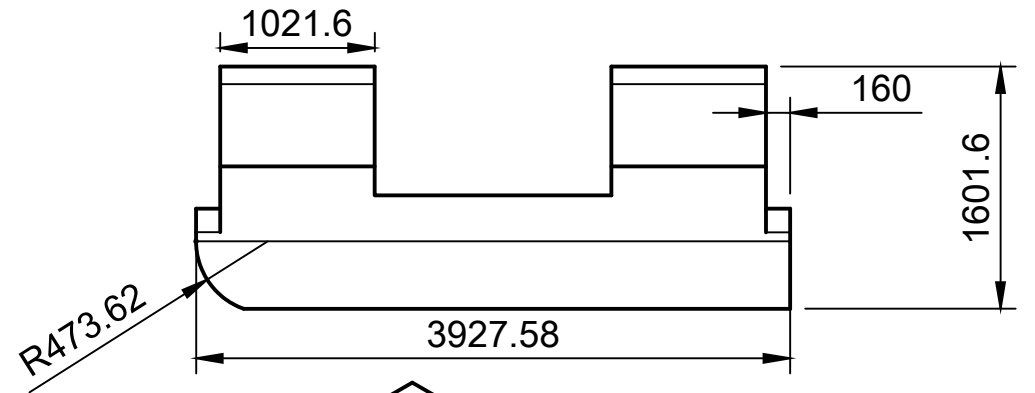
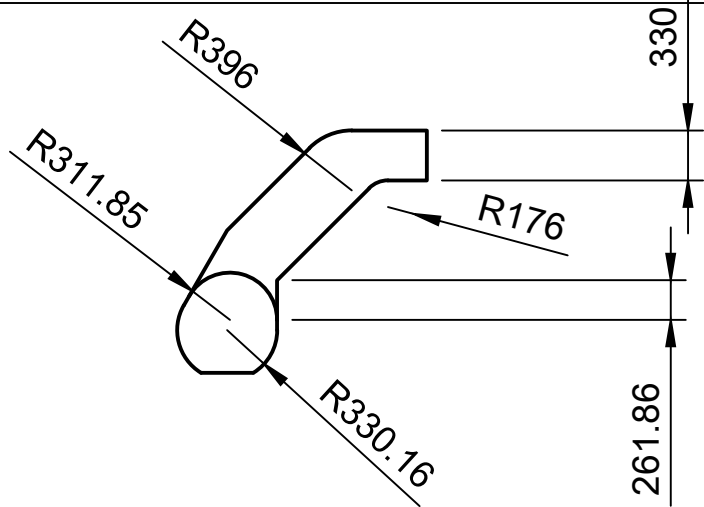
- El uso del refinamiento basado en estimadores de error no ha permitido alcanzar el error objetivo del 15 %, alcanzando únicamente un 19,30 %. Como trabajo futuro se propone el uso de un nivel máximo de refinamiento superior a 7 para poder así reducir el error relativo, ya que no ha sido posible realizarse por la duración de las simulaciones que trabajar con niveles superiores requiere. Mallas más finas implican una geometría mejor definida y con resultados más precisos.
- La combinación de ambos tipos de refinamiento (densidades y estimadores de error) en el algoritmo de restricción por tensión no ha proporcionado buenos resultados, dado que el software no es totalmente funcional, hay geometrías que no es, todavía, capaz de tratar. Como trabajo futuro se propone la mejora del software, para poder llegar a obtener una solución combinando ambos refinamientos dentro del algoritmo de restricción por tensión.
- Se propone el desarrollo de un nuevo algoritmo basado en desplazamientos, en lugar de tensiones, para poder observar que solución propone el programa ante un criterio diferente y al mismo tiempo válido.
- Igualmente se propone desarrollar un algoritmo que permita realizar la optimización topológica considerando varias condiciones de carga, en vez de el caso estudiado, donde se han tenido en cuenta varias cargas, pero aplicadas simultáneamente, lo que constituye un único caso de carga.

Capítulo 2

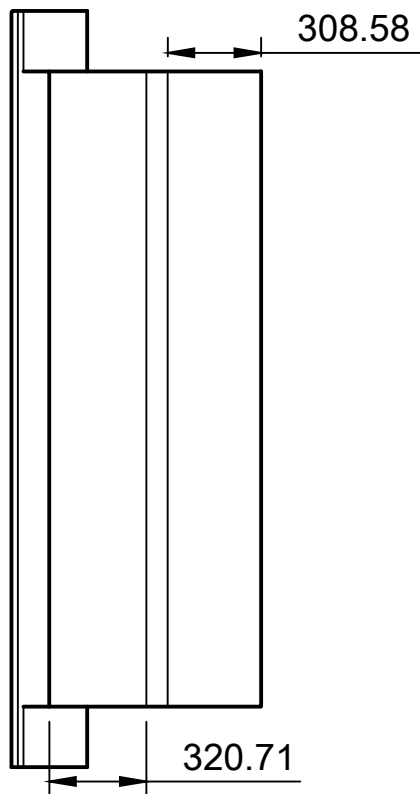
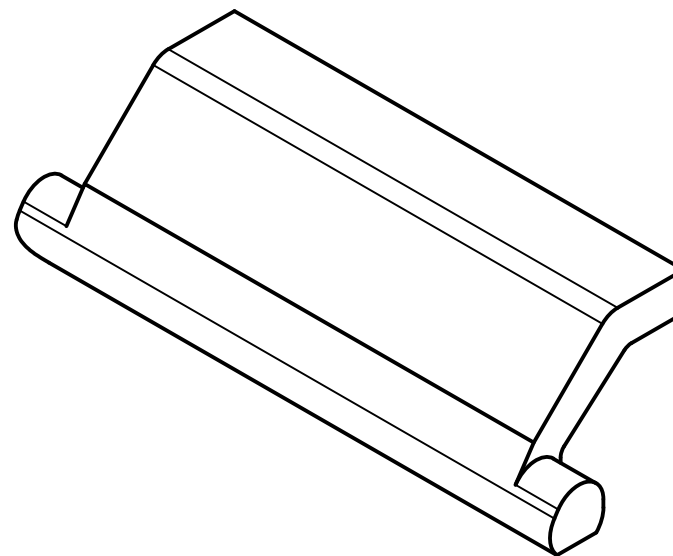
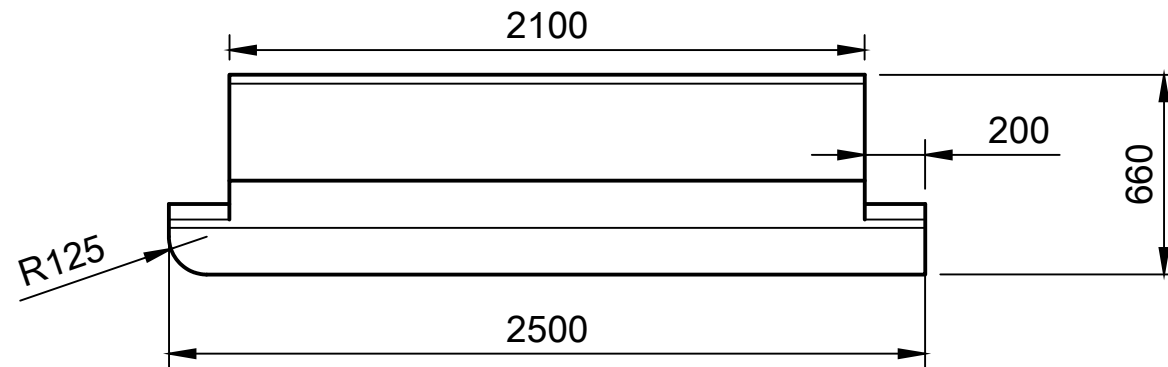
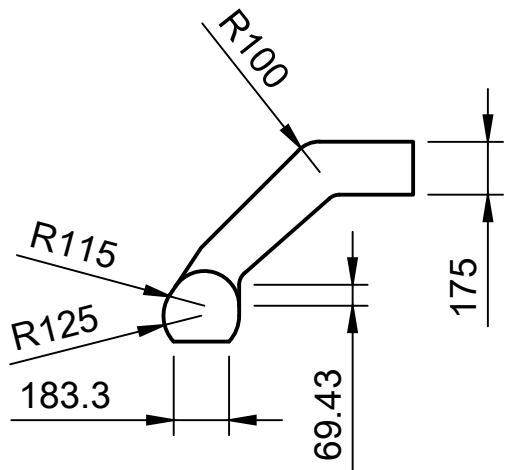
Planos

