



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

**ICAI**

**MÁSTER EN INGENIERÍA PARA LA  
MOVILIDAD Y SEGURIDAD**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA Y TOPOGRÁFICA DE UNA  
CARROCERÍA DE AUTOMÓVIL PARA ESCENARIOS DE RIGIDEZ Y  
VIBRACIÓN – MEMORIA DE EXTENSIÓN**

Autor: Jordi Nadal Estivill

Firma:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Jordi Nadal Estivill', written over a horizontal line.

Director: Pedro Ruiz Brückel

Firma:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Pedro Ruiz Brückel', written over a horizontal line.

Madrid

Agosto de 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA Y TOPOGRÁFICA DE UNA CARROCERÍA  
DE AUTOMÓVIL PARA ESCENARIOS DE RIGIDEZ Y VIBRACIÓN

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2ºMII+M2S 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.

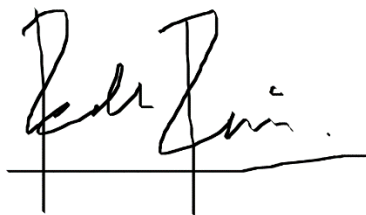
Fdo.: Jordi Nadal Estivill

Fecha: 29/ 08/ 2022



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Pedro Ruiz Brückel

Fecha: 29/ 08/ 2022

# Índice

<b>1. Introducción .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Técnicas de reducción de masa basadas en optimización.....</b>	<b>6</b>
<b>3. Otras técnicas de reducción de masa .....</b>	<b>8</b>
3.1. Uso de distintos materiales .....	8
3.2. Estampación en caliente .....	9
3.3. Tailored Blank .....	10
<b>4. Validación de la reducción de espesores.....</b>	<b>11</b>
<b>5. Resultados Optimización paramétrica .....</b>	<b>13</b>
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>15</b>
<b>7. Referencias.....</b>	<b>19</b>

# Índice de figuras

Figura 1: Modelo BIW para optimizar .....	6
Figura 2: BIW con diferentes materiales .....	9
Figura 3: Tailored Rolled Blank.....	11
Figura 4: Compromiso entre frecuencia y masa.....	14

# 1. Introducción

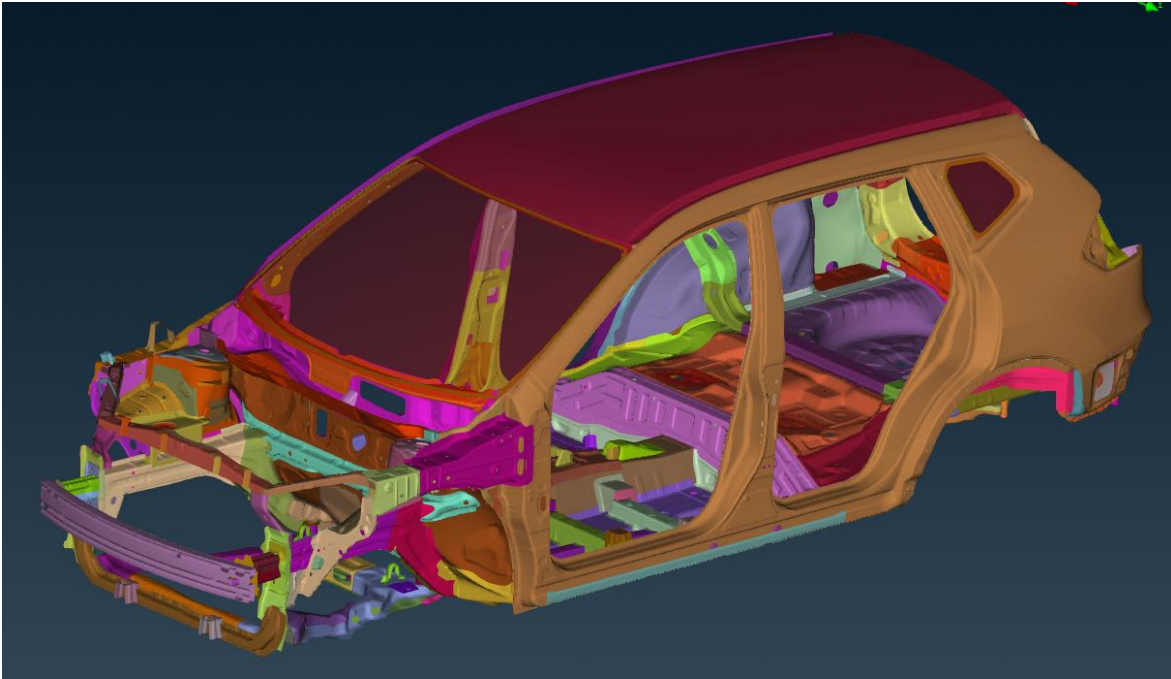
En la industria del automóvil, el peso siempre ha sido un factor determinante. Hacer un coche más ligero conlleva muchas ventajas como gastar menos materia prima en su producción o conseguir que el coche tenga una respuesta más rápida en la conducción. Pero la principal ventaja es que al reducir el peso se reduce también el consumo de combustible del vehículo.

