



# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

## TRABAJO FIN DE MÁSTER OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE CAPOTS DE PROTECCIÓN DE ANCLAJES PARA SISTEMAS DE PRETENSADO Y POSTENSADO

Autor: D. Juan Gordillo Abengózar

Directores: Ing. D. Carlos Fuertes Kronberg y Dr. Ing. D. Jesús R.  
Jiménez Octavio

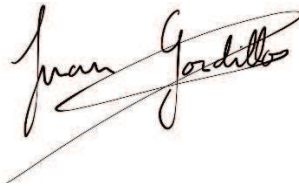
Madrid, julio de 2024



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE CAPOTS DE PROTECCIÓN DE ANCLAJES  
PARA SISTEMAS DE PRETENSADO Y POSTENSADO

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2023/24 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido  
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Juan Gordillo Abengózar

Fecha: 4 / 7 / 24

Autorizada la entrega del proyecto

LOS DIRECTORES DEL PROYECTO



Fdo.: Carlos Fuertes Kronberg

Fecha: 5 / 7 / 24

Firmado digitalmente por JESUS

R. JIMENEZ OCTAVIO -

06259224G

Fecha: 2024.07.05 09:51:34

+02'00'

Fdo.: Jesús Ramón Jiménez Octavio

Fecha: 5 / 7 / 24





# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

## TRABAJO FIN DE MÁSTER OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE CAPOTS DE PROTECCIÓN DE ANCLAJES PARA SISTEMAS DE PRETENSADO Y POSTENSADO

Autor: D. Juan Gordillo Abengózar

Directores: Ing. D. Carlos Fuertes Kronberg y Dr. Ing. D. Jesús R.  
Jiménez Octavio

Madrid, julio de 2024



*A mi familia, en especial a mi madre, mi padre, mi hermana y mis abuelos.*  
*A las amistades hechas durante estos años en Madrid, especialmente a Teresa y a David.*  
*A mis profesores, en especial a Pablo, Alexis y a los directores del proyecto: Jesús y*  
*Carlos*





# OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE CAPOTS DE PROTECCIÓN DE ANCLAJES PARA SISTEMAS DE PRETENSADO Y POSTENSADO

**Autor: Gordillo Abengózar, Juan.**

Director: Fuertes Kronberg, Carlos y Jiménez Octavio, Jesús R.

Entidad Colaboradora: ETSI ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

El presente proyecto trata sobre la optimización multiobjetivo en base a un criterio económico y otro de resistencia de los capots de protección de anclajes. Para realizar la optimización se ha construido un modelo matemático usando simulaciones de elementos finitos. La solución escogida ha sido uno de los puntos del frente de Pareto obtenido que reduce el coste, pero también la resistencia, originales.

**Palabras clave:** Pretensado, Postensado, Capots de Protección, Optimización Multiobjetivo, Frente de Pareto, Elementos Finitos

### 1. Introducción y Objetivos

Los capots de protección son cabezas de metal o plástico que se emplean para asegurar una protección contra la corrosión de las cabezas de anclajes de tendones tensados de acero durante toda la vida útil de la estructura. Además, sirven para retener el producto de inyección, ya sea cemento o cera según si el tendón es adherente o no adherente. La normativa de referencia establece que se debe garantizar que, durante la inyección el capot soporte una presión mínima de 20 bar sin producirse deformación plástica. [1][2]

El presente proyecto tiene como fin la optimización multiobjetivo de estos capots, estableciendo como principales criterios:

- |             |  |
|-------------|--|
| PRINCIPALES | <ol style="list-style-type: none"><li>1. Reducción del coste del capot.</li><li>2. Aumento de la resistencia del capot.</li></ol>  |
| SECUNDARIOS | <ol style="list-style-type: none"><li>1. Estudio de las diferentes soluciones existentes en el mercado.</li><li>2. Reducción del impacto medioambiental del capot.</li></ol> |

### 2. Metodología

Cualitativamente el problema queda definido por las variables continuas de espesor lateral, espesor de la base y radio de la cúpula y las variables discretas de número de nervios exteriores e interiores; por una función objetivo de coste, definida en función del volumen del capot, que depende de las cinco variables y una de resistencia, definida como el coeficiente de minoración de cargas, en función de las variables. Los coeficientes que relacionan cada variable con las funciones objetivo se calcularán mediante ajustes por regresión entre cada una de las variables y el volumen o la tensión máxima de von Mises del capot, según corresponda. Para realizar estos ajustes, se van a realizar en *ANSYS Static Structural* una serie de experimentos usando el modelo de capot de la Imagen 1. Este está fabricado con poliamida-6 y un 30% de fibras de vidrio.

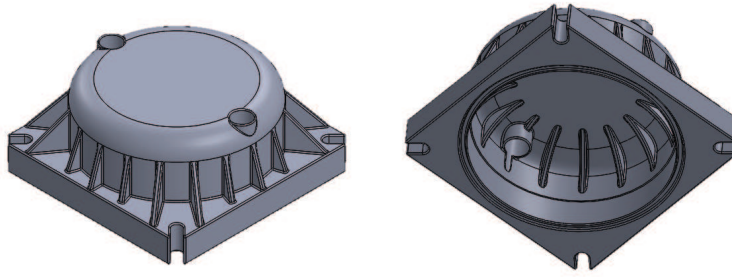


Imagen 1. Aspecto del exterior y del interior del modelo 3D del capot empleado para los experimentos.

En cuanto a la región factible del problema, está formada por aquellos puntos con un valor positivo de ambas funciones objetivo. Una vez resuelto el problema se añadirá una restricción adicional referente al valor máximo de la función objetivo de resistencia.

Para resolver el problema de optimización se calculará el conjunto eficiente o de Pareto, también llamado frontera de Pareto. Este es aquel conjunto de soluciones en las que no es posible mejorar uno de los criterios de decisión sin empeorar el otro. Para obtenerlo se empleará el Método de las Ponderaciones, método que consiste en multiplicar cada función objetivo por un peso no negativo y agregarlos en una función única.[3]

### 3. Resultados

Al analizar los diseños de capots de diferentes empresas se observa que las soluciones de existentes son bastante parecidas unas a otras. Esto, unido a la falta de documentación técnica pública sobre su diseño, hacen que no sea posible hacer un análisis DAFO comparativo. Analizando la geometría base se observa que el modelo actual presenta un coeficiente de minoración de cargas de 0,101, teniendo un volumen de 0,004032.

Una vez realizados los experimentos y los ajustes de regresión mencionados en el apartado anterior, las funciones objetivo resultantes son:

$$f_C(\bar{x}_i, \bar{w}_j) = 6,6063x_1 + 2,7987x_2 - 0,0342x_3 + 3,42 \cdot 10^{-4}w_1 + 5,7 \cdot 10^{-4}w_2 \quad (I)$$

$$f_R(\bar{x}_i, \bar{w}_j) = 6,748x_1 + 3,158x_2 - 0,336x_3 + 1,35 \cdot 10^{-3}w_1 + 2,78 \cdot 10^{-3}w_2 \quad (II)$$

Al resolver el problema de optimización usando *Matlab*, el frente de Pareto obtenido se representa en el Gráfico 1. Al introducir la restricción adicional del máximo coeficiente de minoración de cargas, se opta porque este sea el obtenido en el análisis de la geometría base. La solución elegida es, por tanto, la que presenta el valor del coeficiente de minoración de cargas más próximo a 0,101, siendo este de 0,0992 y teniendo un precio de 11,63 €. Sin embargo, al simular esta solución en *ANSYS* se observa que el coeficiente de minoración de cargas obtenido es de 0,2128.

Adicionalmente, se realiza un estudio de cambio de material con *Granta EduPack* de *ANSYS*, donde se determina que las dos opciones más interesantes son un aumento del porcentaje de fibras de vidrio o un cambio a Al 2024 T861.

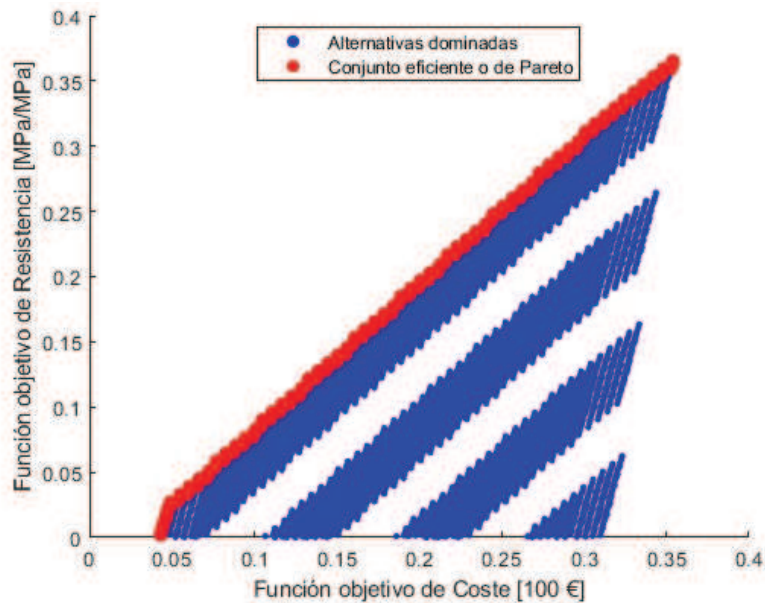


Gráfico 1. Conjunto de soluciones dominadas y frente de Pareto.

#### 4. Conclusiones

- Debido a la naturaleza del problema, la solución del problema no es única. Esto permite obtener diversas soluciones eficientes al problema según el peso que se le dé a cada función objetivo.
- Los resultados obtenidos mediante el modelo matemático planteado y los obtenidos usando *ANSYS Static Structural* difieren. Esto se debe a la suposición de linealidad en la relación entre cada una de las variables y las funciones objetivo.
- Se ha conseguido un capot un 11,23% más barato, pero menos resistente. Sin embargo, pese a esto último, se ha conseguido un diseño óptimo para las condiciones de trabajo.
- Se han reducido las emisiones asociadas al material empleado en los capots en torno a un 10%.
- Al aumentar el porcentaje de fibras de vidrio o al cambiar el material a una aleación metálica se consiguen considerables aumentos de resistencia.

#### 5. Referencias Principales

- [1] EOTA, «European Assessment Document - EAD 160004-00-0301,» [www.eota.eu](http://www.eota.eu), Brussels, 2016.
- [2] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, «Evaluación Técnica de Productos Innovadores de Construcción,» CSIC, [En línea]. Available: <https://dit.ietcc.csic.es/documentos/>. [Último acceso: 2023].
- [3] P. Linares, A. Ramos, P. Sánchez, Á. Sarabia y B. Vitoriano, «Teoría de la Decisión: Decisión con Incertidumbre, Decisión Multicriterio y Teoría de Juegos,» Apuntes del Departamento de Organización Industrial de la ETSII ICAI, Madrid, 2006.



# OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF PROTECTION CAPS OF ANCHORAGES FOR PRESTRESSING AND POST-TENSIONING SYSTEMS

**Author: Gordillo Abengózar, Juan.**

Supervisor: Fuertes Kronberg, Carlos y Jiménez Octavio, Jesús R.

Collaborating Entity: ETSI ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## ABSTRACT

This project deals with multi-objective optimization based on an economic criterion and another of resistance for the protection caps of anchorages. To carry out the optimization, a mathematical model has been constructed using finite element simulations. The chosen solution has been one of the points of the obtained Pareto frontier that reduces the original cost, but also the original resistance.

**Keywords:** Prestressing, Post-tensioning, Protection Caps, Multi-objective Optimization, Pareto Frontier, Finite Elements

## 1. Introduction and Objectives

The protection caps are metal or plastic heads that are used to ensure protection against corrosion of tensioned steel tendon anchorages throughout the service life of the structure. Furthermore, they serve to retain the injection product, whether it is cement or wax depending on whether the tendon is adherent or non-adherent. The reference standard establishes that during the injection, the cap must withstand a minimum pressure of 20 bars without causing plastic deformation.[1][2]

The purpose of this project is the multi-objective optimization of these caps. The main criteria established are:

- |                      |   |
|----------------------|---|
| MAIN OBJECTIVES      | 3. Reduction of the protection caps cost.<br>4. Increase the resistance of the protection caps.                         |
| SECONDARY OBJECTIVES | 3. Estudio de las diferentes soluciones existentes en el mercado.<br>4. Reducción del impacto medioambiental del capot. |

## 2. Methodology

Qualitatively, the problem is defined using three continuous variables: lateral thickness, base thickness, and dome radius, and two discrete variables: the number of external and internal ribs. It is also defined by a cost objective function defined as a function of the volume of the cap, which depends on the five variables, and a resistance function, defined as the load reduction coefficient, depending on the variables. The coefficients relating each variable to the objective functions will be calculated through regression adjustments between each variable and the volume of the cap or the maximum von Mises stress of the cap, as appropriate. To perform these adjustments, some simulations will be carried out using *ANSYS*.

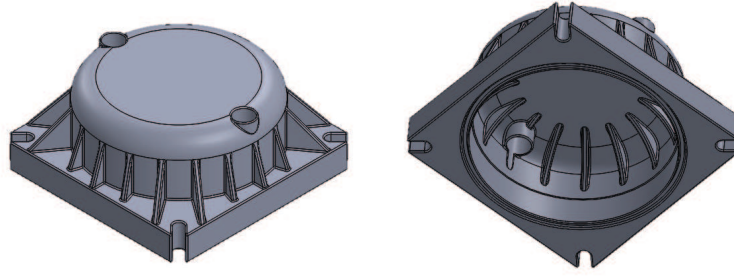


Image 1. Exterior and interior view of the 3D model of the cap used for the experiments.

Regarding the feasible region of the problem, it is formed by those points with a positive value for both objective functions. Once the problem is solved, an additional restriction related to the maximum value of the resistance objective function will be added.

To solve the optimization problem, the efficient set or Pareto frontier will be calculated. This set of solutions cannot improve one decision criterion without worsening another. The Weighted Sum Method will be used to obtain it, which consists of multiplying each objective function by a non-negative weight and adding them into a single function.[3]

### 3. Results

Analyzing the cap designs of different companies, it is observed that the existing solutions are quite similar to each other. This, combined with the lack of public technical documentation about their design, makes it impossible to perform a comparative SWOT analysis. Analyzing the base geometry, it is observed that the current model has a load reduction coefficient of 0.101, with a volume of 0.004032.

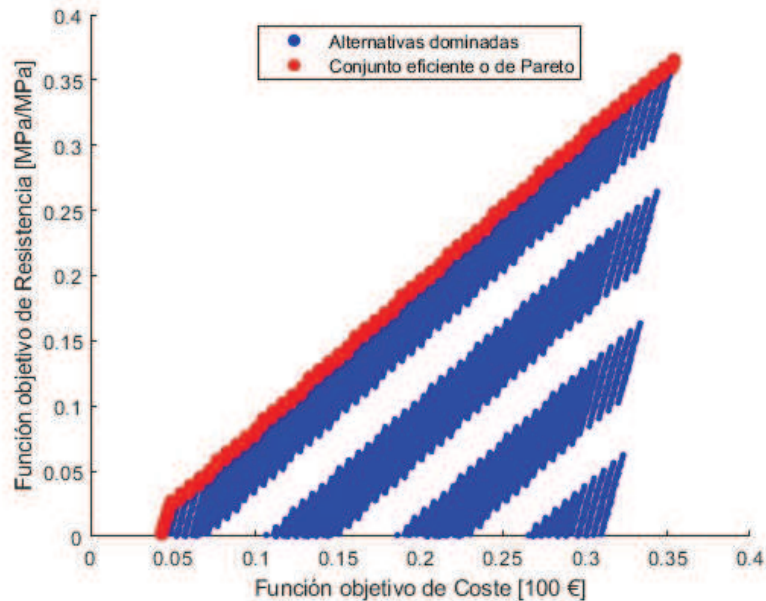
Once the experiments and regression adjustments mentioned in the previous section are carried out, the resulting objective functions are:

$$f_C(\bar{x}_i, \bar{w}_j) = 6,6063x_1 + 2,7987x_2 - 0,0342x_3 + 3,42 \cdot 10^{-4}w_1 + 5,7 \cdot 10^{-4}w_2 \quad (I)$$

$$f_R(\bar{x}_i, \bar{w}_j) = 6,748x_1 + 3,158x_2 - 0,336x_3 + 1,35 \cdot 10^{-3}w_1 + 2,78 \cdot 10^{-3}w_2 \quad (II)$$

When solving the optimization problem using *Matlab*, the obtained Pareto frontier is represented in Graph 1. The additional restriction of the maximum load reduction coefficient, chosen as the one obtained in the base geometry analysis, is introduced. The chosen solution is, therefore, the one that presents the load reduction coefficient closest to 0.101, which is 0.0992 and has a cost of €11.63. However, when simulating this solution in *ANSYS*, it is observed that the obtained load reduction coefficient is 0.2128.

Additionally, a material change study is conducted with *ANSYS's Granta EduPack*, determining that the two most interesting options if the material is changed are an increase in the percentage of glass fibers or a switch to Al 2024 T861.



Graph1. Set of dominated solutions and Pareto front.