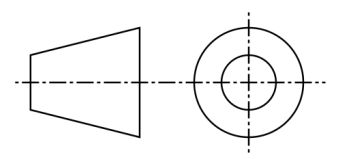


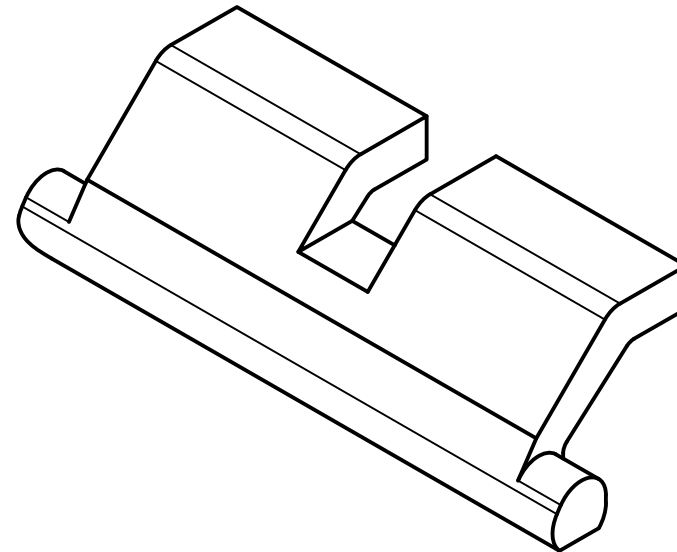
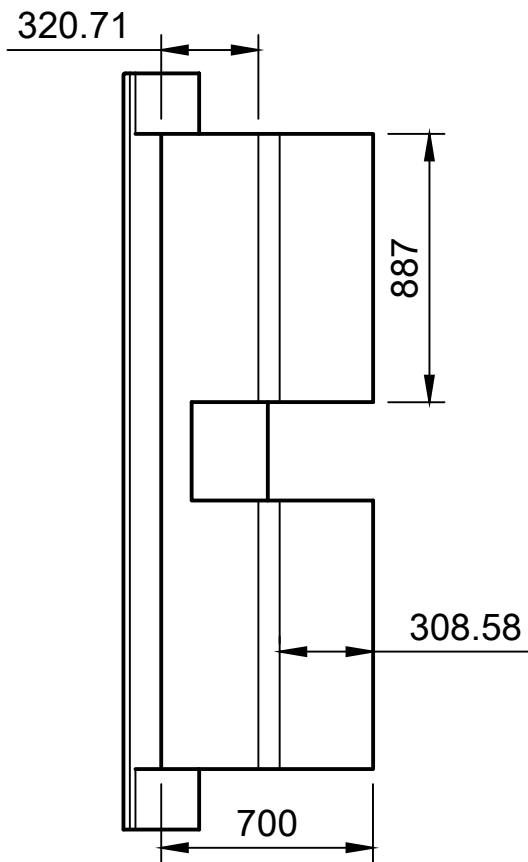
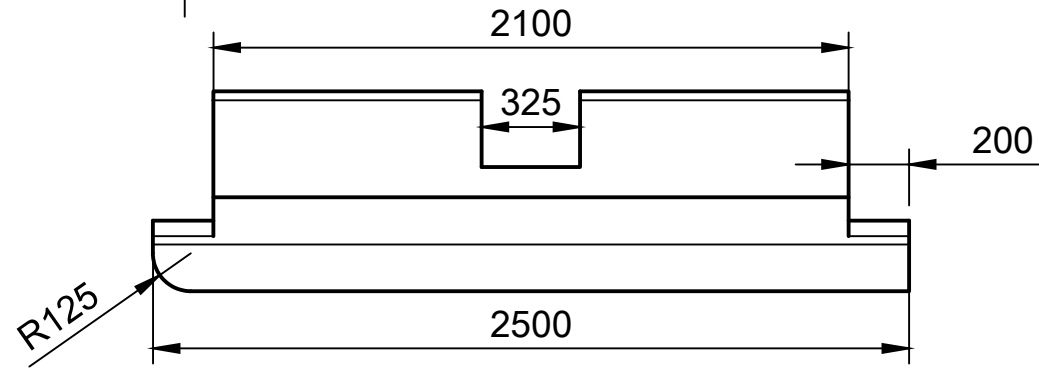
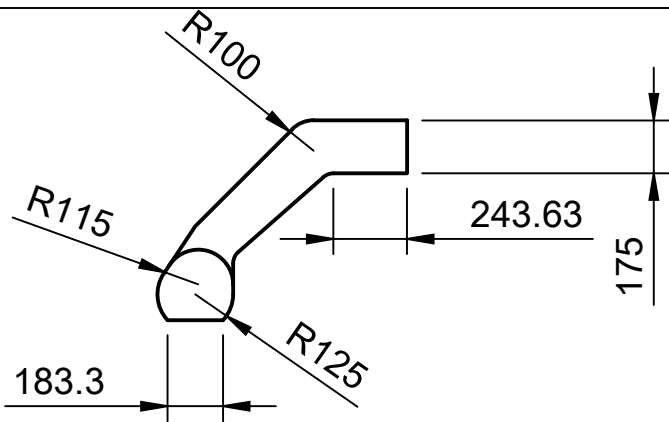
| | Fecha | Nombre | Firmas |  |
|------------|------------|-------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Dibujado | 11/02/2020 | Prototipo 1 | | |
| Comprobado | | | | |
| Ids Normas | UNE | | | |
| Escala | 1 : 50 | | 11/02 – PROT1236 | Número Plano Prototipo N°1 |
| | | | | Sustituye a |
| | | | | Sustituido por |