Otro factor indispensable es el de la seguridad, ya sea seguridad pasiva o activa. Los elementos de seguridad pasiva cumplen con su función en caso de accidentes y algunos ejemplos son el cinturón de seguridad, el airbag, o la propia estructura del vehículo. Esta estructura será la encargada de absorber, a partir de su deformación, parte de la energía del impacto; y de proteger a los ocupantes del vehículo en la zona rígida del habitáculo.

Por lo tanto, una buena estructura o carrocería del vehículo, sería aquella que fuera ligera, cumpla con las medidas de seguridad pasiva adecuadas, y además ofrezca al conductor y pasajeros una comodidad adecuada.

El objetivo de este proyecto será optimizar la carrocería desnuda de un vehículo para escenarios de vibraciones y rigidez. Se reducirá la masa de la carrocería sin perjudicar la seguridad pasiva de la estructura ni su comodidad. Para ello se hará uso de herramientas muy potentes como lo son la optimización paramétrica, que consiste en variar los espesores de las chapas y la optimización topográfica, que consiste en variar la morfología de estas.

En la memoria de extensión aquí presentada, se analizarán las técnicas de reducción de masa realizadas en el proyecto y se compararán los métodos con otros también muy utilizados en la industria del automóvil



*Figura 1: Modelo BIW para optimizar*

## **2. Técnicas de reducción de masa basadas en optimización**

Cualquier optimización computacional cuenta con una función objetivo a optimizar. En el mundo de la automoción esta función suele ser la de masa y se optimiza para reducir esta. También existen ciertas condiciones de contorno que limitarán esta reducción de masa. Normalmente se trata de una rigidez requerida para soportar una fuerza. Los tres tipos de optimización más comunes para reducir masa son: la optimización paramétrica, la topológica y la topográfica.

La optimización paramétrica consiste en definir una o varias variables de diseño. Son variables cuantitativas que el algoritmo va cambiando su valor para encontrar el resultado

óptimo según la función objetivo y condiciones impuestas. Una variable de diseño habitual es el espesor de una pieza de chapa, aumentando su valor la estructura se rigidiza y reduciéndolo se consigue un ahorro en masa.

La optimización topológica es algo más compleja y consiste en optimizar una superficie 2D (elementos de tipo Shell). No consta de variables de diseño definidas específicamente. El algoritmo tratará de cambiar la morfología de la superficie a través de dobleces, nervios o “buñas” que harán aumentar la rigidez de la chapa manteniendo un espesor constante. Cabe destacar que estas dobleces, nervios o “buñas” a posteriori sí que podrían ser parametrizables convirtiendo su longitud o ancho en una variable de diseño para optimizar paramétricamente.