#### 4. Conclusions

- Due to the nature of the problem, the solution to the problem is not unique. This allows different designs to be obtained from various efficient solution points depending on the weight given to each objective function.
- The results obtained through the proposed mathematical model and those obtained using *ANSYS Static Structural* differ. This is due to the assumption of linearity in the relationship between each of the variables and the objective functions.
- A cap 11.23% cheaper but less resistant has been achieved. However, despite this reduction of resistance, an optimal design for the working conditions has been obtained.
- The emissions associated with the material used in the caps have been reduced by around 10%.
- Considerable increases in resistance can be achieved by increasing the percentage of glass fibers or changing the material to a metallic alloy.

#### 5. Main References

- [1] EOTA, «European Assessment Document - EAD 160004-00-0301,» [www.eota.eu](http://www.eota.eu), Brussels, 2016.
- [2] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, «Evaluación Técnica de Productos Innovadores de Construcción,» CSIC, [En línea]. Available: <https://dit.ietcc.csic.es/documentos/>. [Último acceso: 2023].
- [3] P. Linares, A. Ramos, P. Sánchez, Á. Sarabia y B. Vitoriano, «Teoría de la Decisión: Decisión con Incertidumbre, Decisión Multicriterio y Teoría de Juegos,» Apuntes del Departamento de Organización Industrial de la ETSII ICAI, Madrid, 2006.







# Índice general

<b>MEMORIA .....</b>	<b>5</b>
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>9</b>
1.1 Contextualización.....	9
1.1.1 Objeto y Motivación.....	9
1.1.2 Alcance.....	11
1.2 Objetivos.....	11
1.2.1 Sostenibilidad.....	11
1.3 Estado del Arte.....	12
1.3.1 Marco Regulatorio.....	12
1.3.2 Análisis de las Soluciones de Capots Actuales .....	13
<b>Capítulo 2. Material y Métodos.....</b>	<b>17</b>
2.1 Recursos Empleados .....	17
2.1.1 Recursos Informáticos.....	17
2.1.2 Normativa de Referencia.....	18
2.2 Metodología .....	19
2.2.1 Planificación Temporal.....	19
2.2.2 Definición del Problema de Optimización [12].....	20
2.2.3 Diseño de Experimentos.....	23
2.2.4 Definición del Modelo de Estudio.....	24
<b>Capítulo 3. Resultados.....</b>	<b>31</b>
3.1 Análisis de la Geometría Base .....	31
3.2 Resultados de los Experimentos .....	32
3.2.1 Experimento I: Espesor de la Pared .....	33
3.2.2 experimento II: Espesor de la Base.....	34
3.2.3 Experimento III: Radio de la Cúpula.....	35
3.2.4 Experimento IV: Número de Nervios Externos.....	36
3.2.5 Experimento V: Número de Nervios Interiores.....	37
3.2.6 Cálculo de las Funciones Objetivo .....	38
3.3 Solución al Problema de Optimización.....	39
<b>Capítulo 4. Discusión de Resultados.....</b>	<b>41</b>



4.1	Estudio de Cambio de Material.....	41
4.1.1	<i>Consideraciones Generales.....</i>	41
4.1.2	<i>Estudio 1: Materiales de la Misma Familia.....</i>	41
4.1.3	<i>Estudio 2: Polímeros y Aleaciones Metálicas.....</i>	43
4.2	Solución Elegida .....	46
4.2.1	<i>Comprobación Estructural de la Solución Elegida .....</i>	47
4.2.2	<i>Discusión de Resultados del Problema de Optimización.....</i>	49
4.3	Estudio Económico .....	50
4.3.1	<i>Consideraciones del Estudio.....</i>	50
4.3.2	<i>Resultados del estudio Económico.....</i>	50
4.4	Estudio de Sostenibilidad.....	51
4.4.1	<i>Consideraciones del Estudio.....</i>	51
4.4.2	<i>Resultados del Estudio de Sostenibilidad.....</i>	51
	<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>53</b>
5.1	Conclusiones del Estudio de Cambio de Material .....	53
5.2	Conclusiones del Problema de Optimización .....	53
5.3	Conclusiones del Estudio Económico.....	54
5.4	Conclusiones del Estudio de Sostenibilidad .....	54
5.5	Trabajos Futuros .....	55
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>57</b>
	<b>Anexos de la Memoria.....</b>	<b>59</b>
	Anexo I. Código de Matlab .....	59
	<b>ANEJO I: PLANOS.....</b>	<b>63</b>
	<b>Vista General del Modelo de Capot Optimizado.....</b>	<b>65</b>
	<b>Vistas Principales del Modelo de Capot Optimizado.....</b>	<b>67</b>



## *Índice de imágenes*

Imagen 1. Puente Lusitania de Mérida. [1] .....	10
Imagen 2. Aspecto del capot de TECPRESA.....	14
Imagen 3. Aspecto del capot eléctricamente aislado de MEKANO 4 y parte de su sistema de pretensado. [4] .....	15
Imagen 4. Aspecto del modelo estándar de capot de VSL con parte del sistema de pretensado. [5].....	15
Imagen 5. Aspecto del exterior y del interior del modelo 3D del capot empleado para los experimentos.....	24
Imagen 6. Detalle de la zona donde se dan los fenómenos de concentración de tensiones.	27
Imagen 7. Detalle de la zona de concentración de tensiones con la malla refinada. ....	27
Imagen 8. Representación de la malla con los valores de calidad de elemento. ....	29
Imagen 9. Distribución de la tensión equivalente de von Mises con anotaciones de los valores máximos.....	31
Imagen 10. Distribución de desplazamientos en la geometría simulada. ....	32
Imagen 12. Distribución de tensiones equivalentes de von Mises con anotaciones de los valores máximos locales.....	48
Imagen 13. Distribución de los desplazamientos en la geometría del capot optimizado. ...	49



## *Índice de tablas*

Tabla 1. Relación de softwares empleados.....	18
Tabla 2. Relación de experimentos a realizar para obtener los ajustes por regresión lineal. .....	23
Tabla 3. Resumen de las pendientes calculadas en los ajustes por regresión de resistencia y volumen en cada experimento. ....	38
Tabla 4. Incrementos de coste y resistencia de los materiales resultado del primer estudio con respecto al empleado actualmente. ....	43
Tabla 5. Incrementos de coste y resistencia, así como valor del cociente entre ambos incrementos de los materiales resultado del segundo estudio con respecto al empleado actualmente.....	45
Tabla 6. Resumen de los valores de las funciones objetivo y de las variables de decisión del problema para el punto elegido del frente de Pareto. ....	47
Tabla 7. Comparativa del coste y la resistencia del capot optimizado con el capot base....	49
Tabla 8. Resumen del coste de cada geometría de capot.....	51
Tabla 9. Resumen de las emisiones de CO <sub>2</sub> del material según Granta EduPack.....	52
Tabla 10. Emisiones totales de CO <sub>2</sub> según el modelo de capot.....	52



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

**ICAI**

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE CAPOTS DE  
PROTECCIÓN DE ANCLAJES PARA SISTEMAS DE  
PRETENSADO Y POSTENSADO

**MEMORIA**

Autor: D. Juan Gordillo Abengózar

Directores: Ing. D. Carlos Fuertes Kronberg y Dr. Ing. D. Jesús R.  
Jiménez Octavio

Madrid, julio de 2024





## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>9</b>
1.1 Contextualización.....	9
1.1.1 Objeto y Motivación.....	9
1.1.2 Alcance.....	11
1.2 Objetivos .....	11
1.2.1 Sostenibilidad.....	11
1.3 Estado del Arte.....	12
1.3.1 Marco Regulatorio.....	12
1.3.2 Análisis de las Soluciones de Capots Actuales .....	13
<b>Capítulo 2. Material y Métodos</b> .....	<b>17</b>
2.1 Recursos Empleados .....	17
2.1.1 Recursos Informáticos.....	17
2.1.2 Normativa de Referencia.....	18
2.2 Metodología .....	19
2.2.1 Planificación Temporal.....	19
2.2.2 Definición del Problema de Optimización [12].....	20
2.2.3 Diseño de Experimentos.....	23
2.2.4 Definición del Modelo de Estudio.....	24
<b>Capítulo 3. Resultados</b> .....	<b>31</b>
3.1 Análisis de la Geometría Base .....	31
3.2 Resultados de los Experimentos .....	32
3.2.1 Experimento I: Espesor de la Pared .....	33
3.2.2 experimento II: Espesor de la Base.....	34
3.2.3 Experimento III: Radio de la Cúpula.....	35
3.2.4 Experimento IV: Número de Nervios Externos.....	36
3.2.5 Experimento V: Número de Nervios Interiores.....	37
3.2.6 Cálculo de las Funciones Objetivo .....	38
3.3 Solución al Problema de Optimización.....	39
<b>Capítulo 4. Discusión de Resultados</b> .....	<b>41</b>
4.1 Estudio de Cambio de Material.....	41
4.1.1 Consideraciones Generales.....	41



4.1.2 Estudio 1: Materiales de la Misma Familia.....	41
4.1.3 Estudio 2: Polímeros y Aleaciones Metálicas.....	43
4.2 Solución Elegida .....	46
4.2.1 Comprobación Estructural de la Solución Elegida .....	47
4.2.2 Discusión de Resultados del Problema de Optimización.....	49
4.3 Estudio Económico .....	50
4.3.1 Consideraciones del Estudio.....	50
4.3.2 Resultados del estudio Económico.....	50
4.4 Estudio de Sostenibilidad.....	51
4.4.1 Consideraciones del Estudio.....	51
4.4.2 Resultados del Estudio de Sostenibilidad.....	51
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>53</b>
5.1 Conclusiones del Estudio de Cambio de Material .....	53
5.2 Conclusiones del Problema de Optimización .....	53
5.3 Conclusiones del Estudio Económico.....	54
5.4 Conclusiones del Estudio de Sostenibilidad .....	54
5.5 Trabajos Futuros .....	55
<b>Bibliografía .....</b>	<b>57</b>
<b>Anexos de la Memoria.....</b>	<b>59</b>
Anexo I. Código de Matlab .....	59



# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

## *1.1 CONTEXTUALIZACIÓN*

Los capots de protección son cabezas de metal o plástico que se emplean para asegurar una protección contra la corrosión de las cabezas de anclajes de tendones tensados de acero en estructuras de acero, hormigón y mixtas durante toda la vida útil de la estructura. Además, sirven para retener el producto de inyección, ya sea cemento o cera según si el tendón es adherente o no adherente.

Estos capots de protección están diseñados principalmente para anclajes de sistemas de pretensado y postensado, pero se pueden utilizar para proteger cualquier tipo de anclaje. Según la normativa de referencia, están fabricados en acero o plástico y se fijan mediante uniones roscadas.

### 1.1.1 OBJETO Y MOTIVACIÓN

El presente proyecto tiene como fin optimizar estos capots de protección permanente de diferentes tipologías de anclajes. Esta optimización se basará en un estudio de las soluciones que actualmente tienen en el mercado diferentes empresas del sector.

Estos capots, a pesar de ser elementos sin responsabilidad estructural, garantizan la protección de los anclajes frente a la corrosión, algo crítico para algunas estructuras. Como elementos no estructurales que son, deben cumplir su labor de protección con el menor impacto posible tanto en el peso como en el coste de la estructura. Además, en algunas estructuras pueden ser muy numerosos, por lo que representan un peso considerable, aunque despreciable frente al de otros elementos, en el total la estructura. Por ejemplo, el Puente Lusitania de Mérida tiene un arco de 190 metros del que cuelgan 23 pares de tirantes de acero que terminan en el tablero de hormigón. Si se supone que por cada tendón hay, mínimo, un capot, se tienen 46 capots. Tomando como referencia el peso del capot que se utilizará como modelo base en el presente proyecto, de 5,44 kg, los 46 capots suponen un peso total de 250 kg en la estructura del puente. Si bien es cierto que puede parecer un valor poco significativo en un puente de 480 m de largo de hormigón prefabricado y acero como el



Puente Lusitania, cuyo peso puede alcanzar varios centenares o incluso miles de toneladas, una reducción considerable del peso de estructuras no críticas, como los capots, tiene efectos beneficiosos sobre la estructura.



*Imagen 1. Puente Lusitania de Mérida. [1]*

En cuanto a la repercusión económica en el total de la estructura, si se supone un precio de en torno a 30 € por capot, se tiene un coste total de 1380 €. Al igual que en el caso del peso, se puede considerar despreciable frente al coste total de una estructura de estas características, pero es un buen elemento para intentar reducir el coste total.<sup>1</sup>

La motivación del proyecto es, por tanto, la optimización de las soluciones actualmente en el mercado de capots de protección permanente de anclajes pretensados, como una iniciativa de I+D+I dentro del sector de la construcción.

---

<sup>1</sup> Los números estimados en este ejemplo no se corresponden del todo con la realidad ya que se han obtenido suponiendo que el Puente Lusitania de Mérida emplea los capots de protección con los que se están trabajando en este proyecto.

### 1.1.2 ALCANCE

El desarrollo del presente proyecto conllevará la optimización de los capots que actualmente se emplean en la construcción de estructuras de acero, hormigón y mixtas a partir de un estudio de las diferentes soluciones existentes.

El proyecto se realizará acorde con lo establecido en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** citada en el apartado 2.1.2 del presente documento.

La estructura del presente proyecto, de acuerdo con lo establecido en el *Código Técnico de la Edificación* (en adelante CTE) y el Real Decreto 314/2006 contará con los siguientes entregables:

- I. MEMORIA Y ANEXOS DE LA MEMORIA
- II. ANEJO I. PLANOS

## 1.2 OBJETIVOS

Los objetivos del presente proyecto se pueden resumir en la optimización multiobjetivo de los capots, estableciendo como principales criterios:

1. Reducción del coste del capot.
2. Aumento de la resistencia del capot.

A estos objetivos principales, se le pueden añadir otros secundarios, como son:

1. Estudio de las diferentes soluciones existentes en el mercado.
2. Reducción del impacto medioambiental del capot.

### 1.2.1 SOSTENIBILIDAD

Uno de los objetivos del presente proyecto es, como se acaba de definir, reducir el impacto medioambiental de los capots. En ese sentido, el presente proyecto se encuentra alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (en adelante ODS) [2]. En concreto con



los ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) y 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles).

### ***1.3 ESTADO DEL ARTE***

Los sistemas de pretensado y postensado fueron desarrollados en la primera mitad del siglo XX por el ingeniero francés Eugène Freyssinet. Ambas son técnicas para reducir la debilidad del hormigón ante esfuerzos de tracción y se basan en inducir la estructura en un estado previo de compresión durante el montaje, para que así, al estar sometida a esfuerzos de tracción, debido al estado inicial de la estructura, esta se mantenga en un estado de compresión. La diferencia entre ambas radica en el momento de aplicar el esfuerzo: en los sistemas de pretensado se realiza antes del montaje y en los de postensado se realiza una vez montado el elemento estructural. Aunque surgió como solución para estructuras mixtas de hormigón y acero, hoy en día se emplea también en estructuras de acero. Estos sistemas pueden ser a su vez adherentes, si se inyecta en el tendón lechada de hormigón; o no adherentes, si se inyecta cera o grasa para proteger al tendón de la corrosión.

#### **1.3.1 MARCO REGULATORIO**

Según la normativa europea de referencia para sistemas de postensado [3], estos elementos cuentan con una cabeza protectora de acero o plástico en el extremo de los tendones para garantizar su protección frente a la corrosión. Estas cabezas protectoras o capots pueden ser, como se ha indicado anteriormente, elementos de protección permanente, si se montan de forma solidaria al resto del sistema de postensado y no se pueden desmontar sin romperlos; o desmontables, que permiten comprobar el estado de los tendones que protegen. También deben de tener algún agujero para inyectar la lechada de hormigón o la cera en el tendón.

Como la normativa no detalla ningún requerimiento más que deban tener estos capots, cada empresa del sector de la construcción emplea un modelo distinto. Estos modelos deben contar con un Documento de Idoneidad Técnica (DITE) aprobado por la autoridad

correspondiente, donde se detallan las condiciones de trabajo y se exponen los ensayos realizados para cumplir con la normativa técnica en vigor.

### *CONDICIONES DE TRABAJO*

Estos capots están sometidos a las cargas derivadas de la inyección de lechada de hormigón o de cera en función de si se encuentran en una estructura mixta de hormigón y acero o en una estructura de acero. Una vez realizada la inyección de lechada o cera, según corresponda, el capot no vuelve a estar expuesto a ninguna carga, más allá de las acciones puntuales debido a encontrarse al aire libre.