| | Fecha | Nombre | Firmas | |
|------------|------------------|-------------|----------------|---------------------|
| Dibujado | 06/03/2020 | Prototipo 2 | | |
| Comprobado | | | | |
| Ids Normas | UNE | | | |
| Escala | 06/03 – PROT1237 | | Número | Plano Prototipo N°2 |
| 1 : 50 | | | Sustituye a | |
| | | | Sustituido por | |



| | Fecha | Nombre | Firmas |  | |
|------------|------------------|-------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Dibujado | 20/03/2020 | Prototipo 3 | | | |
| Comprobado | | | | | |
| Ids Normas | UNE | | | | |
| Escala | 20/03 – PROT1237 | | | Número | |
| 1 : 20 | | | | Plano Prototipo N°3 | |
| | | | | Sustituye a | |
| | | | | Sustituido por | |



| | Fecha | Nombre | Firmas | |
|------------|------------------|-------------|--------|---------------------|
| Dibujado | 22/04/2020 | Prototipo 4 | | |
| Comprobado | | | | |
| Ids Normas | UNE | | | |
| Escala | 22/04 – PROT1238 | | | Número |
| 1 : 20 | | | | Plano Prototipo N°4 |
| | | | | Sustituye a |
| | | | | Sustituido por |

Capítulo 3

Pliego de condiciones

3.1. Objeto

El presente documento recoge las exigencias de tipo técnico y legal que regirán durante la ejecución del proyecto, fijando los criterios de la relación que se establece entre los agentes que intervienen en las obras definidas en el presente proyecto y servir de base para la realización del contrato de obra entre el Promotor y Contratista.

Se trata de un documento vinculante, una vez aceptado se obliga a las partes a su cumplimiento, y sobre él han de decidirse los procedimientos tanto de ejecución como de rescisión de contrato.

Se describirán las condiciones generales del trabajo y se establecerá con el usuario final de la aplicación las condiciones que tendrán éste sobre la distribución y utilización de la misma. En este apartado del proyecto, se señalan los derechos, obligaciones y responsabilidades de cada una de las partes involucradas.

3.2. Condiciones de los materiales

3.2.1. Descripción

Debido al carácter informático de este proyecto, se derivan una serie de condiciones y requisitos que limitan la utilización del mismo. El no cumplimiento de los requisitos no implica el mal funcionamiento de la aplicación, pero sí una posible causa de éste.

3.2.2. Control de calidad

Equipo El hardware con el que se ha desarrollado el proyecto, y, por tanto, configuración recomendada, es la siguiente:

- Procesador Intel Core i5-6200 a 2.30 GHz.
- 12 GB de memoria RAM.
- Tarjeta gráfica NVIDIA GeForce GTX 780.
- Unidad de disco rígido (HDD) genérica.
- Monitor genérico.
- Teclado genérico.
- Ratón genérico.

Cualquier configuración de equipo que tenga características similares o que mejore alguno de sus aspectos también sería válido. No obstante, según el Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización, son precisas las siguientes consideraciones.

Pantalla

- Los caracteres de la pantalla deberán estar bien definidos y configurados de forma clara, y tener una dimensión suficiente, disponiendo de un espacio adecuado entre los caracteres y los renglones.
- La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos, centelleos u otras formas de inestabilidad.
- El usuario de terminales con pantalla deberá poder ajustar fácilmente la luminosidad y el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla, y adaptarlos fácilmente a las condiciones del entorno.
- La pantalla deberá ser orientable e inclinable a voluntad, con facilidad para adaptarse a las necesidades del usuario.
- Podrá utilizarse un pedestal independiente o una mesa regulable para la pantalla.
- La pantalla no deberá tener reflejos ni reverberaciones que puedan molestar al usuario.

Teclado

- El teclado deberá ser inclinable e independiente de la pantalla para permitir que el trabajador adopte una postura cómoda que no provoque cansancio en los brazos o las manos.
- Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos y las manos.
- La superficie del teclado deberá ser mate para evitar los reflejos.
- La disposición del teclado y las características de las teclas deberán tender a facilitar su utilización.
- Los símbolos de las teclas deberán resaltar suficientemente y ser legibles desde la posición normal de trabajo.

Mesa o superficie de trabajo

- La mesa o superficie de trabajo deberán ser poco reflectantes, tener dimensiones suficientes y permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio.
- El soporte de los documentos deberá ser estable y regulable y estará colocado de tal modo que se reduzcan al mínimo los movimientos incómodos de la cabeza y los ojos.
- El espacio deberá ser suficiente para permitir a los trabajadores una posición cómoda.

Asiento de trabajo

- El asiento de trabajo deberá ser estable, proporcionando al usuario libertad de movimiento y procurándole una postura confortable.
- La altura del mismo deberá ser regulable.
- El respaldo deberá ser reclinable y su altura ajustable.
- Se pondrá un reposapiés a disposición de quienes lo deseen.

Programas utilizados Existen algunos requisitos en cuanto a software que debe presentar el equipo en el que se vaya a ejecutar la aplicación, estos serán:

| Programa | Versión | Función |
|---------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Microsoft Windows | 10 | Sistema operativo |
| TeXstudio | 2.12.18 | Principalmente se ha utilizado como procesador de texto para redactar el presente trabajo. |
| MathWorks MatLab | R2018b | Ha sido el encargado de realizar todo el cálculo numérico y gráfico. |
| GiD | 10.0.5 | Ha sido el encargado de retocar las geometrías generadas por Fusion 360. |
| Autodesk Fusion 360 | 2.0.8412 | Ha sido el encargado de generar las geometrías en base a patines ya existentes. |

Tabla 3.1: Programas utilizados

3.3. Condiciones de la ejecución

La ejecución de la aplicación debe hacerse tal y como se especifica a lo largo de la memoria y en el Manual de Usuario (ver Anexo 1) que se adjunta en la documentación técnica, sin hacerse responsable el ingeniero firmante de la pérdida o daños en el hardware o software del ordenador donde se instale y ejecute el programa, provocados por el uso incorrecto de la aplicación, tanto en la instalación como en su posterior utilización.

3.4. Condiciones Legales

El trabajo debe cumplir con la ley de Ley de Propiedad Intelectual (LPI) (véase Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia. BOE, núm. 97, de 22 de abril de 1996) y todas sus posteriores modificaciones.

El contenido del trabajo, por tanto, deberá de ser original, de uso público y libre de derechos o incluso contenido con derechos de autor, excepcionalmente, siempre y cuando sea para fines educativos o de investigación científica, según cita la propia LPI en el Artículo 32.

Se reconoce públicamente las marcas registradas que aparecen en el desarrollo del proyecto, así como los derechos de autor de la bibliografía consultada para la realización del mismo.

No está permitida la reproducción total o parcial de este proyecto, ya sea el programa o la documentación técnica aportada, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio sin el permiso previo y por escrito del firmante del proyecto y sus directores.

3.5. Condiciones Administrativas

El promotor del proyecto es el Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Universidad Politécnica de Valencia con el profesor y tutor D. Juan José Ródenas García como representante del mismo junto con David Muñoz Pellicer como cotutor, ambos adscritos a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño de la misma universidad. El proyectista es el alumno de Grado en Ingeniería Aeroespacial Miguel Segarra López, el cual está sometido a las siguientes obligaciones:

- Cumplir con la legislación vigente.
- Llevar a cabo el proyecto siguiendo las directrices del promotor.
- Cumplir con la normativa sobre la realización de trabajos de fin de grado vigente en la Universidad Politécnica de Valencia, la Escuela

Técnica Superior de Ingeniería del Diseño y el Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.