La optimización topológica consiste en optimizar el aporte de material en un espacio 3D establecido. El algoritmo divide el espacio en elementos y les asigna una densidad variable desde 0 hasta el valor de densidad del material utilizado. Es una optimización muy útil para reducir el peso al máximo y se obtienen normalmente formas complejas. Usualmente los resultados de esta optimización se interpretan y se construye otro diseño a partir de ellos.

La diferencia entre optimización topológica y topográfica es, por tanto, considerable. Mientras que la topológica parte de un espacio 3D y elige en que zonas poner o no material, en la topográfica sí que se parte de una pieza con forma de chapa (shell). Así que la geometría ya es conocida desde el primer momento, la optimización trata de calcular todo un abanico de soluciones con cambios en la morfología y finalmente arroja los mejores resultados.

## 3. Otras técnicas de reducción de masa

Durante la asignatura de estructuras ligeras en el segundo curso del Máster de Ingeniería para la Movilidad y Seguridad, se dio mucha importancia a la reducción de peso del *body in white*. A continuación, se recogen técnicas que no se han tratado en el proyecto pero que podrían ser perfectamente aplicables y complementarlas incluso con tareas de optimización de espesores y formas.

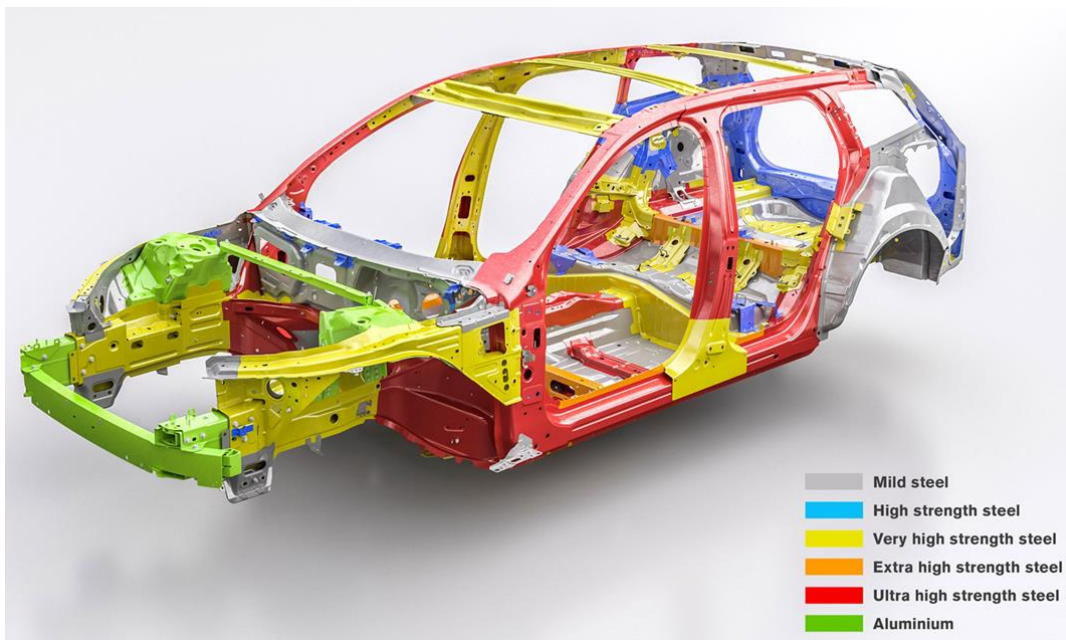
### 3.1. Uso de distintos materiales

La técnica más empleada para la reducción de peso en un vehículo es sin duda el cambio de materiales. Consiste en utilizar un material más ligero, es decir, con menor densidad, para fabricar las chapas. Actualmente, prácticamente todos los vehículos modernos de chasis autoportante están compuestos por distintos materiales.