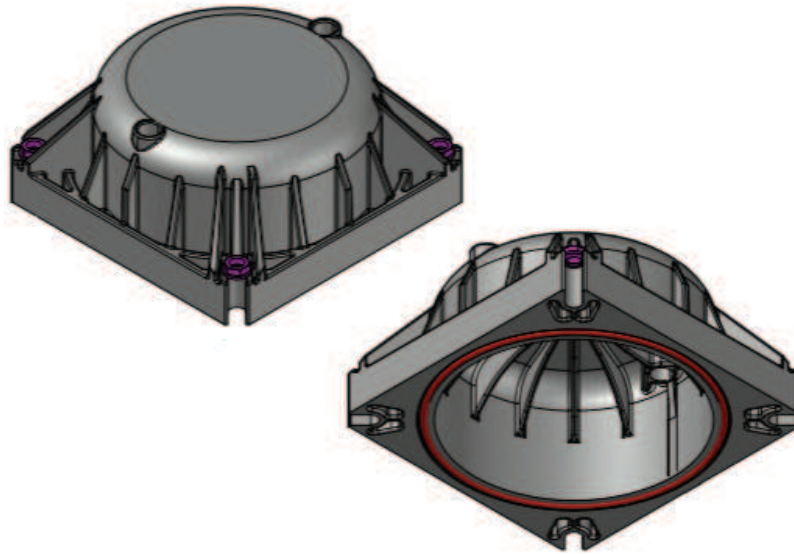
La normativa de referencia establece que se debe garantizar que, durante la inyección de lechada o cera, el capot soporte una presión mínima de 20 bar sin producirse deformación plástica.

Otras dos consideraciones a tener en cuenta es que deben ser estructuras desmontables, para poder comprobar el estado de los anclajes que protegen y que deben garantizar su integridad estructural al ser desmontados y vueltos a montar. La segunda consideración a tener en cuenta es que no deben presentar signos de corrosión a lo largo de su vida útil derivados del ambiente en el que se encuentren.

### 1.3.2 ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES DE CAPOTS ACTUALES

En este apartado se resume el estudio realizado de las diferentes soluciones del mercado. Este estudio se ha dividido en las siguientes fases:

1. En primer lugar, se ha realizado un análisis de las soluciones de capots de protección de elementos pretensados de diferentes empresas del sector.
2. En segundo lugar, se ha realizado un análisis estructural empleando *ANSYS Static Structural* del modelo de capot de la empresa TECPRESA (representado en la Imagen 2). Los resultados de este análisis se pueden encontrar en el apartado 3.1 de esta memoria.



*Imagen 2. Aspecto del capot de TECPRESA.*

#### *ESTUDIO DE LAS SOLUCIONES DEL MERCADO*

Para analizar las soluciones de capots de las principales empresas del mercado, se han consultado los catálogos de productos y las documentaciones técnicas de una serie de empresas especializadas en soluciones pretensadas. Las empresas elegidas han sido: VSL, FREYSSINET y MEKANO 4.

Al consultar las documentaciones técnicas de estas empresas, se ha observado que, al ser el capot una pieza no estructural, no existe documentación técnica específica. Toda la documentación que se puede encontrar en las páginas web de estas empresas se refiere al sistema de pretensado, pero de los capots solo hablan de su uso como elemento protector.

En la Imagen 3 y en la Imagen 4 se pueden observar los diseños de las empresas analizadas. En el caso de FREYSSINET no se ha podido encontrar ninguna foto que mostrara el diseño de los capots que emplean. Cabe destacar la solución eléctricamente aislada de algunos fabricantes, como MEKANO 4, solución que se puede observar en la Imagen 3.



*Imagen 3. Aspecto del capot eléctricamente aislado de MEKANO 4 y parte de su sistema de pretensado. [4]*



*Imagen 4. Aspecto del modelo estándar de capot de VSL con parte del sistema de pretensado. [5]*

Además, se puede observar que los capots de las diferentes empresas tienen diseños muy parecidos, de entre los que destacan simplemente algunas soluciones eléctricamente aisladas para garantizar una mejor protección frente a la corrosión.

La conclusión principal que se puede sacar de este análisis es que, al no ser una pieza con responsabilidad estructural, las soluciones de capots que existen en el mercado son



bastante parecidas unas a otras. Esto unido a la falta de documentación técnica pública sobre el diseño de los capots, hacen que no sea posible hacer un análisis DAFO para comparar el diseño de TECPRESA con el de otros competidores.





## Capítulo 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1 RECURSOS EMPLEADOS

#### 2.1.1 RECURSOS INFORMÁTICOS

En esta sección se resumen los *softwares* de cálculo y bases de datos que se han utilizado en la optimización de los capots, tanto para modelar el problema de optimización, como para resolverlo.

En primer lugar, para modelar los capots se utilizará el software CAD *SolidWorks* de *Dassault Systems*, en su versión 2023, con la licencia educacional de la Universidad. Para los análisis estructurales se utilizará el módulo de cálculos estáticos *Static Structural* de *ANSYS*, en su versión 2023R1, también con la licencia educacional de que dispone la Universidad.

Para modelar las funciones objetivo del problema de optimización se utilizará una hoja de cálculo *Excel* de *Microsoft*, en su versión 2405, con la licencia de estudiante. Para resolver el problema de optimización, se utilizará el software de cómputo numérico *MATLAB*, de *MathWorks*, en su versión R2023a, también con la licencia de la Universidad.

Por último, para obtener los valores de las propiedades de los materiales empleados, así como el precio unitario de estos se utilizará la base de datos del *Nivel 3* del software de materiales *Granta EduPack* de *ANSYS*, en su versión 2023R1, con la licencia educacional de la Universidad.

A modo de resumen, se presentan en la Tabla 1 todos los softwares empleados, con su versión y su tipo de licencia.



Tabla 1. Relación de softwares empleados.

SOFTWARE	VERSIÓN	LICENCIA
<i>Dassault Systems SolidWorks</i>	2023	Educacional
<i>ANSYS Static Structural</i>	2023R1	Educacional
<i>Microsoft Excel</i>	2405	Personal universitaria
<i>MathWorks MATLAB</i>	R2023a	Educacional
<i>ANSYS Granta EduPack</i>	2023R1	Educacional

## 2.1.2 NORMATIVA DE REFERENCIA

La normativa de referencia para la realización del presente proyecto la componen:

- El CTE [6], en concreto, se seguirán los siguientes *Documentos Básicos* (en adelante DB):
  - Documento Básico de Seguridad Estructural (en adelante DB-SE).
  - Documento Básico de Acciones en la Edificación (en adelante DB-SE-AE).
  - Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio (en adelante DB-SI).
- El *Código Estructural*, tanto su articulado, como sus diferentes anejos [7]
- La norma UNE-EN 1537:2015 sobre *Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Anclajes* [8].
- Las diferentes guías y memorias técnicas del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana del Gobierno de España [9].
- Las diferentes Documentos de Idoneidad Técnica del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja del CSIC [10].

- El documento de evaluación europea EAD 160004-00-0301 sobre sistemas de postensado para estructuras pretensadas (conocida como ETAG 013 en España) [3].

## 2.2 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos definidos, la metodología empleada se basa en el planteamiento y resolución del problema de optimización multiobjetivo calculando la solución óptima de Pareto del problema.

### 2.2.1 PLANIFICACIÓN TEMPORAL

Para plantear y resolver el problema, se seguirá la siguiente planificación temporal. En primer lugar, se analizarán los modelos de capots de protección empleados por diferentes empresas del sector de la construcción a nivel internacional. Este estudio tendrá como objetivo comparar los diferentes modelos existentes entre sí, buscando poder realizar un análisis DAFO de la geometría de capot que se ha tomado como base para este proyecto.

En una segunda fase del proyecto, se buscará optimizar el coste y la resistencia de la geometría de capot que se ha tomado como base. Esta fase se puede dividir a su vez en otras dos. En primer lugar, se planteará el problema de optimización. Para ello, se definirán las variables de estudio y se calcularán las funciones objetivo en función de las variables definidas. Esto se realizará con diferentes experimentos empleando *ANSYS Static Structural* en los que se variará una de las propiedades en condiciones *ceteris paribus*.

Una vez definido el problema de optimización, se calculará el frente de Pareto empleando el Método de las Ponderaciones [11]. Este método obtiene los puntos del frente de Pareto al ir asignando diferentes ponderaciones a cada uno de los criterios objetivo del problema. Se ha elegido este método para obtener la solución del problema ya que, aparte de ser el más sencillo, es también un método donde se puede ver la influencia de cada función objetivo en cada punto solución. Con el frente de Pareto calculado y representado, se definirá una resistencia mínima del capot. El punto del frente de Pareto correspondiente a esta resistencia mínima será la solución óptima del problema.



En la tercera fase del proyecto, se realizarán los planos y la documentación final necesaria para poder fabricar los nuevos capots. En paralelo a la realización de la documentación técnica, se realizará un estudio de sostenibilidad de los capots diseñados. Este se basará en la comparativa de las emisiones de la nueva geometría con respecto a la anterior.

### 2.2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN [12]

De forma genérica, el problema de optimización multiobjetivo en función de  $w$  variables se podría formular como:

$$\begin{aligned} \text{opt } f(x, \dots, w) &= (f_1(x, \dots, w), \dots, f_p(x, \dots, w)) \\ x, \dots, w &\in F \end{aligned} \quad (I)$$

Donde  $F$  es la llamada región factible de soluciones al problema de optimización.

#### VARIABLES DE ESTUDIO

Particularizando en el caso del presente proyecto, el primer paso para definir el problema es la definición de las variables de estudio. En el presente problema encontramos dos conjuntos de variables de decisión:

- $\bar{x}_i$  Conjunto de variables continuas del problema
- $\bar{w}_j$  Conjunto de variables discretas del problema

Donde los índices  $i$  y  $j$  hacen referencia a las siguientes propiedades geométricas del modelo de estudio:

$$i = \{\text{espesor lateral, espesor de la base, radio de la cúpula}\}$$

$$j = \{n^\circ \text{ nervios externos, } n^\circ \text{ nervios internos}\}$$

Las propiedades continuas están medidas en metros y pueden variar de la siguiente forma:

$$\text{espesor lateral} \rightarrow [0,002, 0,01]$$

$$\text{espesor base} \rightarrow [0,01, 0,1]$$

$$\text{radio cúpula} \rightarrow [0,3, 3]$$

Mientras que las discretas son adimensionales y pueden tomar los siguientes conjuntos de valores:

$$n^{\circ} \text{ nervios exteriores} \rightarrow [8, 20]$$

$$n^{\circ} \text{ nervios interiores} \rightarrow [4, 20]$$

#### *DEFINICIÓN DE LAS FUNCIONES OBJETIVO*

El problema de optimización tiene dos objetivos o criterios, que se corresponden con los dos Objetivos principales del proyecto: **reducción del coste del capot y aumento de la resistencia del mismo**. Ambas funciones objetivo dependerán de las variables anteriormente definidas.

La primera función objetivo, la del coste del capot, se definirá como el precio por metro cúbico del material, multiplicado por el volumen del capot. Este último depende de las cinco variables definidas, por lo que la función objetivo queda de la siguiente forma:

$$f_1(\bar{x}_i, \bar{w}_j) = \bar{m}_i^l \bar{x}_i + \bar{n}_j^l \bar{w}_j = m_1^l x_1 + m_2^l x_2 + m_3^l x_3 + n_1^l w_1 + n_2^l w_2 \quad (II)$$

Donde los coeficientes  $m$  y  $n$  relacionan cada variable con el coste final del capot y se calcularán como las pendientes del ajuste por regresión lineal entre las variables y el volumen del capot, multiplicadas por el precio por unidad de volumen del material empleado. Las unidades de la función objetivo serán de céntimos de euro, para mantener un orden de magnitud similar al de la función objetivo de resistencia.



En cuanto a la segunda función objetivo, esta cuantificará la resistencia del capot. Para simplificar la presentación de resultados, la resistencia se tomará como el coeficiente de minoración de cargas, calculado como el cociente entre la tensión máxima de von Mises del capot y el límite elástico del material. Esta estará definida en función de las variables definidas de la siguiente forma:

$$f_{II}(\bar{x}_i, \bar{w}_j) = \bar{m}_i^{II} \bar{x}_i + \bar{n}_j^{II} \bar{w}_j = m_1^{II} x_1 + m_2^{II} x_2 + m_3^{II} x_3 + n_1^{II} w_1 + n_2^{II} w_2 \quad (III)$$

Donde los coeficientes m y n en este caso son las pendientes del ajuste por regresión lineal entre la tensión máxima de von Mises y cada variable, divididas por el límite elástico.

#### *RESTRICCIONES DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN*

El problema de optimización está sujeto a las siguientes restricciones:

En primer lugar, solo se considerarán puntos de la región factible aquellos con un valor positivo de ambas funciones objetivo. Esto se debe a que, al representar la primera función objetivo el coste y la segunda la resistencia, solo tienen sentido físico en ambos casos los valores positivos.

Por otro lado, una vez resuelto el problema de optimización, se añadirá una restricción adicional referente al valor máximo de la función objetivo de resistencia, esto es, al máximo coeficiente de minoración de cargas admisible para este problema.

Teniendo en cuenta estas restricciones, se obtiene la región factible de los puntos solución del problema de optimización.

#### *RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN*

Finalmente, para resolver el problema de optimización, como se ha indicado anteriormente, se calculará el conjunto eficiente o de Pareto, también llamado frontera de Pareto. Este se define matemáticamente como [12]:

$$\varepsilon = \left\{ x \in F : \nexists x' \in \frac{F}{z_k(x')} \geq z_k(x) \forall k \text{ y } z_t(x') > z_t(x) \text{ para al menos un } t \in \{1, \dots, p\} \right\} \quad (IV)$$

Cualitativamente se define como aquel conjunto de soluciones en las que no es posible mejorar uno de los criterios de decisión sin empeorar el otro.

Para generar el conjunto eficiente de soluciones y representar el frente de Pareto en el problema de optimización del presente proyecto, se empleará el Método de las Ponderaciones. Este método consiste en multiplicar cada función objetivo por un peso no negativo y agregarlos en una función única. Al variar el valor de los pesos, se obtiene todo el conjunto eficiente.

### 2.2.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para obtener los datos necesarios para realizar los ajustes por regresión lineal entre cada una de las variables y las funciones objetivo, es necesario realizar una serie de experimentos. En cada experimento se variará el valor de una de las propiedades manteniendo las otras igual. Para poder realizar el ajuste por regresión lineal, se tomarán tres puntos de diseño en cada experimento. La Tabla 2 resume los diferentes experimentos a realizar, así como las variaciones que se harán en cada uno.

*Tabla 2. Relación de experimentos a realizar para obtener los ajustes por regresión lineal.*

<b>EXPERIMENTO</b>	<b>CASO</b>	<b>VALORES NUMÉRICOS</b>
I. ESPESOR DE LA PARED	Base	5 mm
	Variación 1	3 mm
	Variación 2	2 mm
II. ESPESOR DE LA BASE	Base	46 mm
	Variación 1	20 mm
	Variación 2	72 mm
III. RADIO DE LA CÚPULA	Base	670,2 mm
	Variación 1	1000 mm
	Variación 2	400 mm
IV. N.º DE NERVIOS EXTERIORES	Base	20



	Variación 1	8
	Variación 2	12
V. N.º DE NERVIOS INTERIORES	Base	16
	Variación 1	4
	Variación 2	8

#### 2.2.4 DEFINICIÓN DEL MODELO DE ESTUDIO

Los experimentos definidos se realizarán, como se ha indicado anteriormente en *ANSYS Static Structural* empleando un modelo de capot. Para realizar este modelo, se ha tenido acceso a la documentación técnica de una de las empresas líderes en el sector de la construcción en España e internacionalmente. El modelo empleado en el estudio es un modelo 3D, realizado con *SolidWorks*. En la Imagen 5 se puede ver el aspecto del modelo.

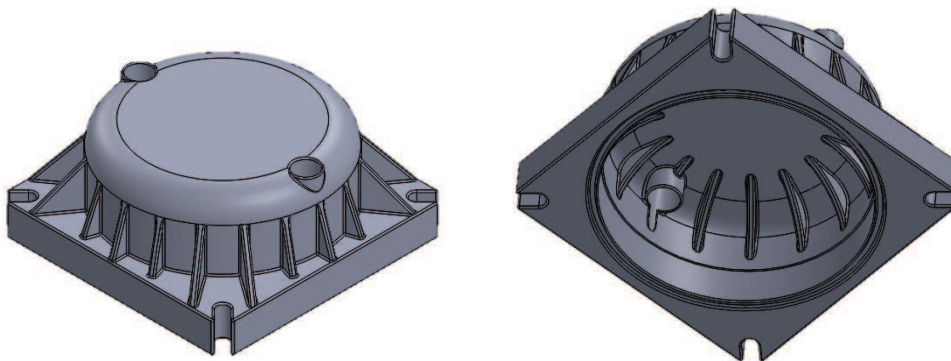


Imagen 5. Aspecto del exterior y del interior del modelo 3D del capot empleado para los experimentos.

Como se puede observar, la geometría del capot está compuesta por dos cuerpos extruidos, uno rectangular que hace de base y otro cilíndrico cerrado por arriba por una cúpula curva en el interior, pero plana en el exterior, y una serie de nervios o refuerzos internos y externos. También presenta cuatro agujeros en las esquinas de la base para atornillar el capot al resto del sistema de pretensado, y otros dos en la cúpula superior, uno de ellos para realizar el inyectado de la lechada de hormigón y el otro para asegurar la salida del aire del interior del capot y del tendón de acero.