- Respetar las leyes sobre derechos de autor.
- Consultar con el promotor cualquier modificación de las especificaciones iniciales, así como proponer soluciones alternativas a los problemas que puedan surgir.
- Informar periódicamente al promotor del estado de desarrollo del proyecto.

El proyectista estará amparado por una serie de derechos:

- Disponer de un equipo informático adecuado para la realización del proyecto.
- Ser informado por el promotor sobre los derechos legales acerca del proyecto.
- Recibir soporte técnico para cualquier problema imprevisto que pueda surgir.
- En caso de ausencia del promotor del proyecto, el proyectista tendrá plena potestad en la toma de decisiones relativas a la ejecución del proyecto, las cuales deberán ser asumidas por el promotor.

Capítulo 4

Presupuesto

4.1. Introducción

El presente documento pretende reflejar una estimación de los costes de ejecución del trabajo de final de grado. El presupuesto se realizará siguiendo el método de costes según naturaleza, adaptado para un proyecto de investigación de carácter informático como es este.

4.2. Equipos y licencias

El plazo de amortización mínimo para equipos electrónicos es de 5 años (coeficiente de amortización lineal del 20 %), según la agencia tributaria. Así mismo, para sistemas y programas informáticos es de 3 años (coeficiente de amortización lineal del 33 %). No obstante, en caso de que el valor de un bien no exceda los 601,01€ se podrá amortizar libremente, siempre y cuando no se amorticen de esta manera bienes por un valor superior, en total, a 3.005,6 €.

A continuación se procederá a calcular una estimación de las horas al año que el alumno podría utilizar esos recursos.

El ordenador portátil, de uso personal, se utilizará una media de 6 h/día, 7 días/semana, durante el curso académico:

$$6 \frac{h}{\text{día}} \times 7 \frac{\text{días}}{\text{semana}} \times 44 \frac{\text{semanas}}{\text{año}} = 1428 \frac{h}{\text{año}} \quad (4.1)$$

La licencia de Microsoft Office, de uso personal, se supondrá que se usa la mitad de las horas no presenciales del curso, según los créditos ECTS (European Credit Transfer System):

$$60 \frac{\text{créditos}}{\text{curso}} \times 15 \frac{h(\text{no pres.})}{\text{crédito}} \times 0,5 = 450 \frac{h}{\text{curso}} \quad (4.2)$$

La licencia de Matlab, se supondrá de uso exclusivo del TFG, durante el 80 % del tiempo definido del uso del ordenador.

$$1428 \frac{h}{año} \times 0,8 = 1142 \frac{h}{año} \quad (4.3)$$

La estación de cálculo, el GiD se supondrá que son de uso exclusivo para el TFG y compartido (GiD) con todos los alumnos que tengan acceso a los servidores del DIMM (19 alumnos).

Se estima que estos recursos se han utilizado durante el 70 % del tiempo dedicado al TFG

$$12 \text{ créditos} \times 25 \frac{h}{crédito} \times 0,7 = 210h \quad (4.4)$$

Se atribuirá a todos los alumnos con acceso a servidor las mismas horas de utilización de los recursos.

$$19 \text{ alumnos} \times 210 \frac{h}{alumno \text{ y año}} = 3990 \frac{h}{año} \quad (4.5)$$

Finalmente, la licencia de Autodesk Fusion 360 se supondrá de uso personal y no exclusivo del TFG, utilizándose aproximadamente 100 horas al año.

| Descripción | Precio Compra | Plazo amortización | Horas de uso al año | Amortización por hora |
|------------------------------|---------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| Portátil | 600 | 4 | 1428 | 0.11 |
| Estación DIMM | 5000 | 1 | 3600 | 1.38 |
| Licencia Microsoft Office | 70 | 1 | 450 | 0.15 |
| Licencia MatLab | 800 | 4 | 1142 | 0,18 |
| Licencia Gid | 560 | 1 | 3990 | 0,14 |
| Licencia Autodesk Fusion 360 | 2012 | 4 | 100 | 5,03 |

Tabla 4.1: Amortización equipos y licencias

4.3. Mano de obra directa

A continuación se procederá a calcular una estimación de las jornadas de trabajo anual para un trabajador estándar:

$$46 \frac{\text{semanas de trabajo}}{año} \times 40 \frac{\text{horas trabajo}}{\text{semana}} = 1840 \frac{\text{horas trabajo}}{año} \quad (4.6)$$

Cabe mencionar que el coste no se refiere al sueldo del empleado, sino a todos los costes que implica ese trabajador para la empresa (sueldo, seguros, seguridad social. . .).

4.4. Presupuesto de ejecución

| Descripción | Cantidad (h) | Precio (€/h) | Importe (€) |
|-------------------------------|--------------|--------------|----------------|
| Portátil | 300 | 0,11 | 33,00 |
| Estación DIMM | 180 | 1,38 | 248,40 |
| Licencia Microsoft Office | 260 | 0,15 | 39,00 |
| Licencia MatLab | 400 | 0,18 | 72,00 |
| Licencia Gid | 180 | 0,14 | 25,20 |
| Licencia Autodesk Fusion 2012 | 200 | 5,03 | 1006,00 |
| Ingeniero aeronáutico | 300 | 16,31 | 4893,00 |
| Doctorando | 160 | 24,48 | 3916,80 |
| Doctor | 80 | 35,33 | 2826,40 |
| Total | | | 13059,8 |

Tabla 4.2: Presupuesto de ejecución

Con todo ello, el presupuesto de ejecución del proyecto asciende a un total de **TRECE MIL CINCUENTA Y NUEVE EUROS CON OCHENTA CÉNTIMOS**.

4.5. Presupuesto Total

Bajo el supuesto de que este trabajo fuese un proyecto real, deberían tenerse en cuenta las cuantías referidas a los gastos generales y al beneficio industrial que se desee obtener. En este caso se supondrá que los gastos generales ya se han tenido en cuenta en los costes de los recursos. Además, se supondrá un beneficio industrial del 25 % sobre el presupuesto de ejecución.

| Concepto | Importe (€) |
|-----------------------------|-----------------|
| Presupuesto parcial | 13059,80 |
| Beneficio industrial (25 %) | 3264,95 |
| Subtotal | 16324,75 |
| I.V.A. (21 %) | 3428,20 |
| Total | 19752,75 |

Tabla 4.3: Presupuesto total

Por tanto, el presupuesto total del presente Trabajo de Fin de Grado asciende finalmente a **DIECINUEVE MIL SETECIENTOS CINCUENTA Y DOS EUROS CON SETENTA Y CINCO CÉNTIMOS**.