- **Aceros:** Las aleaciones de hierro y carbono son las más comunes a la hora de diseñar el *body in white* se clasifican según su rigidez mediante su módulo de Young, pueden ser aceros al carbono, aceros de alta resistencia, aceros de muy alta resistencia y aceros de ultra alta resistencia. Los aceros de ultra alta resistencia son los utilizados para piezas que requieren poder ser sometidas a esfuerzos muy elevados como lo es caso del pilar B o los estribos del suelo.
- **Aluminio:** El aluminio al ser un metal mucho más ligero que el acero se utiliza en zonas menos demandadas o zonas en las que se requiere una mayor deformación para que la estructura sea capaz de absorber energía en caso de impacto, como lo es la travesía y toda la parte delantera del vehículo.



- Fibra de carbono: En los últimos años, algunos modelos deportivos de alta gama han utilizado este material para fabricar su carrocería. Suele ser una carrocería de tipo monocasco, es decir, de una sola pieza. El peso que se ahorra con esta técnica es mucho, pero el costo de esta tecnología para piezas tan grandes es muy elevado.



*Figura 2: BIW con diferentes materiales*

### **3.2. Estampación en caliente**

La estampación en caliente es el proceso de utilizar el calor y la presión para realizar más deformaciones en la pieza. La estampación en caliente permite deformar las chapas con muchas más posibilidades de lo que permite la estampación en frío. Por tanto, se consiguen formas óptimas. Además, la estampación en caliente aumenta la resistencia del material en cuestión, ya sea acero o aluminio, debido a los ciclos metalográficos por los que se hace pasar

la pieza en función de la presión y la temperatura. Los factores más importantes que determinan la resistencia final son:

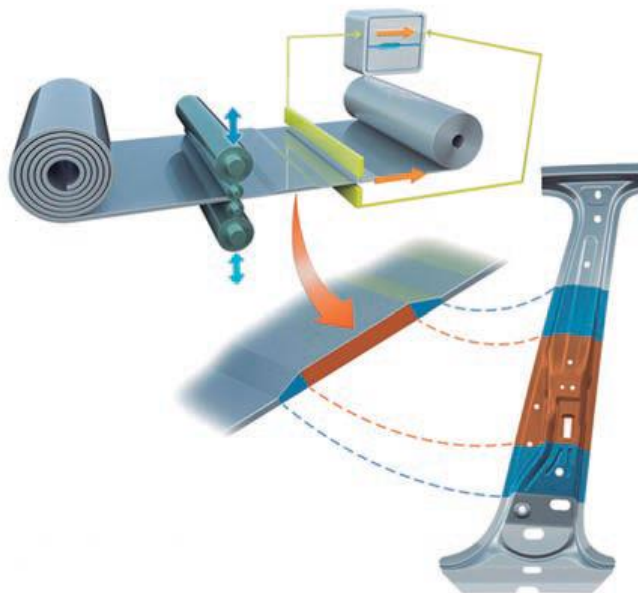
- Velocidad de calentamiento: Debe ser mayor a 12°C/s y tiene una gran influencia en la difusión del revestimiento.
- Tiempo en el horno: Suele tener un valor de entre 5 y 10 min. Esto se hace para garantizar la calidad del revestimiento.
- Velocidad de refrigeración en el útil: En el enfriamiento la velocidad debe ser mayor a 50°C/s para garantizar la dureza de la pieza.
- Dominio de los juegos de corte: También es importante para que los bordes de la chapa no vean mermadas sus características.

### **3.3. Tailored Blank**

Esta técnica consiste en fabricar chapas que contengan partes de distinto espesor. Se utiliza en aquellas chapas que solo requieran un espesor determinado en una zona y al no necesitar tanto espesor en las demás partes, se conseguiría una reducción en masa.