### *HIPÓTESIS ASUMIDAS*

Para realizar los análisis estáticos de los experimentos, se han asumido las siguientes hipótesis. En primer lugar, dada la simetría que presenta el problema, se ha decidido simular simplemente  $\frac{1}{4}$  de la pieza, para reducir el coste computacional. Se ha sometido a la pieza a una presión uniforme de 10 bares en todas las superficies interiores. Para fijar la pieza, se han restringido los desplazamientos en los tres ejes en los agujeros para los tornillos. Finalmente, el material empleado es poliamida-6 con un refuerzo del 30% de fibras de vidrio.

Otra hipótesis asumida ha sido la eliminación de las roscas de los agujeros de los tornillos de anclaje. Esto se debe a que los filetes de la rosca son posibles zonas de concentración de tensiones, por lo que, a priori, se puede tratar de la zona más débil del capot. También se ha supuesto que, cambiando los tornillos por espárragos roscados solo en la punta, con la presión ejercida por la cabeza de estos y la arandela que se coloca para asegurar el apriete, el capot queda lo suficientemente fijo a la estructura a la que va unido, sin ser necesario el roscado de estos agujeros.

Por último, estas simulaciones se han realizado suponiendo que se mantiene el material del que están fabricados actualmente los capots: poliamida-6 con un refuerzo del 30% de fibras de vidrio. Si bien es cierto que se abordará el cambio de material más adelante, el problema de optimización se va a plantear y resolver suponiendo que no se va a realizar ningún cambio de material, ya que este añadiría nuevos términos a la función objetivo de costes, asociados a los cambios del proceso de fabricación.

### *MALLADO DEL MODELO DE CAPOT*

Para mallar el modelo del capot, se ha elegido una malla por defecto en la que se cambiará solamente el tamaño máximo de elementos y, en caso de ser necesario, se refinará en ciertas zonas.

Para determinar el tamaño máximo de elemento se ha realizado un análisis de sensibilidad de malla. En este, se ha simulado la pieza con diferentes tamaños máximos de elementos decrecientes hasta encontrar un tamaño donde el compromiso entre precisión y



coste computacional se considere adecuado. Los resultados del análisis de sensibilidad se pueden observar en la Gráfico 1.

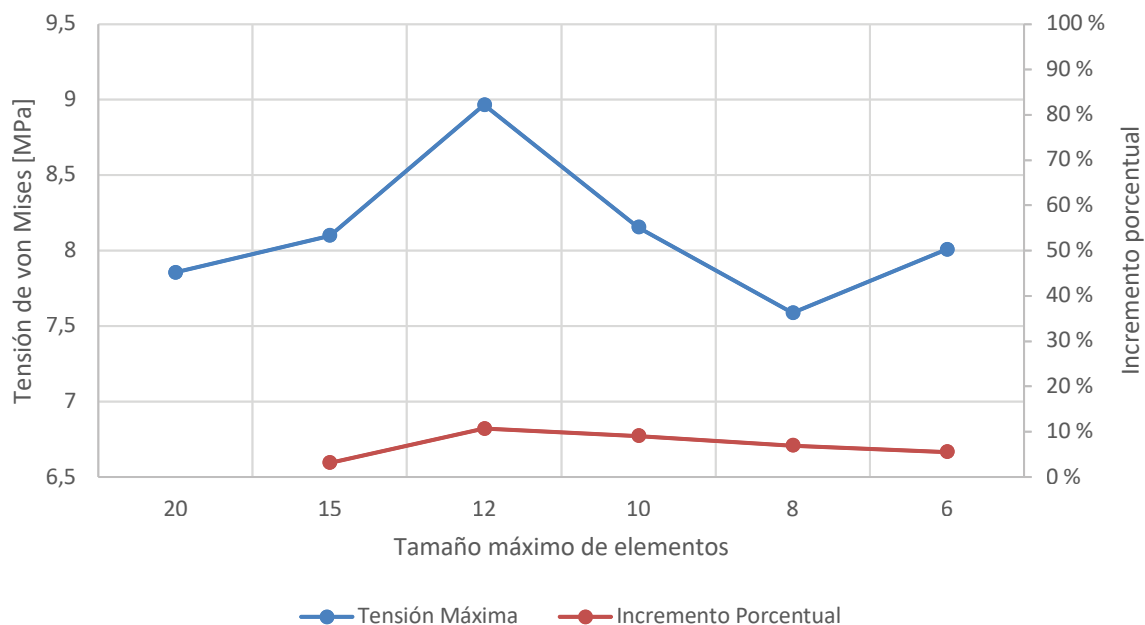


Gráfico 1. Resultados del análisis de sensibilidad en función del tamaño máximo de los elementos de la malla.

A la vista de los resultados del análisis de sensibilidad de malla, se decide optar por una malla con un tamaño máximo de elementos de 6 mm.

Una vez definido el tamaño máximo de malla, se realiza un primer análisis de los resultados obtenidos, con el objetivo de identificar posibles zonas de concentración de tensiones donde se debería refinar la malla. Como se puede observar en la Imagen 6, es necesario refinar la malla en la zona de los agujeros de los tornillos para capturar bien los efectos de concentración de tensiones.

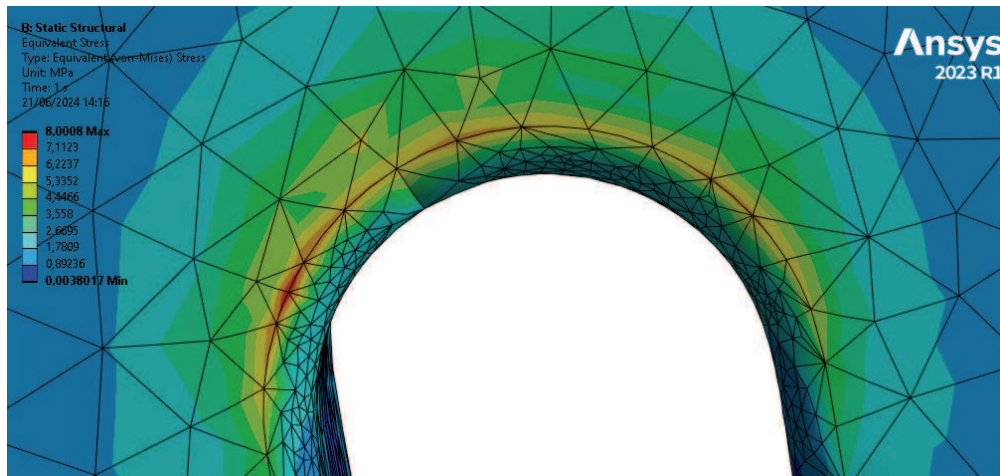


Imagen 6. Detalle de la zona donde se dan los fenómenos de concentración de tensiones.

Para refinar la malla, se ha decidido incluir un *face meshing* en las zonas de los redondeos de los bordes de los agujeros. Para ello, se ha incluido una división en elementos de 1 mm en las aristas que delimitan estos redondeos. También se han incluido divisiones en elementos de 3 mm en las aristas que delimitan la cara superior de la región donde se encuentran estos agujeros.

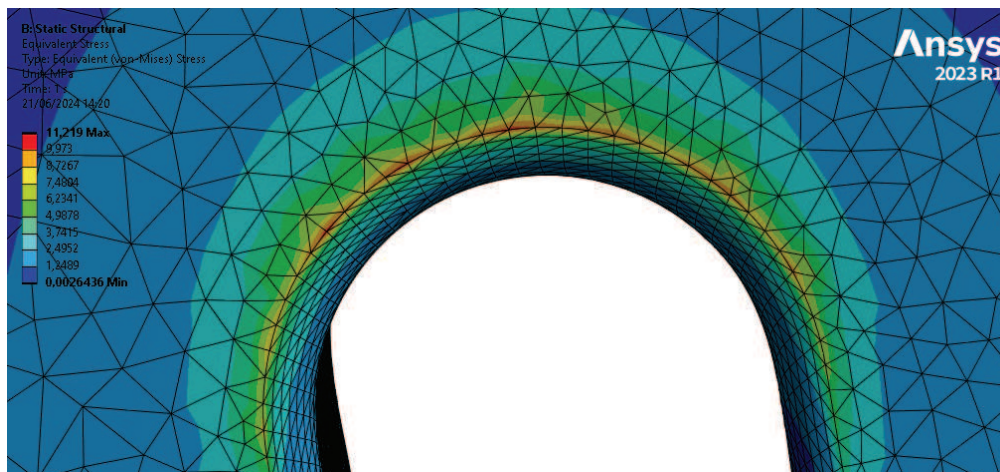


Imagen 7. Detalle de la zona de concentración de tensiones con la malla refinada.

Al realizar este refinado de la malla, el nuevo aspecto de la zona de concentración de tensiones es el de la Imagen 7, donde se observa con mayor detalle este fenómeno.

Por último, para medir la calidad de la malla, se ha utilizado la métrica de Calidad de Elemento. Esta métrica mide el cociente entre el volumen del elemento y la suma del



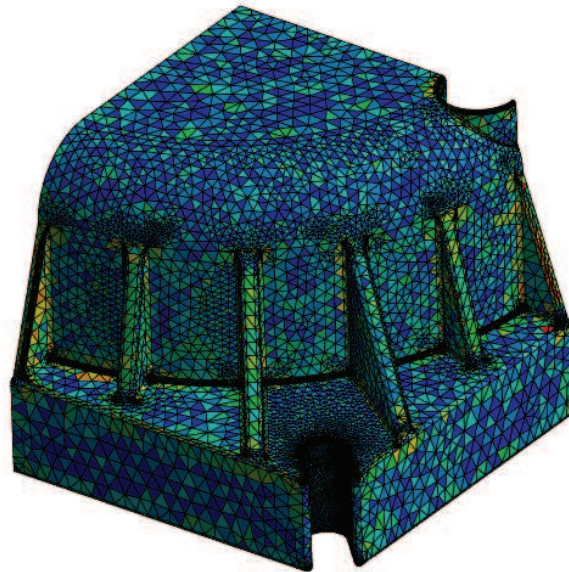
cuadrado de las longitudes de los bordes para elementos 2D o el cociente entre el volumen del elemento y la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de las longitudes de los bordes para elementos 3D. Un valor de 1 indica un elemento perfecto, mientras que un valor de 0 indica un elemento con volumen negativo. Utilizando esta métrica para medir la calidad de la malla, esta es de mayor calidad cuanto más cerca se encuentren los valores máximo y mínimo de calidad de elemento y cuanto mayor sea el valor máximo. [13]

En la Imagen 8 se pueden observar los valores máximo y mínimo, así como la localización de los elementos de peor calidad. Aunque la diferencia entre los valores máximo y mínimo sea notable, los elementos de peor calidad se encuentran muy localizados en zonas donde, en principio, no se esperan efectos de concentración de tensiones u otras singularidades y no son abundantes. Por ello, se puede considerar que la malla tiene calidad suficiente para el análisis que se pretende realizar.

Este es el modelo de capot que se utilizará en los diferentes experimentos definidos, realizándole las variaciones geométricas recogidas en la Tabla 2.

**Mesh**  
Element Quality  
21/06/2024 14:39

0,99996 Max
0,88977
0,77958
0,66939
0,55921
0,44902
0,33883
0,22864
0,11845
0,008258 Min



**Mesh**  
Element Quality  
21/06/2024 14:39

0,99996 Max
0,88977
0,77958
0,66939
0,55921
0,44902
0,33883
0,22864
0,11845
0,008258 Min



*Imagen 8. Representación de la malla con los valores de calidad de elemento.*



## Capítulo 3. RESULTADOS

### 3.1 ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA BASE

En este apartado se recoge un breve análisis de la geometría de capot que se ha tomado como base en el presente proyecto.

En el análisis realizado empleando la malla definida en el apartado 2.2.4 se han calculado la tensión equivalente de von Mises y los desplazamientos en toda la geometría. Los resultados obtenidos se muestran en la Imagen 9 y en la Imagen 10.

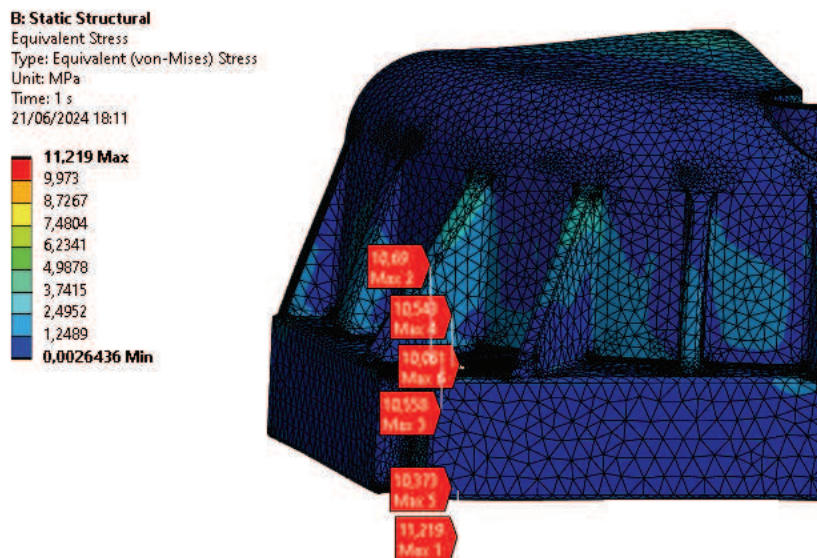


Imagen 9. Distribución de la tensión equivalente de von Mises con anotaciones de los valores máximos.

Se observa en la Imagen 9 como los mayores valores de tensión se dan en las zonas que quedan fijadas por los tornillos. Si se compara este valor con el límite elástico del material empleado (Poliamida 6 con un 30% de Fibras de Vidrio), que según *Granta EduPack* es de 111 MPa, se obtiene un coeficiente de seguridad de 9,89 o un coeficiente de minoración de 0,101 (uno es el inverso del otro).

En la Imagen 10 se observa que el mayor desplazamiento se da en el centro de la cúpula, siendo de 0,206 mm.

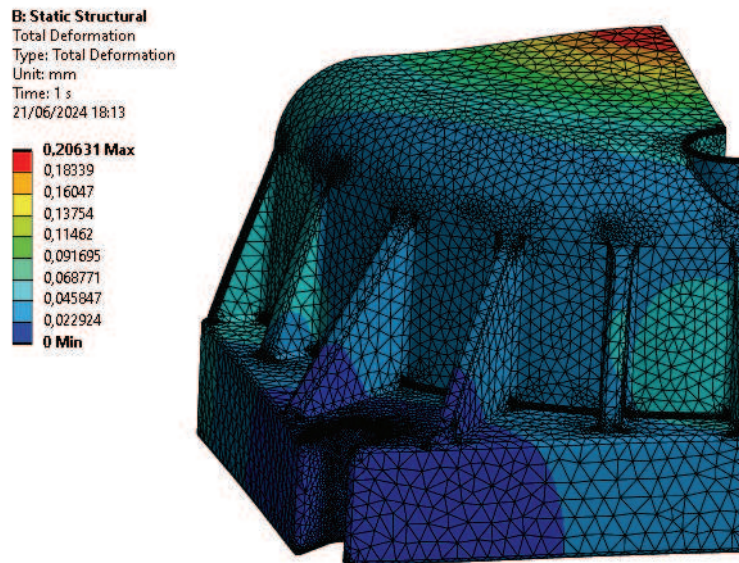


Imagen 10. Distribución de desplazamientos en la geometría simulada.

### 3.2 RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS

A continuación, se recogen los resultados de los cinco experimentos realizados para obtener el ajuste por regresión lineal entre cada una de las variables de decisión y las funciones objetivo.

En cada uno de los experimentos, se ha simulado en *ANSYS Static Structural* la geometría modificada utilizando la malla definida en el apartado 2.2.4 para calcular el valor de tensión máxima de von Mises. Con estos valores, se ha realizado el ajuste por regresión entre cada variable y la función objetivo de resistencia. En el caso de la función objetivo de coste, se ha calculado en *SolidWorks* el volumen total del capot.

En cada una de las siguientes cinco secciones, se presentan las gráficas con las que se ha realizado el ajuste por regresión.



### 3.2.1 EXPERIMENTO I: ESPESOR DE LA PARED

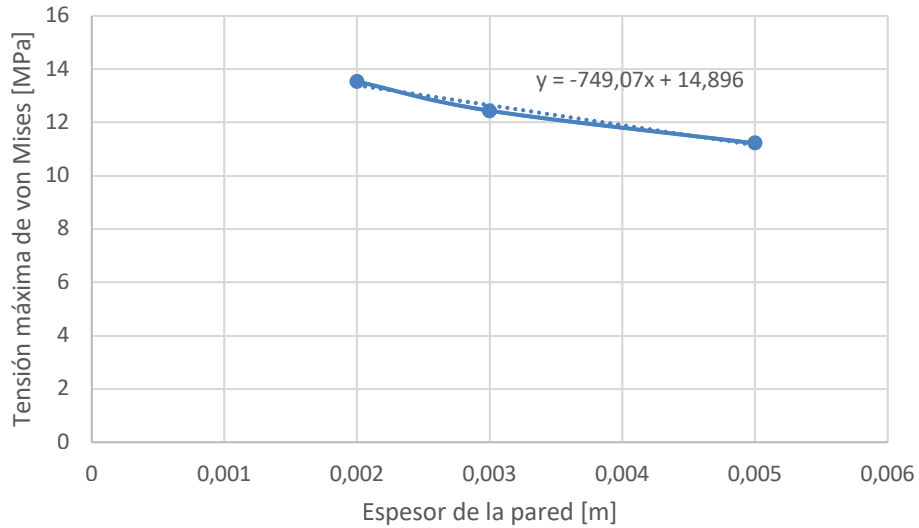


Gráfico 2. Valores de la tensión máxima de von Mises en función del espesor de la pared. Se ha representado también el ajuste por regresión lineal.