Bibliografía

- [1] P. HOLLINGER, (2016). “*Las aerolíneas innovan para superar el problema del peso*”. enero 27, 2020, de Expansion Sitio web: <https://www.expansion.com/empresas/transporte/2016/12/15/5851a558268e3ed86f8b4610.html>
- [2] M.P.Bendsoe, “Optimal shape design as a material distribution problem”, *Structural Optimization*, vol. 1, pp. 193-202, dec 1989.
- [3] E. Nadal, J.J. Rodenás, J. Albelda, M. Tur, J.E.Tarancón y F.J.Fuenmayor, “Efficient Finite Element Methodology basen on Cartesian grids: Application to structural shape optimization”, *Abstract and Applied Analysis*, vol 2013, pp1-19, apr 2013.
- [4] O.C.Zieenkiewicz y J.Z.Zhu, “Adaptivity and mesh generation”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* , vol. 32, pp. 783-810, sep 1991.
- [5] M.Zhou y G.I.Rozvany, “The COC algoritm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 89, pp. 309-336, aug 1991.
- [6] H.P. Mlejnek, “Some aspects if the genesis of structures”, *Structural Optimization*, vol. 5, pp. 64-69, mar 1992.
- [7] J.Parvizian, A.Düster, y E.Rank, “Finite cell method: hh- and p-extension for embedded domain problems in solid mechanics”, *Computational Mechanics*, vol.41, pp. 121-133, sep 2007.
- [8] A.Düster, J.Parvizian, Z.Yang, y E.Rank, “The finite cel methos for three-dimensional problems of solid mechanics”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 197, pp. 3768-3782, aug 2008.

- [9] J.Parvizian, A.Düster, y E.Rank, “Topology optimization using the finite cell method”, *Optimization and Engineering*, vol. 13, pp. 57-58, mar 2012.
- [10] E.Burman, S.Clus, P.Hansbo, M.G.Larson, y A.Massing, “CutFEM: Discretizing geometry and partial differential equations”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 104, pp. 472-501, nov 2015.
- [11] E.Nadal, “Cartesian grid FEM (cgFEM):High Performance h-adaptive FE analysis with efficient error control. Application to structural shape optimization”, p.312, 2014.
- [12] L.Giovanelli, *Direct creation of patient-specific Finite Element models from medical images and preoperative prosthetic implant simulation using h-adaptive Cartesian grids*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, Valencia, nov 2018.
- [13] D.Schillinger y M.Ruess, “The Finite Cell Method: A review in the Context of Higher-Order Structural Analysis of CAD and Image-Based Geometric Models”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 348, pp. 391-455, jul 2015.
- [14] E.Burman, “La pénalisation fantôme”, *Comptes Rendus Mathématique*, vol. 348, pp. 1217-1220, nov 2010.
- [15] M.Tur, J.Albelda, O.Marco, y J.J.Ródenas, “Stabilized method of imposing Dirichlet boundary conditions using a recovered stress field”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 296, pp. 352-375, nov 2015.
- [16] M.Dauge, A.Düster y E.Rank, “Theoretical and Numerical Investigation of the Finite Cell Method”, *Journal of Scientific Computing*, vol.65, pp. 1039-1064, mar 2015.
- [17] C.V.Verhoosel, G.J.van Zwieten, B. van Rietbergen y R. de Borst, “Image- based goal-oriented adaptive isogeometric analysis with application to the micro-mechanical modeling of trabecular bone”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 284,

pp. 138-164, feb 2015.

- [18] D.Elfverson, M.G.Larson y K.Larsson, “CutIGA with basis function removal”, *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, vol. 5, dec 2018.
- [19] E.Burman y P.Hansbo, “Fictitious domain finite element methods using cut elements: II, A stabilized Nitsche method”, *Applied Numerical Mathematics*, vol. 62, pp. 328-341, apr 2012.
- [20] R.Sevilla, S. Fernández-Méndez y A.Huerta, “NURBS-enhanced finite element methods (NEFEM)”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 98, pp. 399-417, may 2014.
- [21] J.Navarro-Jiménez, H.Navarro-García, M-Tur y J.J.Ródenas, “Superconvergent patch recovery with constraints for 3D contact problems within the Cartesian grid Finite Element Method”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, p. nme. 6266, nov 2019.
- [22] A.Ferrer, “SIMP-ALL: a generalized SIMP method based on the topological derivative concept”, *International Journal for Numerical Methods on Engineering*, p. nme. 6140, jul 2019.
- [23] O.Sigmund, “A 99 line topology optimization code written in matlab”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 21, pp. 120-127, apr 2001.
- [24] M.P.Bendsoe y O.Sigmund, “Material interpolation schemes in topology optimization”, *Archive of Applied Mechanics*, vol. 69, no. 9-10, pp. 635-654, 1999.
- [25] O.Sigmund y J.Peterson, “Numerical instabilities schemes in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima”, *Structural Optimization*, vol. 16, pp. 68-75, aug 1998.
- [26] B.Bourdin, “Filters in topology optimization”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 50, no. 9, pp. 2143-2158,

2001.

- [27] B.S. Lazarov y O.Sigmund, “Filters in topology optimization based on Helmholtz-type differential equations”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 86, pp. 765-781, may 2011.
- [28] K. Svanberg, “The method of moving asymptotes- a new method for structural optimization”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 24, pp. 359-373, feb 1987.
- [29] C.Zhang y R.Ordóñez, “Numerical optimization”, *Advances un Industrial Control*, no. 9781447122234, pp. 31-45, Springer 2012.
- [30] L.Giovannelli, J.J.Ródenas, J.M.Navarro-Jiménez y M.Tur, “Direct medical image-based Finite Element modelling for patient-specific simulation of future implants”, *Finite Elemente in Analysis and Design*, vol. 136, pp. 35-47, nov 2017.
- [31] T.H. Nguyen, G.H.Paulino, J.Song y C.H.Le, “A computational paradigm for multiresoution topology optimization (MTOPT)”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 41, pp3 525-539, apr 2010.
- [32] N.Aage, M.Nobel-Jorgensen, C.S.Andreasen y O.Sigmund, “Interactive topology optimization on hand-held devices”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 47, pp. 1-6, jan 2013.
- [33] J.F.Abel y M-S. Shephard, “An algorithm for multipoint constraints in finite element analysis”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 14, pp. 464-467, jan 1979.
- [34] O.C.Zienkiewicz and J.Z.Zhu, “The superconvergent patch recovery (SPR) and adaptive finite element refinement”, *Computer Methods in applied Mechanics and Engineering*, vol. 101, pp 207-224, dec 1992.
- [35] M.Tur, J.Albelda, E.Nadal y J.J.Ródenas, “Imposing Dirichlet boundary conditions in hierarchical Cartesian meshes by means of stabilized Lagrange multipliers”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 98, pp. 399-417, may 2014.

- [36] K. Shrotri. "COMPOSITE SKID LANDING GEAR DESIGN INVESTIGATION". *School of Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology*. August 2008
- [37] C. M. Rimoldi. "Determinación del factor de carga límite del tren de aterrizaje de un helicóptero liviano a partir de un ensayo limit drop test". FCEF y N, *REVISTA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES*, VOL. 6, SUPLEMENTO 1, JULIO 2019, 1-5
- [38] D.Muñoz, J.Albelda, J.J.Ródenas y E.Nadal. "Improvement in 3D Topology Optimization with h-adaptive refinement using the Cartesian Grid Finite Element Method".