Las dos técnicas principales son:

- Tailored Welded Blank: Este proceso consiste en estampar por separado cada una de las partes de la pieza con diferente espesor para posteriormente unir las por soldadura laser.
- Tailored Rolled Blank: Esta técnica, más nueva que la anterior, se diferencia en el proceso para obtener la pieza. En lugar de soldar dos piezas de distinto espesor, se fabrica una única pieza continua con espesor variable. Se hace variando en hueco de los rodillos en el proceso de laminación y deformando más o menos la chapa que sale directamente de las bobinas, como se puede apreciar en la Figura 3.



*Figura 3: Tailored Rolled Blank*

## 4. Validación de la reducción de espesores

Para considerar como bueno el cambio de espesor una vez optimizado este mediante simulaciones se deberá seguir una serie de tareas para verificarlos.

Estas optimizaciones de cambio de espesor se idean en simulaciones por métodos de elementos finitos (FEM). En esta primera tarea se simulan multitud de combinaciones de espesores y su efecto en la geometría modelada. Se basan en los efectos de los espesores en la rigidez dinámica, para lo que se utiliza el análisis modal; y también en la rigidez estática, para lo que se utiliza el análisis estático. El análisis modal obtiene los modos de vibración de la estructura y sus autovalores asociados, lo que indica que zonas del modelo son más o menos rígidas. Mientras el análisis estático, que puede ser de torsión o flexión, lineal y no

lineal, obtiene el valor de rigidez estático global y las zonas donde se producen mayores deformaciones.

También en la parte computacional, se realizan ensayos de NVH con esos valores de espesor. Es decir, se realizan ensayos de respuesta en frecuencia para los componentes importantes como lo son la *cross car beam* o el bloque motor, y se asegura que la vibración de estos no afecta hasta cierto punto a la carrocería y a los usuarios.

Otro bloque de simulaciones muy importante son las de *crash* o simulaciones de impacto. Se simulan distintos escenarios para comprobar el correcto comportamiento del vehículo. Normalmente se simulan los casos exigidos según la normativa vigente en los territorios a vender el vehículo. En Europa se realizan pruebas simuladas de EURONCAP.

El dimensionamiento final se fabrica junto al resto de la carrocería y se pasa a las pruebas físicas. En esta tarea se realizan las pruebas de impacto físicas, las pruebas a fatiga del biw y de algunos componentes más por separado. También se lleva a cabo el test de *Squeak & Rattle* que es una prueba donde se analiza la torsión del vehículo.

La mayoría de estas pruebas de carácter mecánico tendrán una componente de temperatura que se necesitará cumplir. Se realizarán estos ensayos tanto con una temperatura extremadamente alta como con una extremadamente baja. Para los que se cuentan de cámaras específicas que son capaces de conseguir estas temperaturas extremas y al mismo tiempo realizar los análisis pertinentes. También la prueba de corrosión es muy importante para comprobar la durabilidad del *BIW* y otros componentes.

Por último, para poder reducir correctamente los espesores se debe hacer una valoración global de estos cambios en todo el proceso de fabricación. Se tendrá en cuenta si estas chapas de menor espesor son igualmente soldables o si por el contrario se requerirá de alguna técnica especial. También se debe tener en cuenta los procesos para la creación de estas chapas, es decir, si son igualmente inyectables y embutibles con el actual proceso de fabricación. Si fuera necesario realizar un cambio en maquinaria o en alguna estación del proceso, el coste

de este cambio debería incluirse a la hora de tomar la decisión de la reducción de espesor y los ahorros que generaría.