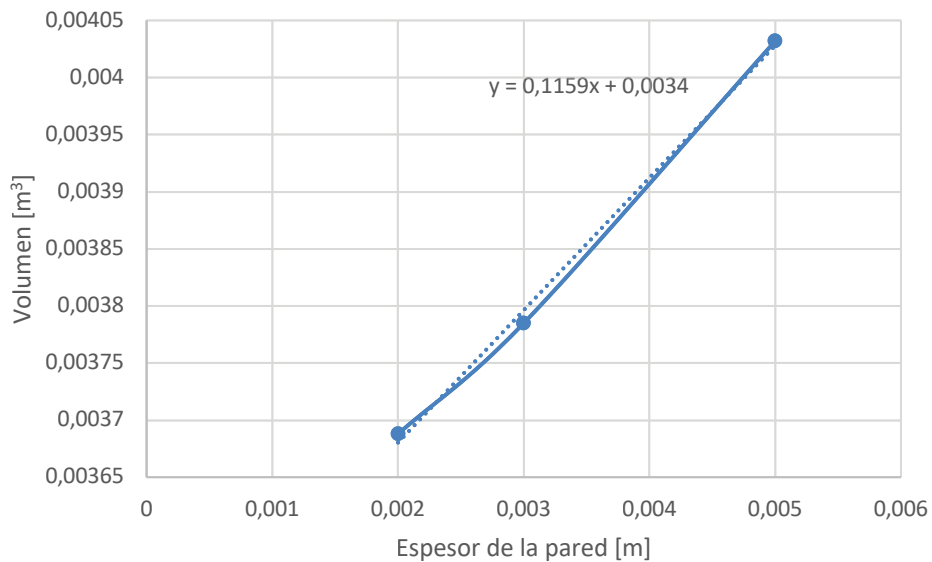


Gráfico 3. Valores del volumen del capot en función del espesor de la pared. Se ha representado también el ajuste por regresión lineal.



## 3.2.2 EXPERIMENTO II: ESPESOR DE LA BASE

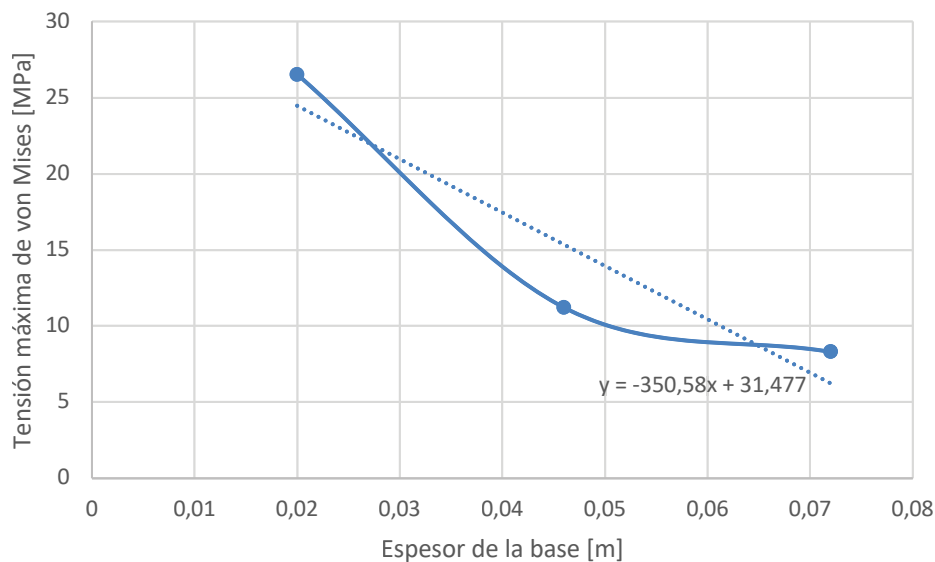


Gráfico 4. Valores de la tensión máxima de von Mises en función del espesor de la base. Se ha representado también el ajuste por regresión lineal.

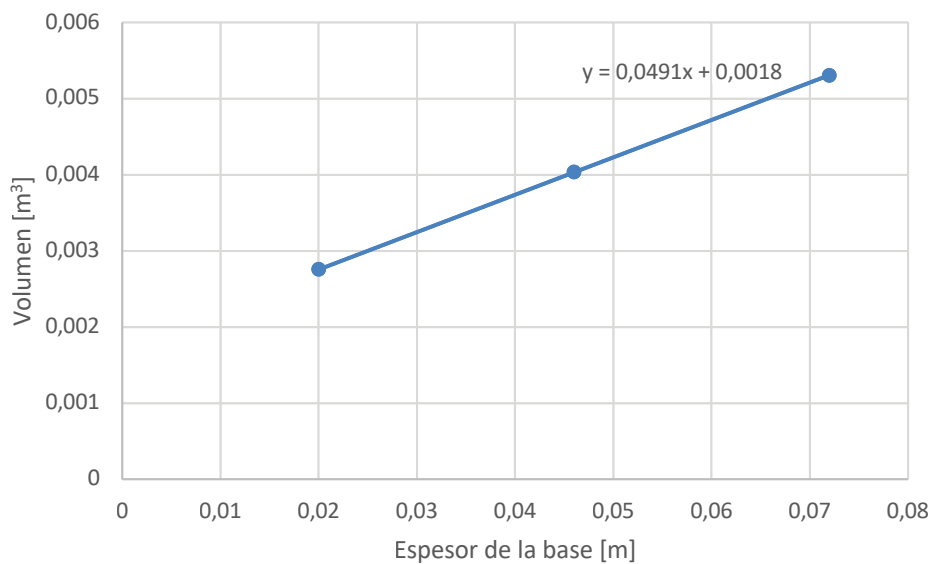


Gráfico 5. Valores del volumen del capot en función del espesor de la base. Se ha representado también el ajuste por regresión lineal.

### 3.2.3 EXPERIMENTO III: RADIO DE LA CÚPULA

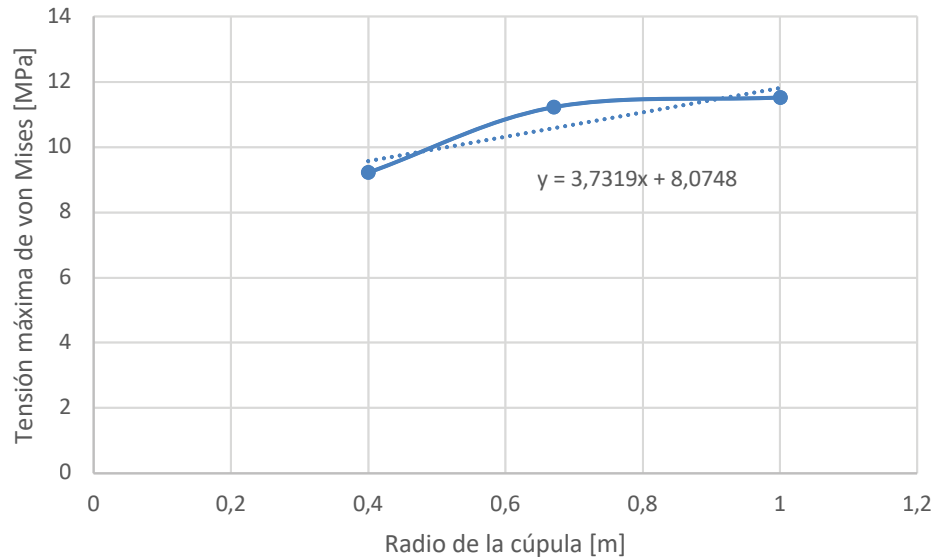


Gráfico 6. Valores de la tensión máxima de von Mises en función del radio de la cúpula. Se ha representado también el ajuste por regresión lineal.

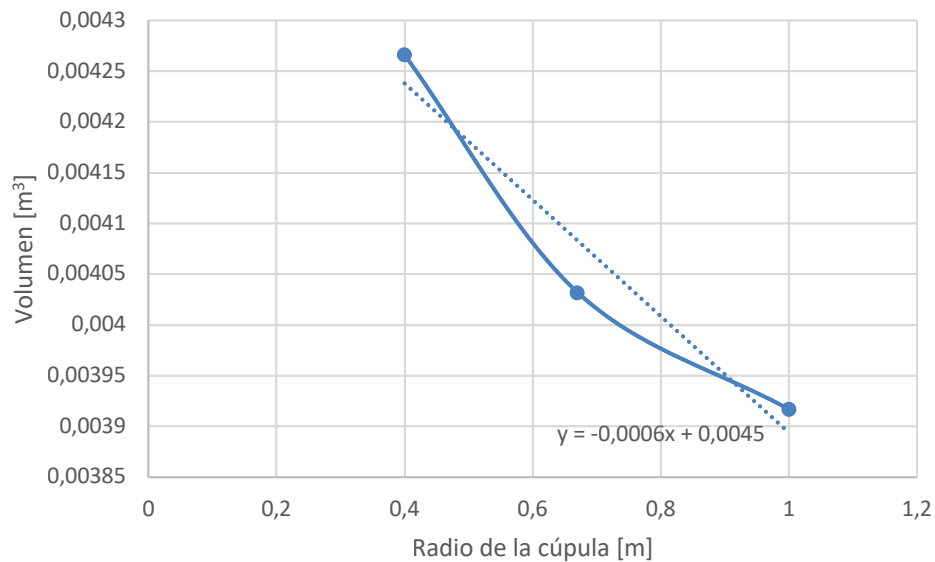


Gráfico 7. Valores del volumen del capot en función del radio de la cúpula. Se ha representado también el ajuste por regresión lineal.



### 3.2.4 EXPERIMENTO IV: NÚMERO DE NERVIOS EXTERNOS

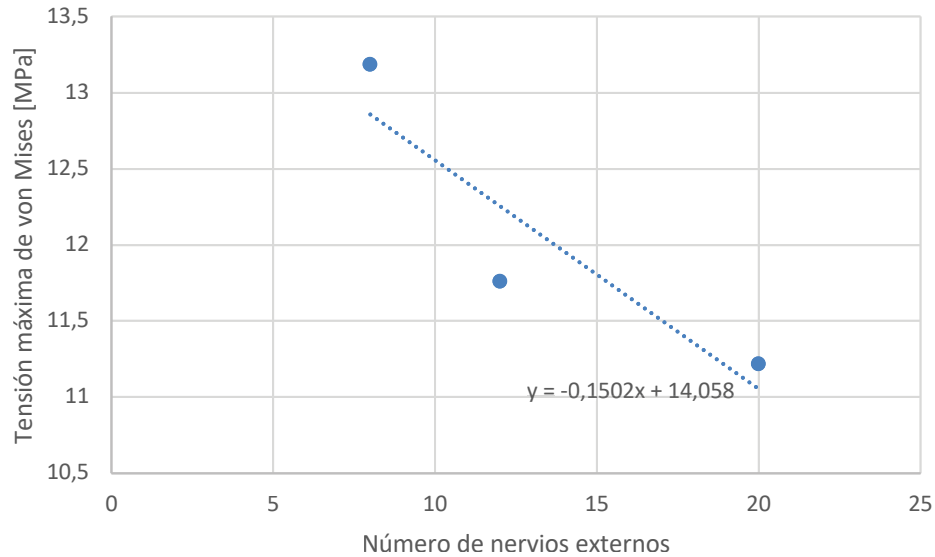


Gráfico 8. Valores de la tensión máxima de von Mises en función del número de nervios interiores. Se ha representado también el ajuste por regresión lineal.

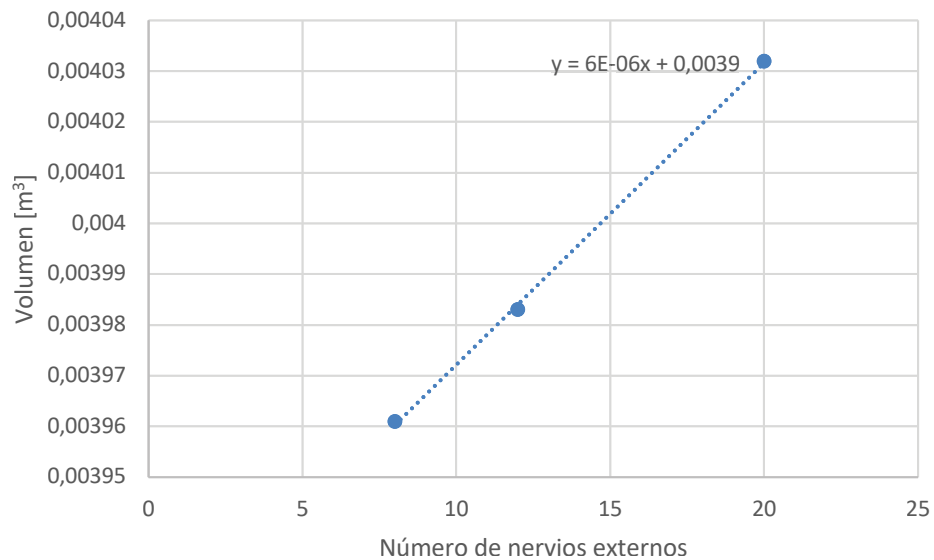


Gráfico 9. Valores del volumen del capot en función del número de nervios interiores. Se ha representado también el ajuste por regresión lineal.

## 3.2.5 EXPERIMENTO V: NÚMERO DE NERVIOS INTERIORES

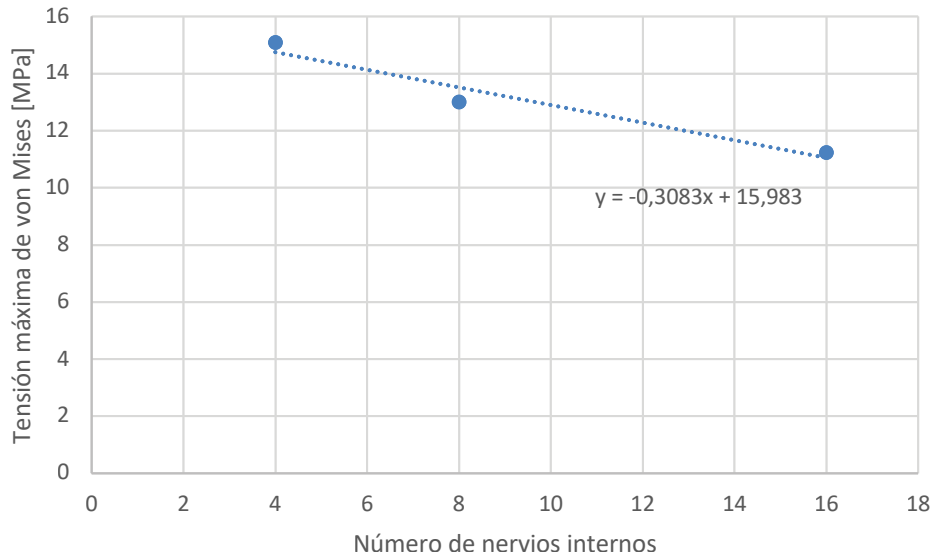


Gráfico 10. Valores de la tensión máxima de von Mises en función del número de nervios exteriores. Se ha representado también el ajuste por regresión lineal.

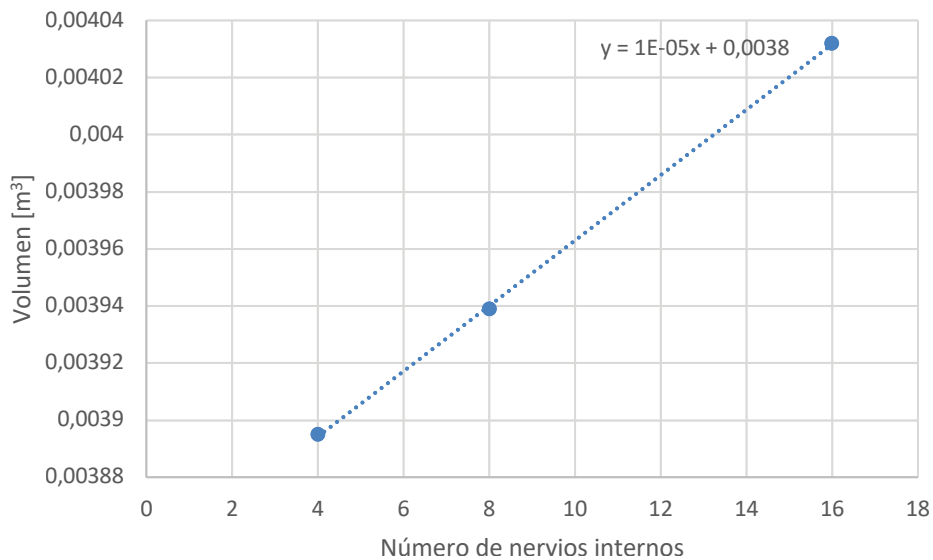


Gráfico 11. Valores del volumen del capot en función del número de nervios exteriores. Se ha representado también el ajuste por regresión lineal.