Capítulo 5

Anexo: Manual del usuario

5.1. Preproceso

5.1.1. Función Principal

Se especificarán los cambios que deben realizarse en los parámetros para ejecutar con el programa uno u otro análisis en función de las necesidades del usuario. Haciendo uso de imágenes del código se podrá entender de manera más adecuada la explicación. El nombre la función principal corresponde a *Batch_FEAVox.m*

```
Batch_ProblemParameters(...  
1 'RAD3D_DR2_VOX_AlgoTens(Weight1)(2)',... % Problem name.)  
2 '15_Helicop',... % Problem folder.  
3 'Optimization'; % Problem type. Elasticity Optimization  
%% Input of analysis parameters  
Batch_GeometryParameters(...  
4 {'RAD03_TEST2.mat'},... % Names of the files (.igs/.mat) to import. Cell array (1xNumBodies)  
{zeros(3,1)},... % Bodies movement. Cell array (1xNumBodies) {zeros(3,1)}  
{[1 0 0;0 1 0;0 0 1]},... % Bodies rotation. Cell array (1xNumBodies) %eye(3) Roty {[0 0 -1;0 1 0;1 0 1 0  
'Dummy'],... % Name of the materials in the library. Cell array (1xNumMaterials)  
5 7e10,... % (Pa) Young modulus of the materials. Vector (1xNumMaterials) %Yield 6060-T5 130 MPa= 1.3e8 Pa  
6 0.33,... % Poisson ratio of the materials. Vector (1xNumMaterials)  
{1}); % Index of the material for each volume. Cell array (1xNumBodies(1xNumVolumes))
```

Figura 5.1: Sección primera de la función principal *Batch_FEAVox.m*

Dentro del bloque de *Problem_Parameters*, encontramos en primer lugar (1), el nombre con el que el resultado de la ejecución se guardará. La siguiente línea (2), corresponde a la carpeta donde se encuentra el archivo en *.mat* que será el espacio de trabajo del usuario. Seguidamente (3), se encuentra el tipo de programa que ejecutaremos, para nuestro caso únicamente ha sido necesario los programas *Optimization* y *Elasticity*.

A continuación en el bloque de *GeometryParameters*, la primera línea (4) corresponde al archivo que será nuestro espacio de trabajo. Las dos siguientes (5) y (6) hacen referencia a las propiedades mecánicas que se

quieren que tenga el espacio de trabajo, en concreto al módulo de Young y el coeficiente de Poisson respectivamente.

```

Batch_MeshingParameters(...)
7 1,... % Element type, linear (1) or quadratic (2). Single value
8 6,... % Initial level of mesh, usually it is recommended to start from 2. Vector (1xNumBodies)
   {0.03*ones(2,3)},... % Scale off set for the mesh in part of unity, ([SupX,SupY,SupZ;InfX,InfY,InfZ]). Cell arra
   1,... % Maximum numer of iterations. Single value
9 15,... % Error target. Single value (ERROR NORMA ENERGÉTICA)
10 0.75,... % Relative error reduction per iteration. Single value
   0,... % Refinement type, uniform (1) or h-adaptive (0). Single value
   0,... % Mesh coarsening, off (0) or on (1). (PARA QUE LO )
   [0 1 1],... % Preprocessing refinement criteria flags. [Geometrical,Image,Singularities] Vector 1x3 Geometrical
   1,... % Refinement minimum level. Single value
11 7;% Refinement maximum level, limited up to 15. Single value
Batch_ErrorEstimationParameters(...)
   0,... % Exact solution case. If (0) there will be no comparisons. Single value
   1); % Superconvergent Patch Recovery type. Vector (1xNumBodies)
Batch_BoundaryConditionsParameters(...)
12 {[11 11] 0 0 0 1 0 0},... % Load case info. Cell array (1xNumBodies) [Dirichlet,Neumann,Volumetric,Points,Nodes,
   ... %8 CURVOFINAL4 %9 CURVO_EXTRUEND %10 CURVORAD1 %11 CURVORAD03
   1,... % Stresses type to feedback the Dirichlet stabilization, (1) FEM, (2) SPR or (3) Exact stresses (available
   100,... % Scale the factor for Dirichlet imposition. Vector (1xNumBodies)
   0,... % Flag to enable stabilization of Neumann boundaries
   0.001); % Scale the factor for for Neumann stabilization

```

Figura 5.2: Sección segunda de la función principal *Batch_FEAVox.m*

En la primera línea (7) del bloque *MeshingParameters* definimos el tipo de elemento que se quiere utilizar (lineal o cuadrático). De igual forma en la siguiente (8), se define el nivel inicial de la malla, conforme mayor sea este nivel más pequeños serán los elementos de la malla. A continuación en la (9), se define el error objetivo para el refinamiento basado en estimadores de error y, en cuanto a la línea (10), ésta define la reducción del error relativo por paso de refinamiento.

Después, en la línea (11), se especifica el nivel máximo de la malla y, por último en la línea (12), se definen las condiciones que serán aplicadas tanto de Neumann como de Dirichlet, haciendo alusión al caso concreto dentro de los archivos *Prob_DirichletConditions.m* y *Prob_NeumannConditions.m*

```

Batch OptimizationParameters(...)
13 [0.2,... % The prescribed volume fraction.
    [0.001 1],... % Density Limits: (1) Density Low (2) Density High.
14 [3,... % The penalization power in the SIMP scheme. Usually Penal>=3.
15 [0.0651*1.5,... % Filter radius. %0.0651 para test.mat y CURVOFINAL.mat/ CURVOFINAL4.mat
    1,... % Filter (0) No filtering (1) Sensitivity filtering, (2) Density filtering.
    100,... % Number of iterations to avoid endless analysis.
16 [2,0,0]... % Refinement. (1) On (0) Off. [(1)Evalua solo nivel de gris del elemento (2) Evalua nive
    ...%[Density based,LevelSet,Nivel de Error];
    1,... % Optimization Algorithm: (1) OC(Bisection) (2) MMA (3) SQP.
17 [1,... % Type of Problem: (1) Minimum Compliance, (2) Max stress, (3) Scan through vf.
    0,... % Continuation strategy (1) On (0) Off. Adapative Penalty.
    [0 1 1.1],... % Gray-Scale filter (1) On (0) Off. ADD INPUT TO USE WHEN CONVERGENCE (AS CONTOURING)
18 [16 0]... % Passive (1) and Hole (2) case.
    ... %13 CURVOFINAL4 %14 CURVO_EXTRUEND %15 CURVORAD1 %16 CURVORAD03
    0); % Contouring: Off (0) Gray-Scale Filter (1) Sensitivity Filter (2) Homogenization (3). EXTINGU

```

Figura 5.3: Sección tercera de la función principal *Batch_FEA Vox.m*

Continuando con la Figura 5.3, en primer lugar **(13)** se define la fracción de volumen inicial que se irá modificando al trabajar con el Algoritmo 2 (Minimización de volumen con restricción de tensión) del apartado 1.1.3. En la **(14)** se define el parámetro de penalización. Después en la **(15)** se encuentra el radio del filtro, donde su valor se ha definido como el tamaño de elemento de la malla inicial por un factor igual a 1.5, siendo éste el más adecuado según la bibliografía.