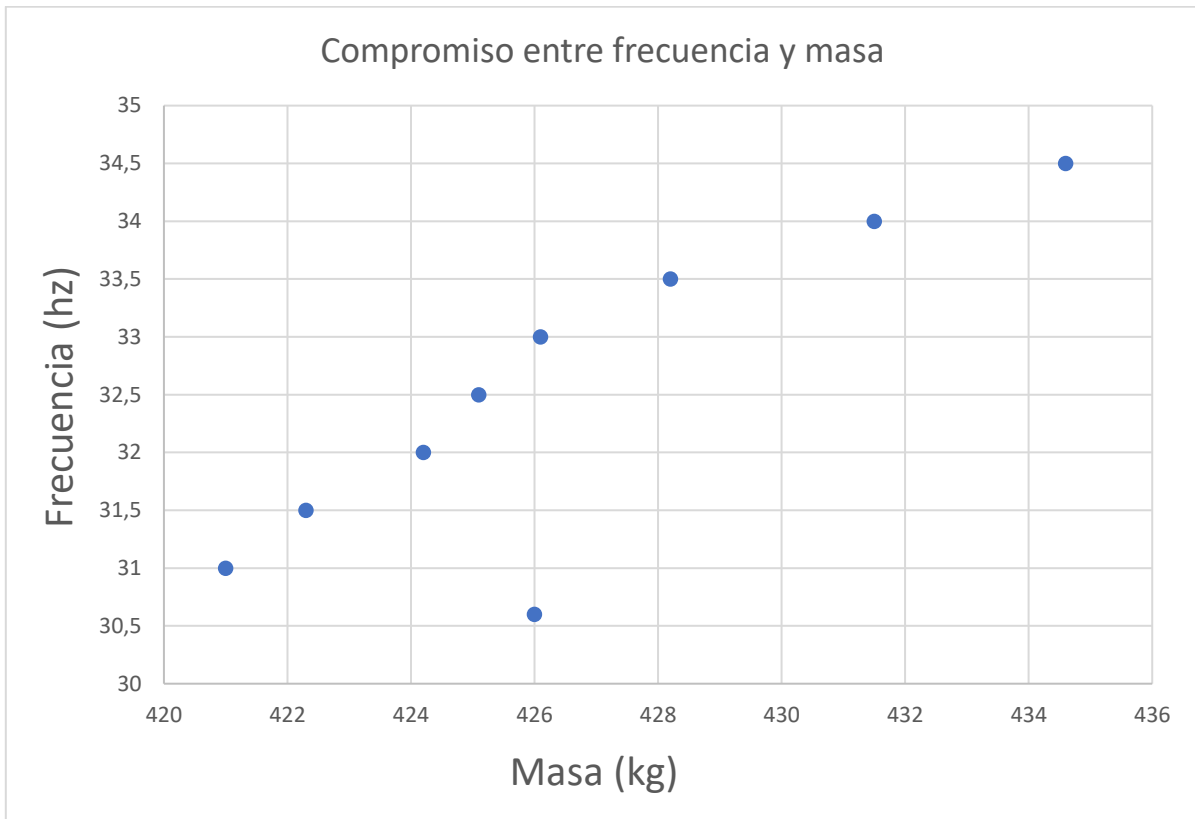
## 5. Resultados Optimización paramétrica

Una vez se tenga claro que chapas van a ser parte de la optimización se ha de elegir un valor de frecuencia torsional para actuar como umbral. En las optimizaciones anteriores se decidió que este valor fuera de 32,5 Hz y se determinó la mínima masa que hacía cumplir esa restricción. En este apartado se definirá una relación entre la frecuencia del primer modo de torsión y la masa total.

Para ello se realizarán una serie de simulaciones de optimización donde se fijará una frecuencia distinta para cada una de ellas. Se hará un barrido desde la frecuencia base de 30,6 Hz hasta 34,5 Hz con intervalos de 0,5 Hz. Las variables de diseño y sus límites serán los mismos.

Este compromiso resulta interesante como una variable más a la hora de elegir un umbral límite de frecuencia torsional, ya que permite poder considerar el impacto de la frecuencia del primer modo en la masa del *body in white*.

Se plantea aquí por tanto un compromiso entre frecuencia y masa que se representa gráficamente en la Figura 4.