### 3.2.6 CÁLCULO DE LAS FUNCIONES OBJETIVO

Con las pendientes calculadas en los ajustes de regresión del apartado anterior se pueden escribir las funciones objetivo de coste y resistencia del problema de optimización, multiplicando por las constantes correspondientes en cada caso. En la Tabla 3 se resumen los valores de las pendientes calculadas en cada experimento.

Tabla 3. Resumen de las pendientes calculadas en los ajustes por regresión de resistencia y volumen en cada experimento.

EXPERIMENTO	PENDIENTE DEL AJUSTE DE RESISTENCIA	PENDIENTE DEL AJUSTE DE VOLUMEN
I. ESPESOR DE LA PARED	-749,07	0,1159
II. ESPESOR DE LA BASE	-350,58	0,0491
III. RADIO DE LA CÚPULA	3,7319	-0,0006
IV. N.º DE NERVIOS EXTERIORES	-0,1502	$6 \cdot 10^{-6}$
V. N.º DE NERVIOS INTERIORES	-0,3083	$1 \cdot 10^{-5}$

#### FUNCIÓN OBJETIVO DE COSTE

El precio medio por unidad de volumen de la Poliamida 6 con un refuerzo del 30% de Fibras de Vidrio según *Granta EduPack* es de 5.700 €/m<sup>3</sup>. Multiplicando este precio por cada uno de los valores de las pendientes del ajuste de regresión y realizando el cambio a céntimos de euro se obtiene la siguiente función objetivo de coste:

$$f_1(\bar{x}_i, \bar{w}_j) = 6,6063x_1 + 2,7987x_2 - 0,0342x_3 + 3,42 \cdot 10^{-4}w_1 + 5,7 \cdot 10^{-4}w_2 \quad (V)$$

### *FUNCIÓN OBJETIVO DE RESISTENCIA*

En el caso de la función objetivo de resistencia, los coeficientes que acompañan a cada variable son los valores inversos de las pendientes obtenidas en el ajuste por regresión del apartado anterior entre el límite elástico del material, de 111 MPa. Esto se debe a que los ajustes por regresión lineal se han realizado con el valor de la tensión máxima de von Mises, mientras que en la función objetivo se representa la resistencia del capot, que, al aumentar, hace que la tensión máxima a la que está sometido el capot disminuya. Como se detalla en el apartado 3.1, se obtiene la función objetivo de resistencia:

$$f_{II}(\bar{x}_i, \bar{w}_j) = 6,748x_1 + 3,158x_2 - 0,336x_3 + 1,35 \cdot 10^{-3}w_1 + 2,78 \cdot 10^{-3}w_2 \quad (VI)$$

Esta función objetivo, como se ha indicado anteriormente es adimensional, ya que representa el coeficiente de minoración de la carga.

### **3.3 SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN**

Para resolver el problema de optimización y representar el frente de Pareto, se ha empleado el código de *MATLAB*, este se puede consultar en el Anexo I. Código de Matlab. El frente obtenido se puede observar en el Gráfico 12.

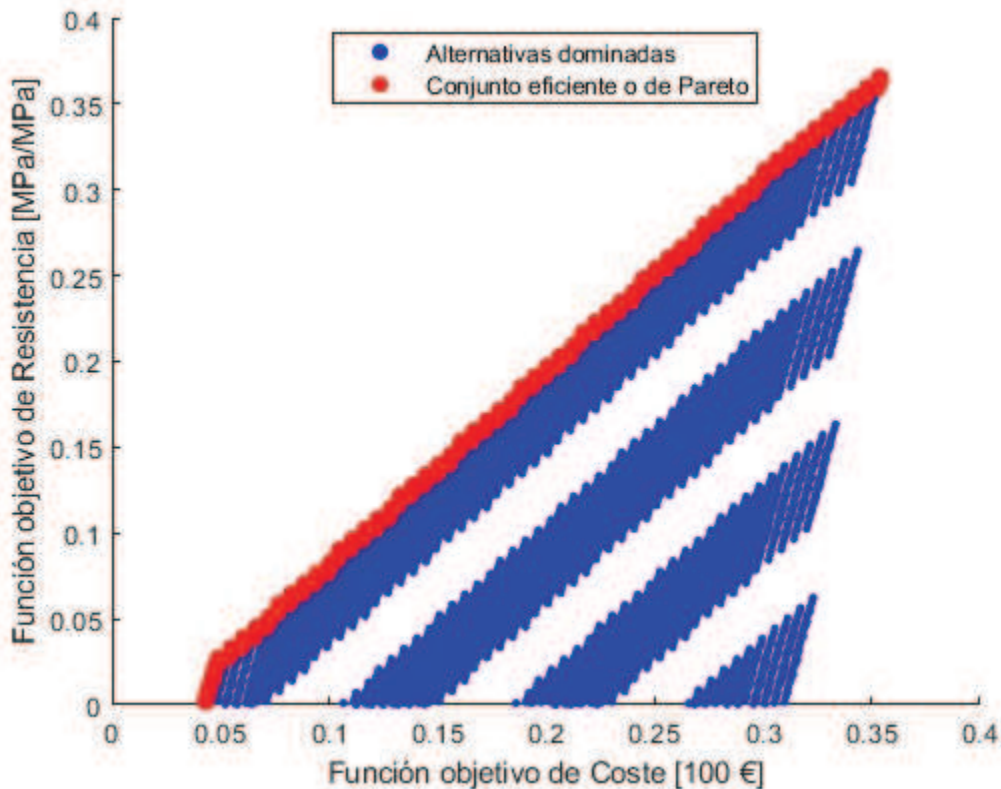


Gráfico 12. Conjunto de soluciones dominadas y frente de Pareto.

En él se puede apreciar cómo el frente de Pareto es el conjunto de soluciones dentro de las posibles, en las que no es posible minimizar el coste sin reducir la resistencia, ni maximizar esta última sin aumentar el coste. Es por ello que cada punto es el máximo valor de resistencia para un coste dado o el mínimo valor de coste para una resistencia dada.

Una vez obtenido el frente de Pareto, para determinar la solución al problema de optimización a implementar en el diseño optimizado del capot, se determinará un coeficiente de minoración de cargas mínimo. El punto del conjunto eficiente con ese valor de la función objetivo de resistencia será el punto óptimo elegido y los valores que tomen las variables en dicho punto serán los valores de los parámetros geométricos del capot.



## Capítulo 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 ESTUDIO DE CAMBIO DE MATERIAL

Como parte de la optimización del diseño del capot, se ha realizado un estudio del material empleado en su fabricación, con el objetivo de buscar soluciones más baratas y de mayor resistencia. Para realizar el estudio se utilizará el software *Granta EduPack* de ANSYS.

#### 4.1.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Actualmente, los capots se fabrican por un proceso de inyección de plástico empleando un material compuesto de matriz de poliamida-6 (PA-6) y un refuerzo del 30% en volumen de fibra de vidrio (FV).

Para estudiar el posible cambio de material, se van a realizar dos estudios: un primer estudio en el que se analizará el posible cambio de material a otro de la misma naturaleza, es decir, material compuesto de matriz polimérica. En el segundo estudio se analizará la posibilidad de cambiar el material por uno de la misma naturaleza o por un acero inoxidable o aluminio. Se han elegido estas familias de materiales debido a su alta resistencia tanto mecánica, como a la corrosión, algo que deben de tener los capots, al ser elementos que se encuentran a la intemperie.

#### 4.1.2 ESTUDIO 1: MATERIALES DE LA MISMA FAMILIA

Para realizar el estudio de posibles soluciones alternativas dentro de la misma familia de materiales, se tendrán en cuenta las siguientes restricciones:

- El proceso de fabricación debe de ser inyección en molde o fabricación aditiva, para que no sea necesario una inversión extra en la fabricación.
- El material empleado en la matriz debe de ser de la familia de los polímeros, evitando los elastómeros
- El precio unitario por volumen debe de ser igual o inferior al de la solución actual

A continuación, siguiendo la lógica del programa, se van a realizar cuatro etapas. En la primera etapa, se impondrá la restricción del proceso de fabricación elegido a todos los materiales de la base de datos del nivel 3 de *Granta EduPack*, por lo que solo se seleccionarán aquellos materiales que se puedan fabricar por inyección en molde o fabricación aditiva. En la segunda etapa se impone la restricción de que el material debe ser termoplástico no elastómero o termoestable. En la tercera etapa se impone la restricción de que el precio por unidad de volumen debe de ser menor o igual que el del material actual. La última etapa la constituye el Gráfico 13, donde se representa la resistencia, cuantificada como el límite elástico del material, frente al precio por unidad de volumen.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

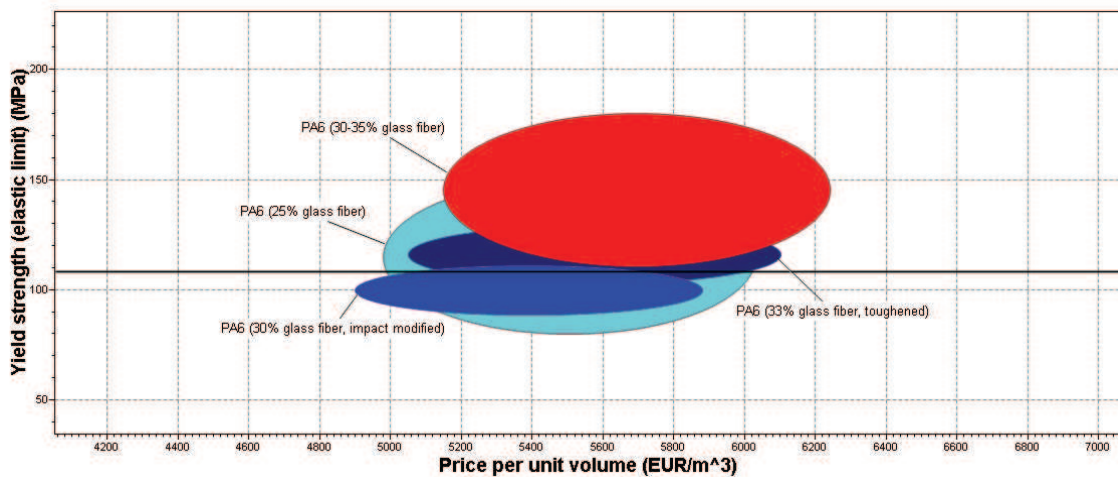


Gráfico 13. Límite elástico vs precio por unidad de volumen de los materiales que han pasado las tres primeras etapas del estudio 1. Se observan el material base en rojo y el resto en una escala de azules.

En el Gráfico 13 se ha incluido una recta para marcar el límite inferior del intervalo del límite elástico del material empleado actualmente (marcado en rojo). Se observa que ninguno de los materiales que cumplen con las restricciones de las etapas anteriores, tiene un mayor límite elástico que el material empleado actualmente.

### CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

Al realizar este primer estudio, se observa que los materiales que cumplen todos los requisitos del análisis tienen un precio parecido y un límite elástico del mismo orden de magnitud que el material empleado actualmente. Además, observando los materiales que se

han obtenido en el estudio, se puede ver que son el mismo material con porcentajes diferentes de FV.

Para poder hacer un análisis cualitativo, se van a calcular los incrementos de resistencia y coste. Estos se recogen en la Tabla 4.

*Tabla 4. Incrementos de coste y resistencia de los materiales resultado del primer estudio con respecto al empleado actualmente.*

<b>MATERIAL</b>	<b>INCREMENTO DE COSTE</b>	<b>INCREMENTO DE RESISTENCIA</b>
PA-6 + 25% FV	-3,42 %	-0,9 %
PA-6 + 30% FV <i>Impact modified</i>	-5,44 %	-10,05 %
PA-6 + 33% FV Endurecido	<b>-2,19 %</b>	<b>4,5 %</b>

Como se puede observar en la Tabla 4, el único material que mejora las propiedades del actual, es decir, que reduce su coste y aumenta su resistencia, es la PA-6 con un refuerzo del 33% de FV y un tratamiento de endurecimiento.

#### 4.1.3 ESTUDIO 2: POLÍMEROS Y ALEACIONES METÁLICAS

En el caso del estudio de posibles soluciones alternativas de metales, se tendrán en cuenta las siguientes restricciones:

- Se mantendrá el proceso de fabricación de inyección en molde o fabricación aditiva.
- El material empleado en la matriz debe de ser de las familias de los polímeros no elastoméricos, aleaciones de aluminio y aceros inoxidables.
- El precio unitario por volumen debe de ser igual o inferior a 8 veces el de la solución actual.
- Las aleaciones metálicas estudiadas deben de ser no magnéticas.

En este segundo estudio se van a realizar las mismas cinco etapas que en el caso anterior. En la primera etapa, se impondrá la restricción del proceso de fabricación elegido

a todos los materiales de la base de datos del nivel 3 de *Granta EduPack*. En la segunda etapa se impone la restricción de que el material debe ser termoplástico no elastómero, termoestable, aleación de aluminio o acero inoxidable. En la tercera etapa se impone la restricción de que el precio por unidad de volumen debe de ser menor o igual que 8 veces el del material actual y que el material debe de ser no magnético. Las dos últimas etapas son las gráficas representadas en el Gráfico 14 donde, al igual que en el estudio anterior, se representa la resistencia, cuantificada como el límite elástico del material, frente al precio por unidad de volumen.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

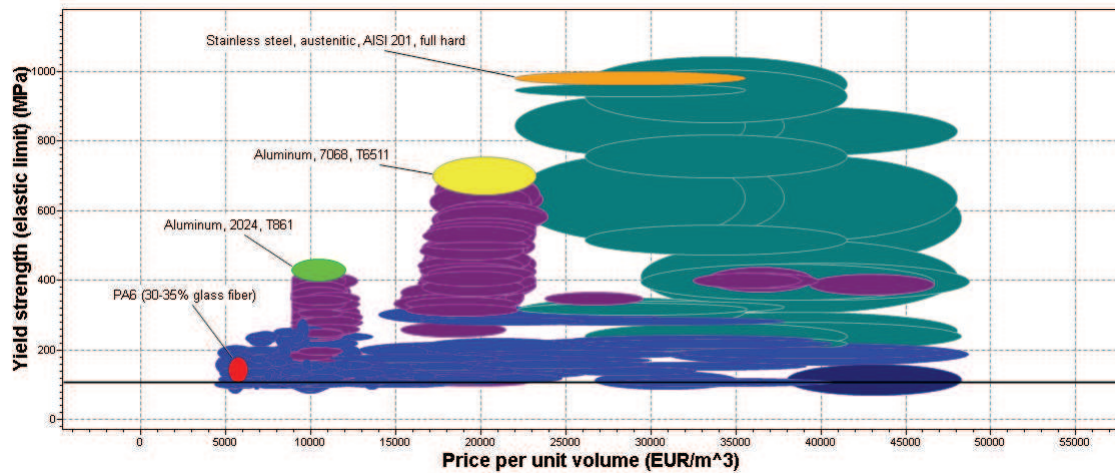


Gráfico 14. Límite elástico vs precio por unidad de volumen de los materiales que han pasado las tres primeras etapas del estudio 2. Se observan el material base en rojo, la familia de aceros inoxidables en color verde aqua, la de los materiales compuestos de matriz polimérica de color azul y la de las aleaciones de aluminio en morado.

En el Gráfico 14 se ha incluido la misma recta que en el estudio anterior para marcar el límite inferior del intervalo del límite elástico del material empleado actualmente (marcado en rojo).

Se han marcado en colores diferentes los tres materiales que se han considerado candidatos para sustituir al material empleado actualmente. Se trata de:



- Acero inoxidable AISI 201, acero inoxidable austenítico aleado con cromo, manganeso y níquel tratado con un recocido. Habitualmente empleado en aplicaciones de gran responsabilidad en ambientes corrosivos, como plantas nucleares, barcos, plataformas petrolíferas...
- Aluminio 7068 T6511, aleación de aluminio, zinc, magnesio, cobre y zirconio, tratado térmicamente y envejecido. Habitualmente empleado en aplicaciones aeroespaciales y de automoción.
- Aluminio 2024 T861, aleación de aluminio, cobre, magnesio y manganeso, tratado térmicamente, envejecido y trabajado en frío. Habitualmente se emplea en aplicaciones estructurales de alta resistencia.

Se han elegido estos materiales ya que son, dentro de sus familias, los que presentan un mayor límite elástico teniendo un precio no muy alejado, dentro del estudio, del precio del material empleado actualmente.

#### *CONCLUSIONES DEL ESTUDIO*

Para comparar los materiales entre sí, se van a calcular los incrementos en coste y límite elástico de cada material con respecto al material utilizado actualmente.

*Tabla 5. Incrementos de coste y resistencia, así como valor del cociente entre ambos incrementos de los materiales resultado del segundo estudio con respecto al empleado actualmente.*

<b>MATERIAL</b>	<b>INCREMENTO DE COSTE</b>	<b>INCREMENTO DE RESISTENCIA</b>	<b>RESISTENCIA FRENTE A COSTE</b>
Acero inoxidable AISI 201	404,39 %	785,14 %	1,94
Aluminio 7068 T6511	254,39 %	532,43 %	2,09
Aluminio 2024 T861	<b>83,33 %</b>	<b>288,29 %</b>	<b>3,46</b>



Se puede observar en la Tabla 5 cómo el material que más incrementa la resistencia por incremento de precio es el Al 2024 T861. En el caso de los otros dos, el incremento de resistencia es muy alto, especialmente en el caso del acero inoxidable. Sin embargo, también presentan un incremento elevado de coste. Por ello, el que alcanza el mejor compromiso entre coste y resistencia es el Al 2024 T861.