En la línea **(16)** se define el tipo de refinamiento con el que se va a trabajar. Dentro del vector, la primera cifra hace referencia al refinamiento por densidad; un valor de cero desactiva esta opción, un valor de 1 implica que para el refinamiento solo se considera un elemento en cuestión y un valor de 2 implica que en el refinamiento no solo considere un elemento sino también sus vecinos. La segunda cifra, se usa como depuración del código, y por tanto no será accesible para el usuario, sin embargo, sí que será útil para la figura del programador. La tercera cifra del vector hace referencia al refinamiento basado en estimadores de error, un valor de 1 lo activa y el 0 lo deja inoperativo. En la línea **(17)**, con un 1 se ejecutará el Algoritmo 1 (apartado 1.1.3.) y con un 2 se tendrá la opción de incorporar el Algoritmo 2 (apartado 1.1.3.) al Algoritmo 1.

Finalmente en la línea **(18)** encontramos la asignación de elementos pasivos. La primera cifra del vector entre corchetes hace referencia al caso de la función *Opt_PassiveElements.m*, donde se definen las superficies que formarán parte de los elementos pasivos. La segunda cifra, tiene el efecto contrario y define elementos que deban permanecer vacíos. Aunque en este trabajo, no se ha hecho uso de esta funcionalidad.

5.1.2. Funciones y herramientas secundarias

Se describen, a continuación, otras funciones relevantes para el funcionamiento del programa. En primer lugar, *Prob_DirichletConditions.m* donde se definen los casos que se asignarán en la línea **(12)** de la función princi-

pal, Figura 5.2. Tal y como se puede observar en la Figura 5.4, dónde se encuentra un caso en concreto.

```

%% Function Head
function [DisplXYZ,ConstrainedDOF,Condition]=Prob_DirichletConditions(SurfacePoints,iBody,iFace,iLoadCase,GPSFields)
%% Initialize variables
global Results Parameters Mesh Intersections Constants BoundaryCond
iMesh=Parameters.Mesh(iBody).iMesh;
% t=Parameters.Solver.iLoadStep;
% GPSFields has ('GlobalCoords','UnitNormVector'),[3 3]
GPSFields=Data_ConstantsQuery(Constants,'GPS',{'iElement'},1,[]);
iElem=Results(iMesh,iBody).GaussPoint.Surface(SurfacePoints,GPSFields);
NPoints=numel(SurfacePoints);
GlobalCS=1;
LocalCS=2;
FreeNeumannCond=0;
DirichletCond=2;
SymmetryCond=3;
ActiveConstrain=0;
DisplX=[];
DisplY=[];
DisplZ=[];
CS=GlobalCS;

%% Dirichlet boundary conditions
% USER CAN DEFINE DIRICHLET BOUNDARY CONDITIONS HERE
switch iLoadCase
case 1 %GAPSKY
switch iFace
case {11,12}
CS=GlobalCS;
DisplZ=zeros(NPoints,1);
ActiveConstrain=1;
Condition=DirichletCond;
case {14,15}
DisplY=zeros(NPoints,1);
ActiveConstrain=1;
Condition=SymmetryCond;
case {23}
DisplX=zeros(NPoints,1);
ActiveConstrain=1;
Condition=DirichletCond;
end

```

Figura 5.4: Prob_DirichletConditions.m

También es preciso comentar la función *Prob_NeumannConditions.m* donde, al igual que en la función *Prob_DirichletConditions.m*, se definen los casos que se asignarán en la línea (12) de la función principal, Figura 5.2. En la Figura 5.5, se encuentra un caso en particular.

```

%% Function Head
function [tx,ty,tz,ActivePress]=Prob_NeumannConditions(SurfacePoints,iBody,iFace,iLoadCase,GPSFields)
%% Initialize variables
global Results Parameters
iMesh=Parameters.Mesh(iBody).iMesh;
% t=Parameters.Solver.iLoadStep;
NPoints=numel(SurfacePoints);
XYZ=Results(iMesh,iBody).GaussPoint.Surface(SurfacePoints,GPSFields(1:3));
GlobalCS=1;
LocalCS=2;

%% Neumann boundary conditions
% USER CAN DEFINE NEUMANN BOUNDARY CONDITIONS HERE
switch iLoadCase
case 1 %GAPSKY
switch iFace
case {22}
CS=GlobalCS;
tx=zeros(NPoints,1);
ty=zeros(NPoints,1);
tz=1*ones(NPoints,1);
ActivePress=1;
otherwise
CS=GlobalCS;
tx=zeros(NPoints,1);
ty=zeros(NPoints,1);
tz=zeros(NPoints,1);
ActivePress=0;
end

```

Figura 5.5: Prob_NeumannConditions.m

De igual forma, conviene nombrar la función *Opt_PassiveElements.m* donde, al igual que en las funciones anteriores, se definen los casos que se asignarán posteriormente en la línea (17) de la función principal, Figura 5.2. En la Figura 5.6 se muestra un caso.

```
function [Passive,Holes] = Opt_PassiveElements(iBody)
global Parameters Mesh VoxelMesh Constants Results
iMesh = Parameters.Mesh(iBody).iMesh;
% Description:
% INPUTS:
% OUTPUTS:
PassiveCases = Parameters.Optimization.PassiveCases;

Nele = VoxelMesh(iMesh,iBody).NumElements;
Passive = false(1,Nele);
Holes = false(1,Nele);

XMAX = max(VoxelMesh(iMesh,iBody).Element.CenterXYZ(1,:)); xmin = min(VoxelMesh(iMesh,iBody).Element.CenterXYZ(1,:));
YMAX = max(VoxelMesh(iMesh,iBody).Element.CenterXYZ(2,:)); ymin = min(VoxelMesh(iMesh,iBody).Element.CenterXYZ(2,:));
ZMAX = max(VoxelMesh(iMesh,iBody).Element.CenterXYZ(3,:)); zmin = min(VoxelMesh(iMesh,iBody).Element.CenterXYZ(3,:));

x = 1;
y = 2;
z = 3;

CasePassive = PassiveCases(1);
switch CasePassive
case 14 %CURVO_EXTRUEND and neighbors
GPS_FIXED = Data_ConstantsQuery(Constants,'GPS',{'iFace','iElement'},[1,1],1);
tSurf=[22 19 20];
Neighbors = 1;
targetElements = unique(Results(iMesh,iBody).GaussPoint.Surface(ismember(Results(iMesh,iBody).GaussPoint.Surface(:,GPS_FIXED),tSurf)));
nElements = numel(targetElements);
virtualTargetElements = VMesher_StructuredElementsToVirtualElements(Mesh(iMesh,iBody).Element.SeqToStruct(targetElements));
VirtualNeighbors = [];
for iElm = 1:nElements
VirtualNeighbors = [VirtualNeighbors,Opt_FindNeighbors(virtualTargetElements(:,iElm),Neighbors)];
end
StructElements = VMesher_VirtualElementsToStructuredElements(VirtualNeighbors);
StructElements = unique(StructElements);
targetElements = Mesh(iMesh,iBody).Element.StructToSeq(StructElements);
passiveElements = Mesh(iMesh,iBody).Element.Element2Voxel(:,targetElements(targetElements>0));
passiveElements = passiveElements(passiveElements>0);
```