*Figura 4: Compromiso entre frecuencia y masa*

En la gráfica también se ha incluido el punto inicial que cuenta con la frecuencia y la masa del modelo base, sin optimizaciones. Se puede apreciar claramente la utilidad de la herramienta, ya que se podría optar por elegir mantener la frecuencia torsional reduciendo masa solo en los elementos destinados a ser diseñados por la rigidez dinámica. O por el contrario, mantener la masa y subir la frecuencia torsional. Pero lo realmente interesante es encontrar el punto donde el compromiso entre frecuencia y masa de un valor que se considere bueno en ambas variables.

La forma de la curva es muy probable que sea distinta para cada vehículo. Pero tiene sentido que el comportamiento final para conseguir frecuencias altas sea parecido al que se ha dado en este proyecto. Se puede apreciar en la gráfica que a partir de los 33 Hz la pendiente se

reduce, es decir, para subir una determinada cantidad la frecuencia se deberá subir la masa cada vez más. Parece razonable, que el punto más óptimo sea el punto de la gráfica en el que esta pendiente aumente. Aunque por supuesto siempre dependerá del diseño requerido, y el compromiso aquí presentado no debe ser más que una herramienta más para considerar el umbral correcto.

Como valor final a la optimización paramétrica, se ha decidido usar este criterio de que el punto óptimo para los valores de frecuencia y masa sea el que antecede a la caída de la pendiente, que será el punto que ofrezca más frecuencia por el menor aumento en masa posible. Por tanto, los valores finales serán una frecuencia del primer modo de torsión de 33 Hz y una masa global correspondiente de 426,1 Kg.

## 6. Conclusiones

En este proyecto se presenta el estudio del *body in white* o carrocería de un vehículo para distintos escenarios de rigidez y vibración. Se ha visto durante el mismo que el modelaje que se haga de la carrocería juega un papel importante. Cuando los elementos de la carrocería no se unían de la forma correcta se veía una caída drástica en la frecuencia del primer modo de torsión. Llegando a subir de 25,4 Hz a 30,6 Hz cuando el modelo era correcto. Se ha explicado cómo se modela cada elemento de la carrocería y su porqué.

Es lógico pensar que este proyecto no tenga un alto valor cuantitativo en cuanto a resultados, ya que existen multitud de carrocerías de vehículo, cada una diseñada de forma distinta. Sin embargo, la parte cualitativa de los resultados aporta mucho conocimiento en este campo.

Primero, el hecho de que un vehículo tenga tantas áreas de diseño limita de alguna manera el estudio. Esto es debido a que hay zonas de la carrocería con una mayor importancia como lo son toda la parte delantera dimensionadas por las demandantes condiciones de impacto. Esto hace que el área donde es preciso realizar la optimización sea limitada. Sin embargo, resulta que cómo se ha visto en todo el proyecto, la zona más crítica se encuentra en el arco del

portón trasero, y más especialmente en las dos esquinas superiores. Y sus dimensiones y morfología, en cierta, medida son perfectamente modificables

Lo más importante que se ha obtenido del estudio de la optimización paramétrica ha sido el compromiso encontrado entre frecuencia del primer modo de torsión y masa global. Las manufactureras normalmente no tienen en cuenta este ahorro de masa y basan únicamente la elección del umbral de frecuencia en motivos de respuestas dinámicas y modos de vibración de otros componentes del vehículo. Sin embargo, teniendo en cuenta esta relación entre frecuencia y masa, que será única para cada vehículo, es posible conseguir una disminución en masa notable sacrificando muy poco el umbral de frecuencia que en ciertas situaciones podría no afectar a las respuestas dinámicas, vibraciones o confort en general.