## 4.2 SOLUCIÓN ELEGIDA

Dado que los objetivos del problema de optimización eran reducir el coste del capot y aumentar su resistencia, se va a establecer como valor mínimo de resistencia el del coeficiente de minoración de cargas que se obtuvo en el Análisis de la Geometría Base, esto es de 0,1. Una vez fijado el mínimo valor de la función objetivo de resistencia, se elegirá el punto del frente con menor valor de la función objetivo de coste. El punto elegido se puede observar en el Gráfico 15.

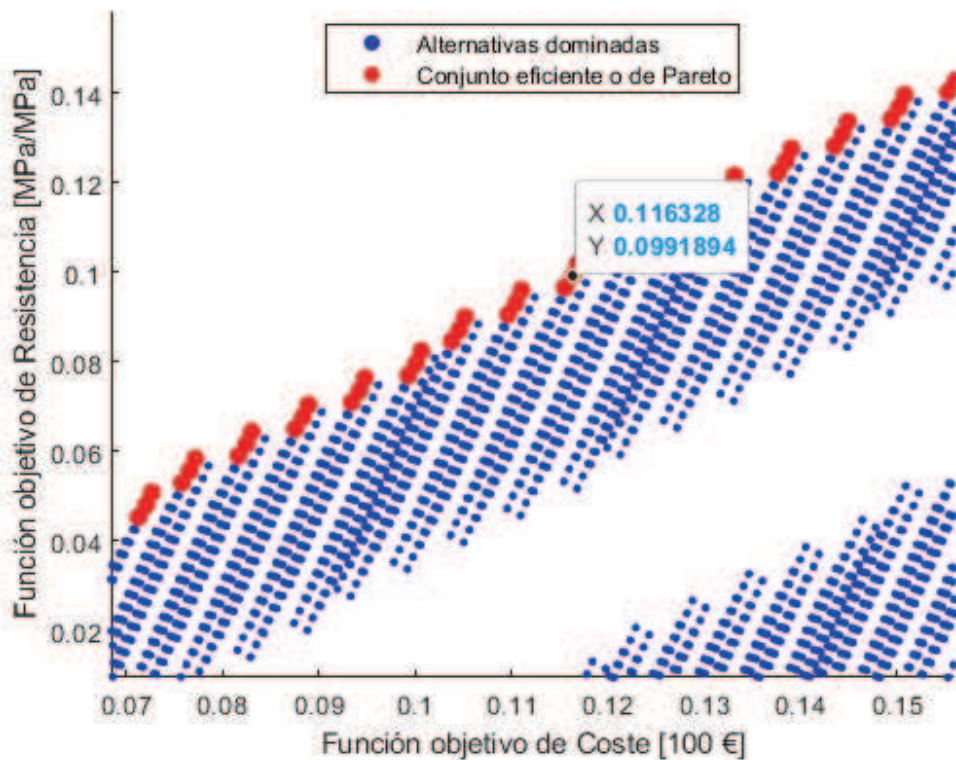


Gráfico 15. Detalle del Gráfico 12 donde se muestra el punto elegido del frente de Pareto.

Como se observa en el Gráfico 15, el punto elegido corresponde a un coeficiente de minoración de cargas de 0,0992, teniendo un coste de 11,63 €. Los valores de cada una de las variables calculados en la optimización para este punto del frente de Pareto se resumen en la Tabla 6.

*Tabla 6. Resumen de los valores de las funciones objetivo y de las variables de decisión del problema para el punto elegido del frente de Pareto.*

<b>FUNCIÓN OBJETIVO DE COSTE</b>	11,63 €
<b>FUNCIÓN OBJETIVO DE RESISTENCIA</b>	0,0992
<b>VARIABLE</b>	<b>VALOR</b>
Espesor de pared	3,8 mm
Espesor de la base	30 mm
Radio de la cúpula	300 mm
Número de nervios externos	20
Número de nervios internos	19

#### 4.2.1 COMPROBACIÓN ESTRUCTURAL DE LA SOLUCIÓN ELEGIDA

Por último, se va a realizar una comprobación estructural de la solución obtenida, para asegurar que los resultados obtenidos con el modelo matemático del problema de optimización se corresponden con los de *ANSYS*. Para ello, se va a simular el modelo de capot con los valores de cada variable recogidos en la Tabla 6 empleando la misma malla y el mismo modelo computacional que en la simulación del apartado 3.1 de la memoria.



Los resultados de la simulación se pueden ver en la Imagen 11 y en la Imagen 12. En la primera, se observa que el valor de la tensión máxima de von Mises en la geometría optimizada es de 23,62 MPa, localizada en la zona donde apoya la arandela de los tornillos. Esto se traduce en un coeficiente de minoración de cargas de 0,2128, que no corresponde con el esperado de 0,0992. Esta diferencia indica que el valor de la función objetivo de resistencia no se corresponde realmente con el coeficiente de minoración de cargas calculado con los resultados de *ANSYS*.

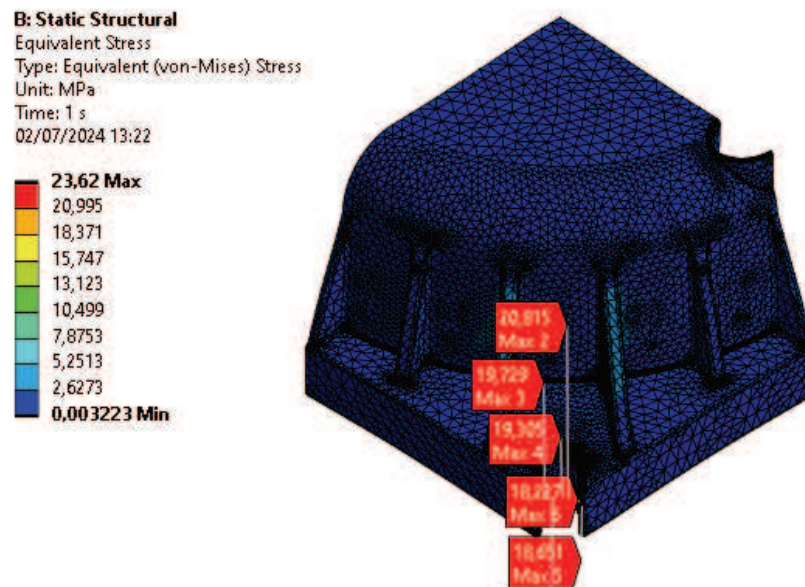


Imagen 11. Distribución de tensiones equivalentes de von Mises con anotaciones de los valores máximos locales.

En cuanto a los desplazamientos, en la Imagen 12 se observa cómo el mayor desplazamiento se sigue dando en el centro de la cúpula, habiendo aumentado su valor hasta los 0,150 mm. En este caso, ha disminuido con respecto a la geometría base. Esto indica que el capot optimizado presenta una mayor rigidez en la zona de la cúpula.



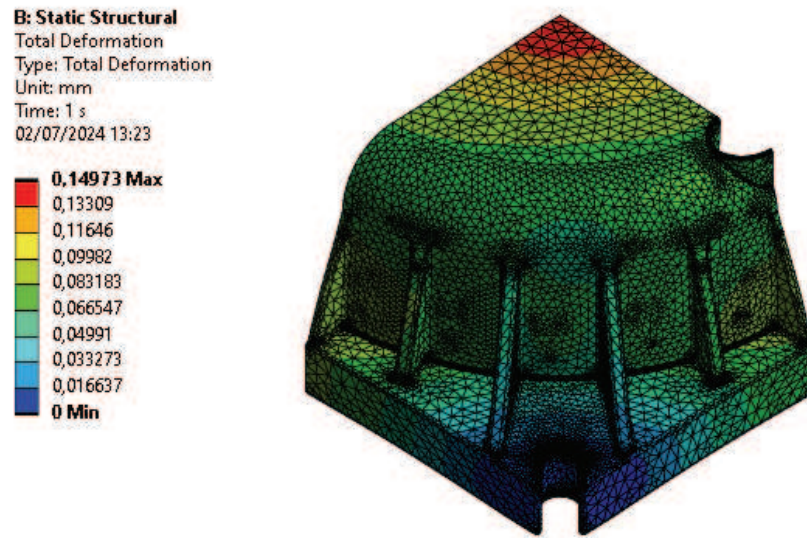


Imagen 12. Distribución de los desplazamientos en la geometría del capot optimizado.

#### 4.2.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Para cuantificar la optimización realizada, en la Tabla 7 se comparan los costes (ya calculados en la sección 4.3) y la resistencia del capot optimizado con respecto al capot base.

Tabla 7. Comparativa del coste y la resistencia del capot optimizado con el capot base.

CAPOT	COSTE		RESISTENCIA	
	VOLUMEN	COSTE POR CAPOT	TENSIÓN MÁXIMA (VON MISES)	COEF. MINORACIÓN
Base	0,004032	<b>22,98 €</b>	11,219 MPa	<b>0,101</b>
Óptimo	0,003579	<b>20,4 €</b>	23,62 MPa	<b>0,2128</b>

Se puede observar cómo se ha conseguido una reducción de entorno al 10% del coste del capot (concretamente del 11,23%). Sin embargo, en el caso de la resistencia, esta ha disminuido a la mitad. Se trata de una disminución considerable, sin embargo, si se comparan los valores de los coeficientes de seguridad (el inverso del coeficiente de minoración) se observa que se ha pasado de un coeficiente de seguridad de en torno a 9 a uno de en torno a



5 (concretamente de 4,6), por lo que la pieza sigue siendo segura. Además, al no tratarse de una pieza estructural, un coeficiente de seguridad de 9 puede ser excesivo.

### 4.3 ESTUDIO ECONÓMICO

A continuación, se expone un breve estudio comparativo del coste del capot original y del optimizado.

#### 4.3.1 CONSIDERACIONES DEL ESTUDIO

Para realizar este estudio comparativo, se van a tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La optimización del coste del capot se ha realizado teniendo únicamente en cuenta los costes variables del capot, es decir, los asociados a la cantidad de material empleada en la fabricación.
- Se supone que los costes fijos (mano de obra, costes asociados a la fabricación que no sean el coste de material y costes de transporte) son los mismos en ambos diseños de capot.
- El coste unitario por capot se va a calcular de la siguiente forma:

$$\text{Coste por capot} = \text{Volumen capot} \cdot \frac{\text{Precio del material}}{\text{ud volumen}} \quad (VII)$$

- El precio por unidad de volumen del material se ha obtenido de la base de datos del nivel 3 del software *Granta EduPack* de *ANSYS* y es de 5700 €/m<sup>3</sup>.

#### 4.3.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO ECONÓMICO

En la Tabla 8 se resumen los costes para la geometría original y la optimizada. Como se puede observar, la optimización realizada reduce el coste del capot a la mitad. Si bien es cierto, como el punto solución del frente de Pareto elegido como solución se ha seleccionado siguiendo criterios de resistencia, sería posible reducir aún más el coste por capot.

Tabla 8. Resumen del coste de cada geometría de capot.

CAPOT	COSTE
Base	22,98 €/capot
Optimizado	20,4 €/capot

#### 4.4 ESTUDIO DE SOSTENIBILIDAD

En esta sección, se va a realizar un análisis comparativo del impacto medioambiental de la geometría base de capot y la optimizada.

##### 4.4.1 CONSIDERACIONES DEL ESTUDIO

Al igual que en la comparación de costes realizada en el apartado, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se van a tener en cuenta las emisiones de CO<sub>2</sub> por kilogramo de material.
- No se van a tener en cuenta otras emisiones asociadas a la producción de los capots.
- Los datos se han obtenido de la base de datos del nivel 3 del software *Granta EduPack* de ANSYS.

##### 4.4.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE SOSTENIBILIDAD

En la Tabla 9 se resumen las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al material, detallando las emisiones por proceso. Se puede observar cómo el total de emisiones es de 10,797 kg de CO<sub>2</sub>/kg de material.



Tabla 9. Resumen de las emisiones de CO<sub>2</sub> del material según Granta EduPack.

PROCESO	EMISIONES DE CO <sub>2</sub> /KG DE MATERIAL
Producción de la materia prima	6,25
Extrusión del polímero	0,461
Moldeo del polímero	1,505
Mecanizado	0,951
Otras operaciones	1,63
<b>TOTAL</b>	<b>10,797 kg CO<sub>2</sub></b>

Para calcular las emisiones totales se debe multiplicar este valor por la densidad del material (de 1350 kg/m<sup>3</sup> según *Granta EduPack*) y por el volumen de cada capot. El resultado de las emisiones totales según el diseño de capot se puede ver en la Tabla 10, donde se puede observar que estas han disminuido en un 11,23%.

Tabla 10. Emisiones totales de CO<sub>2</sub> según el modelo de capot.

CAPOT	EMISIONES TOTALES
Base	58,77 kg CO <sub>2</sub>
Optimizado	52,17 kg CO <sub>2</sub>

## Capítulo 5. CONCLUSIONES

### 5.1 *CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE CAMBIO DE MATERIAL*

A continuación, se detallan las conclusiones obtenidas del estudio de cambio de material.

Se ha observado cómo **el cambio de material tiene efectos en el coste y la resistencia** del capot. Sin embargo, **el estudio se ha realizado sin tener en cuenta los costes asociados a la fabricación**, que no se podrían suponer similares a los actuales al cambiar de material. Es por ello, que las conclusiones obtenidas en este estudio no son del todo ciertas. Es cierto que, cambiando el material, especialmente a un metal, se puede aumentar considerablemente la resistencia, sin embargo, el factor calculado que representa el incremento de resistencia por unidad de coste solo tiene en cuenta los costes asociados al volumen de material empleado. Por ello, para cuantificar realmente el incremento de resistencia por unidad de coste se debería hacer un estudio económico detallado de todos los costes asociados al cambio del material en la producción de los capots.

### 5.2 *CONCLUSIONES DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN*

Del problema de optimización planteado y resuelto se pueden extraer las siguientes conclusiones.

En primer lugar, debido a la naturaleza del problema, una optimización multiobjetivo, **la solución del problema no es única**. Esto **permite obtener diversas soluciones eficientes al problema según el peso que se le dé a cada función objetivo**. Por ello, la solución expuesta en el apartado 4.2 no es la única, sino que es la mejor para un determinado criterio. Esto es una ventaja para el fabricante de capots, ya que puede incorporar a su portfolio diferentes soluciones del frente de Pareto, todas ellas óptimas, según diferentes pesos otorgados a las dos funciones objetivo, lo que puede atraer a nuevos clientes.



En segundo lugar, se observa que **los resultados del modelo matemático planteado para la resolución del problema de optimización y los obtenidos por el software de elementos finitos ANSYS Static Structural difieren**. La explicación de esto se debe a la **hipótesis asumida de que la relación entre cada una de las variables y las funciones objetivo son relaciones lineales**. Con el objetivo de buscar mayor precisión a la hora de resolver el problema y obtener resultados más parejos por ambos métodos, se debería realizar un estudio estadístico del ajuste por regresión con el fin de encontrar el orden más adecuado del ajuste por regresión.

Por último, **en lo referente a los objetivos del proyecto de reducir coste y aumentar resistencia se ha conseguido satisfacer el primero pero no el segundo**. Sin embargo, pese a reducir la resistencia del capot, **se ha conseguido un diseño óptimo para las condiciones de trabajo** y, principalmente, para el objetivo de reducir el coste del capot.

### **5.3 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO ECONÓMICO**

Para cuantificar los resultados del estudio económico y obtener conclusiones, se va a utilizar el ejemplo de la motivación del proyecto. En él, se determinó que el coste total aproximado de los capots empleados en el Puente Lusitania de Mérida era de 1380 €. Con la **reducción del 11,23% del precio de cada capot** obtenida en el presente proyecto, el coste total de estos sería de 1225 €, habiendo conseguido ahorrar unos 155 €.

### **5.4 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE SOSTENIBILIDAD**

Al analizar los resultados del estudio de sostenibilidad, expuestos en la Tabla 10, se puede observar que la **disminución de emisiones asociadas al material empleado es de entorno al 10%**. Sin embargo, **las emisiones calculadas en el estudio simplemente hacen referencia a las emisiones asociadas al material empleado** en los capots. Si bien es cierto, estas representan un gran porcentaje de las emisiones en toda la vida útil del mismo, pero se podrían reducir aún más las emisiones totales analizándolas con más detalle a lo largo de esta y proponiendo soluciones alternativas menos contaminantes. Sin embargo, esto queda fuera del alcance del presente proyecto.