Figura 5.6: Opt_PassiveElements.m

Una vez comentadas las funciones principales utilizadas durante el proceso de análisis, conviene comentar el uso de otras herramientas como la activación y desactivación de los *voxels*, la cual se puede realizar en la función *Opt_DataInitialization.m*, en el cuadro azul de la Figura 5.7. Además para seleccionar el tipo de *voxels* debemos acudir a la función *Opt_Define Voxels*, en el cuadro verde de la Figura 5.7.


```

Parameters.Optimization.iProblem = 0;
Parameters.Optimization.globalTopLoop = 0;
Parameters.Optimization.Refinement = 0;
Parameters.Optimization.F0 = 0;

Parameters.Optimization.Homogenization = 1;
%1 VOXELS ACTIVADOS / 0 VOX DESACTIVADOS

Parameters.Optimization.dC = [];
Parameters.Optimization.dV = [];
Parameters.Optimization.dS = [];

Parameters.Optimization.RelativeError = [];
Parameters.Optimization.NDofs = [];

function Opt_DefineVoxels(iBody,iMesh)
global Mesh Parameters Body
if nargin == 0
    iBody = numel(Body);
    iMesh = Parameters.Mesh(iBody).iMesh;
end
iCase = 1; %1 = Vox Act /
lvls = zeros(Mesh(iMesh,iBody).NumElements,1);
switch iCase
    case 0
        lvls(1:Mesh(iMesh,iBody).NumElements) = 1;
    case 1
        lvls(Mesh(iMesh,iBody).Element.InternalGeo) = 1;
%         voxelsPerElement(Mesh(iMesh,iBody).Element.InternalGeo) = 8;

```

Figura 5.7: Opt_DataInitialization y Opt_DefineVoxels

Si se desea modificar la evaluación de las tensiones del algoritmo para la restricción de tensión, se ha de hacer dentro de la función *Opt_DataInitialization.m*, tal y como se ve en la Figura 5.8. Se puede modificar de la siguiente forma:

- **AdmStress**: corresponde el límite de fluencia establecido en base al material del que esté compuesto nuestro dominio de trabajo.
- **StressFunction**: Define el tratamiento que se le realiza a las tensiones obtenidas por el cálculo de EF antes de compararlo con el valor admisible. Esta función, actualmente, produce tanto el valor de tensiones máximo (*max*) como el valor medio (*mean*).
- **TargetStresses**: Un 0 implica la búsqueda de las tensiones de manera global en la geometría, un 1 implica la búsqueda de tensiones en algunas superficies en concreto.
- **GPS-VERTEX**: Un 0, implica la búsqueda de tensiones en los puntos de Gauss de superficie, y un 1, en los vértices de la malla de trabajo. Dicha malla esta constituida por triángulos, y permite la representación de resultados.
- **Filter**: Puede ser *Linear* o *Quadratic*.


```

case '15_Helicop'
Parameters.Optimization.AdmStress = 1.3e8; %Limite de fluencia
Parameters.Optimization.StressFunction = @(x)max(x);
Parameters.Optimization.TargetStresses = 0;
Parameters.Optimization.GPS_VERTEX = 1;
Parameters.Optimization.Filter = 'Linear';

```

Figura 5.8: Opt_DataInitialization 2

5.2. Postproceso

Para el caso de los problemas de *Elasticity*, una vez haya terminado el proceso aparecerá la ventana que se encuentra en la Figura 5.9, de la que se pueden extraer, como resultados más relevantes, los desplazamientos y las tensiones de Von Mises. Dicha información se muestra mediante las funciones de dibujo del software, que reciben el nombre de *Displacements* y *Recovered stresses* respectivamente.

```

PLOTTING TOOLS (some routines will require parameters)

Preprocess -> IGES Model, Body, Mesh, Intersections, Nodes
Integration -> Patterns, Gauss points in surface, Normal vectors
Solution -> Displacements, Deformed Shape, Recovered stresses
Contact -> Contact Points
Error -> Exact Error, Estimated Error, Effectivity
Sensitivities -> Velocity Field, Vel. Field in nodes, dDisplacements, dStresses
Medical image ->

PRINT current figure

```

Figura 5.9: Elasticity output

Por otra parte, para los problemas de *Optimization*, una vez haya terminado el proceso, si se desea obtener la geometría, se hace uso de la función *Opt_Plot_v3_nueva.m*, donde, previamente a su ejecución, es necesario cargar los siguientes archivos resultantes del proceso (Figura 5.10):

- Geometría
- Malla, aquella que se quiera visualizar de todas las generadas por el programa.
- Parámetros
- Intersecciones

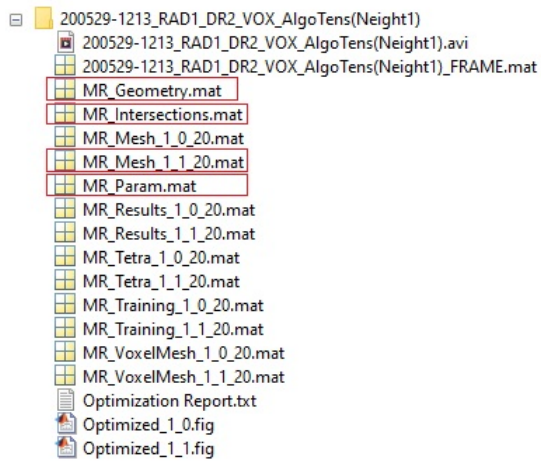


Figura 5.10: Optimization output

Finalmente, para los problemas de *Optimization*, una vez haya terminado el proceso, si se desea obtener la geometría con las tensiones resultantes, se hace uso de la función *Opt_PlotStresses_nueva.m*, donde, previamente a su ejecución, es necesario cargar los siguientes archivos resultantes del proceso (Figura 5.11):

- Malla, al igual que en el caso previo, seleccionar aquella que se desea visualizar de todas las generadas por el programa a lo largo del proceso iterativo.
- Malla de vóxeles, aquella que se desee graficar.
- Parámetros
- Tetra
- Results

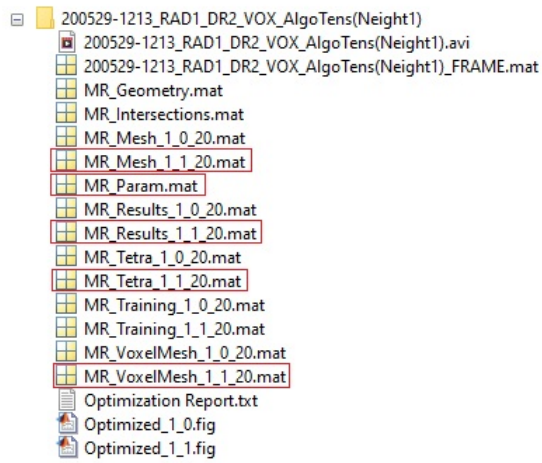


Figura 5.11: Optimization Stresses output