La última conclusión de este proyecto es la eficacia comprobada del uso de buñas para rigidizar la carrocería. Las buñas que se diseñaron para las zonas críticas con mayores energías de deformación del primer modo cumplen perfectamente con su función de aumentar la rigidez dinámica y aumentar la frecuencia del primer modo de torsión. El diseño de la buña de forma manual ha resultado ser más efectivo que el uso de optimizaciones morfológicas completamente libre. Se asocia esto a la complejidad del modelo. Mediante el uso de la optimización topométrica se ha podido decidir dónde serían más efectivas las buñas. Además se ha podido parametrizar la longitud anchura y altura de las mismas para que se puedan incluir en optimizaciones paramétricas. Dónde se tendrían dos parámetros, el espesor y la geometría de la buña.



## 7. Menciones explícitas a contenidos del M2S aplicados en el TFM

En el apartado Técnicas de reducción de masa basadas en optimización se describen las técnicas de optimización más utilizadas para la reducción de masa en automoción. Durante la asignatura de estructuras ligeras se cursaron un par de clases prácticas utilizando dichas herramientas en simulaciones con el software de ANSYS. En ellas se explicaron los conceptos de función objetivo, variables de diseño y las condiciones de contorno o restricciones adicionales.

En el apartado Otras técnicas de reducción de masa se explican otras técnicas alternativas para la reducción de masa para usar específicamente en el *body in white*. Estas técnicas no se han tratado específicamente durante la elaboración del proyecto pero se suelen usar en la industria de forma complementaria a las mencionadas. Por ejemplo, la técnica de *tairoled blank* es mucho más aprovechable si se realiza un trabajo previo de optimización de espesores, así se logra elegir que zonas son las más críticas para dar unos valores de espesor u otros.

En el apartado Validación de la reducción de espesores se describe todo el proceso posterior a la optimización del valor de los espesores. Es decir, se trata de entender los procesos industriales de verificación y validación del *BIW* o coche completo, según la prueba, para que se considere correcta la optimización de espesores realizada con simulaciones computacionales.

En estos dos últimos apartados explicados se usan conceptos y técnicas vistos en profundidad en la asignatura de Estructuras Ligeras del Máster de Ingeniería para la Movilidad y Seguridad. En específico, se dieron tres lecciones dedicadas únicamente al *BIW* del vehículo, donde además de lo ya descrito se vieron nuevas estrategias a seguir en el sector, en función de materiales y procesos nuevos. También se estudió la diferencia para los distintos

segmentos de una misma manufacturera que suponen distintas decisiones de reducción de masa para la relación coste-prestaciones. Y también como estas técnicas evolucionarían durante los próximos años en el sector.

## 8. Referencias

- [1] Bastien, C. (2012). *Lightweight Body in White Design Using Topology-, Shapeand.*
- [2] BETACAE. (s.f.). *OPTIMIZATION ANSA/META FOR EPILYSIS SOL 200 Tutorial.*
- [3] Center for Collision Safety and Analysis (CCSA). (2020).  
<https://www.ccsa.gmu.edu/models/2020-nissan-rogue/>.
- [4] Duan, L. (2016). *An efficient lightweight design strategy for body-in-white based.*
- [5] Hafizi, Z. M. (2017). *Modal properties investigation of car body-in-white.*
- [6] Kiani, M. (2015). *Simulation-based design optimization to develop a lightweight body-inwhite.*
- [7] Lázaro, D. G. (2014). *Tailored Welded Blank Proceso de fabricación de piezas para el aligeramiento de carrocerías.*
- [8] Oktav, A. (2016). *Experimental and numerical modal analysis of a passenger vehicle.*
- [9] Ou, H. (2018). *Lightweight Body-In-White Design Driven by Optimization Technology.*
- [10] Pörner, F. (2014). *Volkswagen & Audi Vereinheitlichung Modellierung BIW.*
- [11] Rashid, A. S. (2014). *Improving the Dynamic Characteristics of Body-in-White.*
- [12] Wang, D. (2017). *Multi-objective lightweight.*
- [13] Yang, Y. (2010). *Mode calculation and testing of a car body in.*