## 5.5 *TRABAJOS FUTUROS*

Como se ha indicado anteriormente, el hecho de que la solución al problema de optimización no sea única, permite la posibilidad de crear una gama de diseño atendiendo a diferentes ponderaciones de las funciones objetivo, es decir, atendiendo a la diferencia de importancia que se dé al coste y a la resistencia del capot. Un posible trabajo futuro es, por tanto, el de **definir el portfolio de soluciones que se puede conseguir con el conjunto eficiente solución del problema de optimización.**

Otro trabajo futuro, también comentado anteriormente, consistiría en el **estudio estadístico del ajuste por regresión**, con el fin de obtener un modelo matemático de optimización que proporcione resultados más parecidos a los obtenidos por los programas de elementos finitos. Esto se puede perfeccionar todavía más y se puede realizar una comprobación empírica de ambos modelos, realizando ensayos de laboratorio de las diferentes geometrías estudiadas en el presente proyecto.

Por último, otro posible trabajo futuro es el que se deriva del estudio de cambio de material del apartado 4.1. Como se detalla en las conclusiones de dicho anexo, en **adaptar el modelo matemático para diferentes materiales**, con el fin de obtener tantos frentes de Pareto como materiales se quieran analizar y, posteriormente, comparar las soluciones entre sí. Este trabajo, además, debería añadir a la función objetivo de costes los costes asociados a los cambios en el proceso de fabricación del capot derivados del cambio de material.







## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Turismo de Mérida, «Turismo de Mérida. Puente Lusitania,» 2017. [En línea]. Available: <https://turismomerida.org/que-ver/puente-lusitania/>.
- [2] Organización de las Naciones Unidas, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. [Último acceso: 2023].
- [3] EOTA, «European Assessment Document - EAD 160004-00-0301,» [www.eota.eu](http://www.eota.eu), Brussels, 2016.
- [4] Mekano4, «MK4 Anchors. Technical Catalogue,» 2023.
- [5] VSL, «VSL Strand Post-tensioning systems. Technical Catalogue,» 2019.
- [6] Dirección General de Agenda Urbana y Arquitectura del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Código Técnico de la Edificación, Madrid: Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado, 2022.
- [7] Secretaría General Técnica del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, «Código Estructural,» Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado, 2021.
- [8] UNE. Normalización Española, «UNE-EN 1537:2015,» Asociación Española de Normalización y Regulación, [En línea]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055197>. [Último acceso: 2023].



- [9] Gobierno de España, «Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible y Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.mitma.gob.es/>.
- [10] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, «Evaluación Técnica de Productos Innovadores de Construcción,» CSIC, [En línea]. Available: <https://dit.ietcc.csic.es/documentos/>. [Último acceso: 2023].
- [11] L. A. Zadeh, «Optimality and Non-Scalar-Valued Performanced Criteria,» *IEE Transactions on Automatic Control*, vol. 8, pp. 59-60, 1963.
- [12] P. Linares, A. Ramos, P. Sánchez, Á. Sarabia y B. Vitoriano, «Teoría de la Decisión: Decisión con Incertidumbre, Decisión Multicriterio y Teoría de Juegos,» Apuntes del Departamento de Organización Industrial de la ETSII ICAI, Madrid, 2006.
- [13] Özgün, «Mechead.com | Engineering Analysis and Design,» 15 December 2023. [En línea]. Available: <https://www.mechead.com/mesh-quality-checking-ansys-workbench/#:~:text=The%20Element%20Quality%20is%20based,edge%20lengths%20for%203D%20elements.>



## ANEXOS DE LA MEMORIA

### ANEXO I. CÓDIGO DE MATLAB

```
clc;
close all;
clear all;

%% DEFINICIÓN DE VARIABLES

x1_range = linspace(0.002, 0.01, 10); % Espesor lateral [m]
x2_range = linspace(0.01, 0.1, 10); % Espesor base [m]
x3_range = linspace(0.3, 3, 10); % Radio de la cúpula [m]
w1_range = [8, 12, 16, 20]; % Nº de nervios exteriores
w2_range = 4:20; % Nº de nervios interiores

%% FUNCIÓN OBJETIVO

% Inicialización de los vectores de variables objetivo y variables de decisión
f1_values = [];
f2_values = [];
decision_vars = [];

% Evaluación de las funciones objetivo en los rangos de las variables
for x1 = x1_range
    for x2 = x2_range
        for x3 = x3_range
            for w1 = w1_range
                for w2 = w2_range
                    % Definición de las funciones objetivo
                    f1 = @(x1, x2, x3, w1, w2) (6.6063*x1 + 2.7987*x2 -
0.0342*x3 + 3.42*10^-4*w1 + 5.7*10^-4*w2);
                    f2 = @(x1, x2, x3, w1, w2) (6.748*x1 + 3.158*x2 -
0.33621*x3 + 1.35*10^-3*w1 + 2.78*10^-3*w2);

                    % Evaluación de los puntos objetivo
                    f1_val = f1(x1, x2, x3, w1, w2);
                    f2_val = f2(x1, x2, x3, w1, w2);

                    % Almacenamiento de resultados
                    if f2_val > 0
                        if f1_val > 0
                            f1_values = [f1_values; f1_val];
                            f2_values = [f2_values; f2_val];
                            decision_vars = [decision_vars; x1, x2, x3, w1,
w2];
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
```



```

end

% Escritura de una matriz de resultados
values = [f1_values, f2_values];

%% FRENTE DE PARETO

% Identificación del frente de Pareto

isPareto = true(size(values, 1), 1);
for i = 1:size(values, 1)
    for j = 1:size(values, 1)
        if (values(j, 1) <= values(i, 1) && values(j, 2) >= values(i, 2)) &&
any(values(j, :) ~= values(i, :))
            isPareto(i) = false;
            break;
        end
    end
end
end

%% REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS

% Representación de las funciones objetivo
figure;
scatter(f1_values, f2_values, 10, 'b', 'filled');
xlabel('Función objetivo de Coste [100 €]');
ylabel('Función objetivo de Resistencia [MPa/MPa]');
hold on;

% Representación del frente de Pareto
paretoPoints = values(isPareto, :);
scatter(paretoPoints(:, 1), paretoPoints(:, 2), 50, 'r', 'filled');
legend('Alternativas dominadas', 'Conjunto eficiente o de Pareto', 'Location',
'best');
hold off;

% Extracción de variables de decisión para puntos de Pareto
paretoDecisionVars = decision_vars(isPareto, :);

%% SELECCIÓN DE UN PUNTO DE PARETO ESPECÍFICO

% Especificar el valor deseado de la segunda función objetivo
target_f2_value = input('Introduce el valor deseado de la función objetivo de
Resistencia [MPa/MPa]: ');

% Encontrar el punto de Pareto más cercano al valor deseado de f2
[~, idx] = min(abs(paretoPoints(:, 2) - target_f2_value));
selectedParetoPoint = paretoPoints(idx, :);
selectedDecisionVars = paretoDecisionVars(idx, :);

disp('Punto seleccionado en el frente de Pareto:');
disp(selectedParetoPoint);
disp('Variables de decisión correspondientes:');
disp(selectedDecisionVars);

```



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

**ICAI**

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE CAPOTS DE  
PROTECCIÓN DE ANCLAJES PARA SISTEMAS DE  
PRETENSADO Y POSTENSADO

**ANEJO I. PLANOS**

Autor: D. Juan Gordillo Abengózar

Directores: Ing. D. Carlos Fuertes Kronberg y Dr. Ing. D. Jesús R.  
Jiménez Octavio

Madrid, julio de 2024



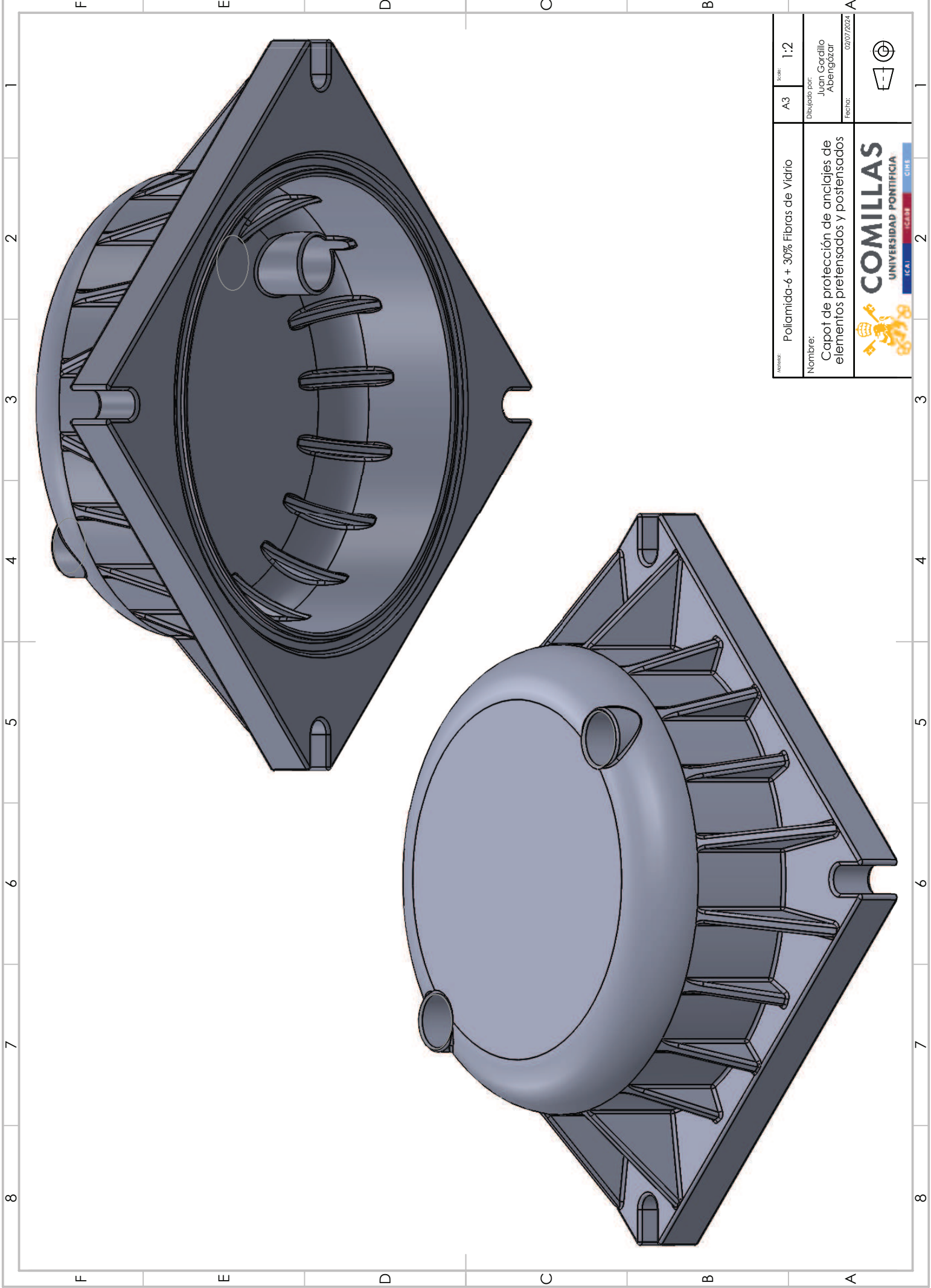



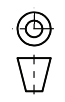
## *Índice de planos*

<i>Vista General del Modelo de Capot Optimizado.....</i>	<i>65</i>
<i>Vistas Principales del Modelo de Capot Optimizado.....</i>	<i>67</i>

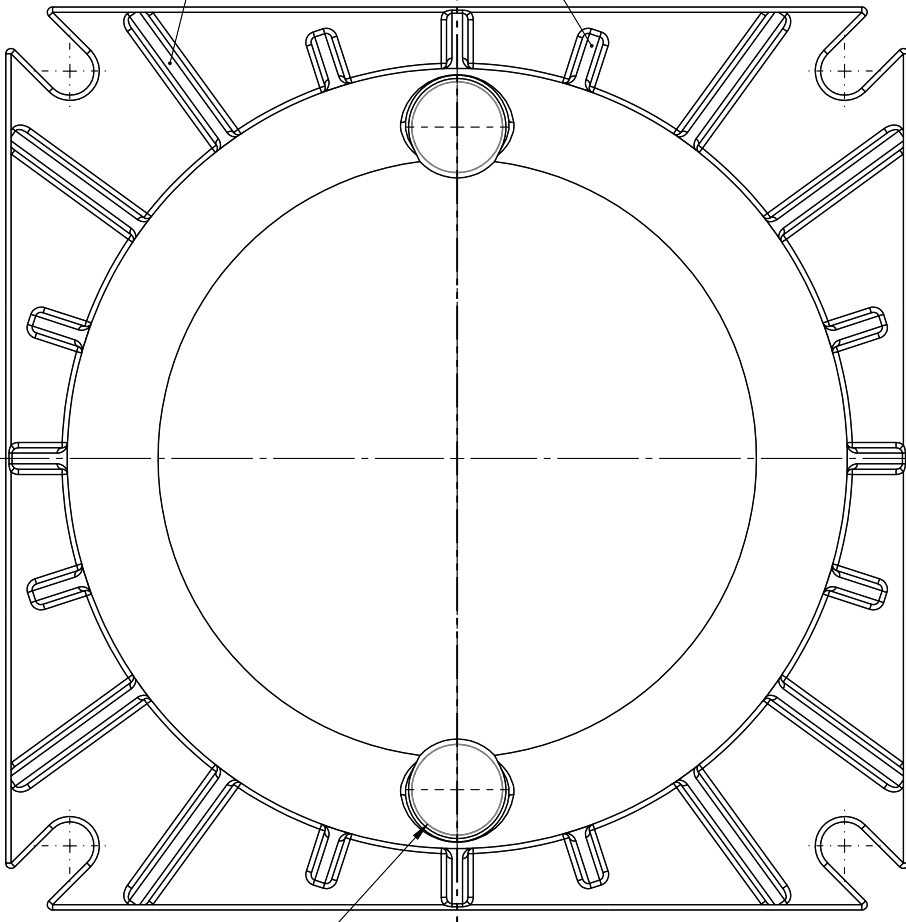






Material: Poliamida-6 + 30% Fibras de Vidrio	Scale: 1:2
Nombre: Capot de protección de anclajes de elementos pretensados y postensados	Dibujado por: Juan Gotallio Abengozar
	Fecha: 02/07/2024
	





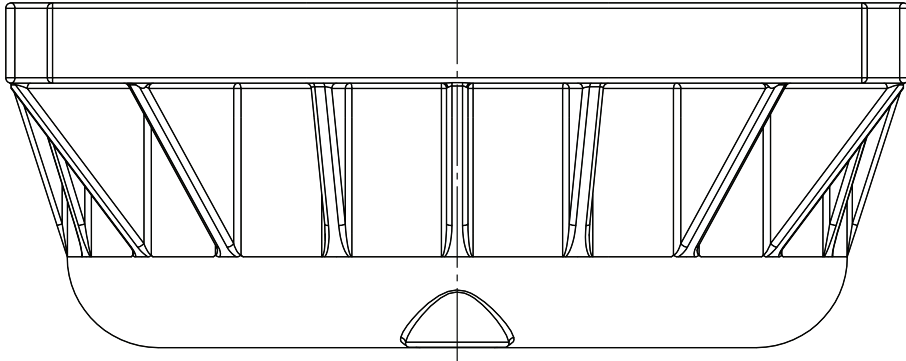
REFUERZOS DE ESQUINAS: x8 distribuidos de 2 en 2

NERVIOS EXTERIORES: x12 distribuidos de 3 en 3 en los laterales

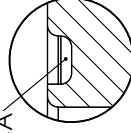
ORIFICIOS PARA EL HORMIGONADO

A

A

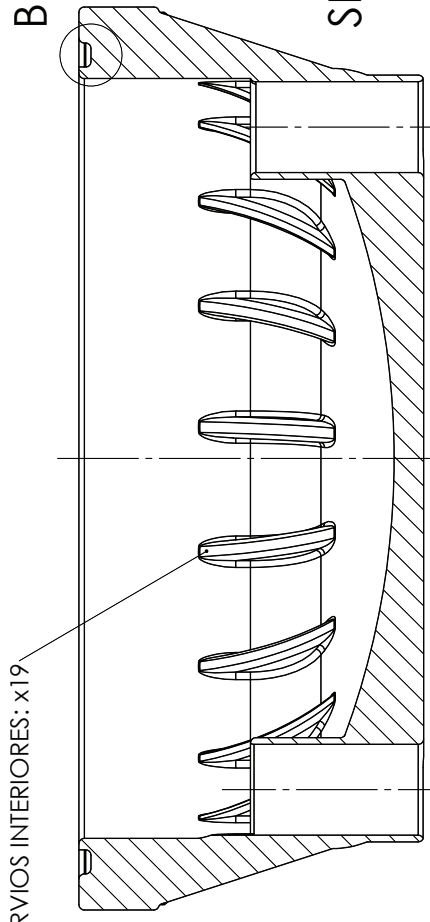


JUNTA TÓRICA



DETALLE B

ESCALA 1:1



NERVIOS INTERIORES: x19

SECCIÓN A-A

ESCALA 1:2

Material:	Poliamida-6 + 30% Fibras de Vidrio	Formato:	A3	Escala:	1:2
Nombre:	Vistas principales del modelo de capot optimizado				
Dibujado por:	Juan Gorallio Abengozar	Fecha:	02/07/2024		