

Anexos

Anexo A. Tablas complementarias de materiales.

A continuación, se muestran un conjunto de gráficos con datos adicionales a los mostrados en el trabajo que permiten comparar de forma detallada las propiedades de los materiales utilizados tanto en fabricación por molde de inyección como en fabricación aditiva.

Mediante estos gráficos se pretende facilitar el proceso de selección de los materiales adecuados para fabricar piezas según sus requerimientos mecánicos y en función de la metodología de fabricación disponible.

- Gráfico que permite comparar las propiedades de módulo de Young y tensión de rotura de los materiales utilizados para molde de inyección con los de fabricación aditiva.

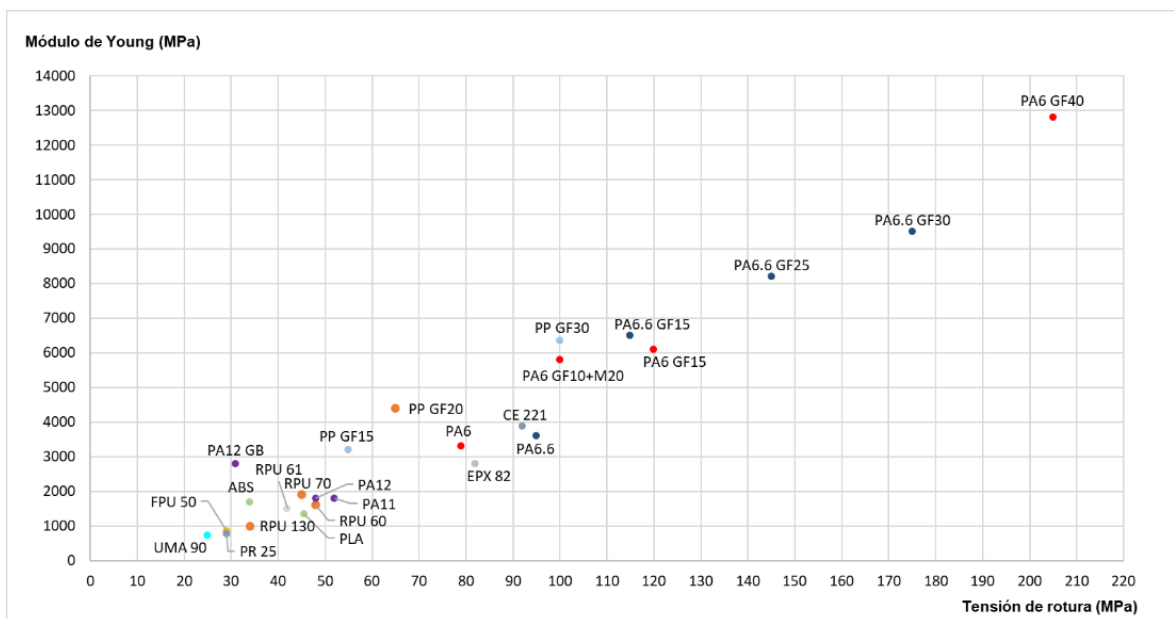


Fig. Anexo A.1 Gráfico de módulo de Young – tensión de rotura para distintos materiales.

- Gráfico de barras que ilustra el coste por kilogramo de los utilizados tanto para molde de inyección como para los tipos de tecnología de fabricación aditiva: FDM, SLS y MJF.

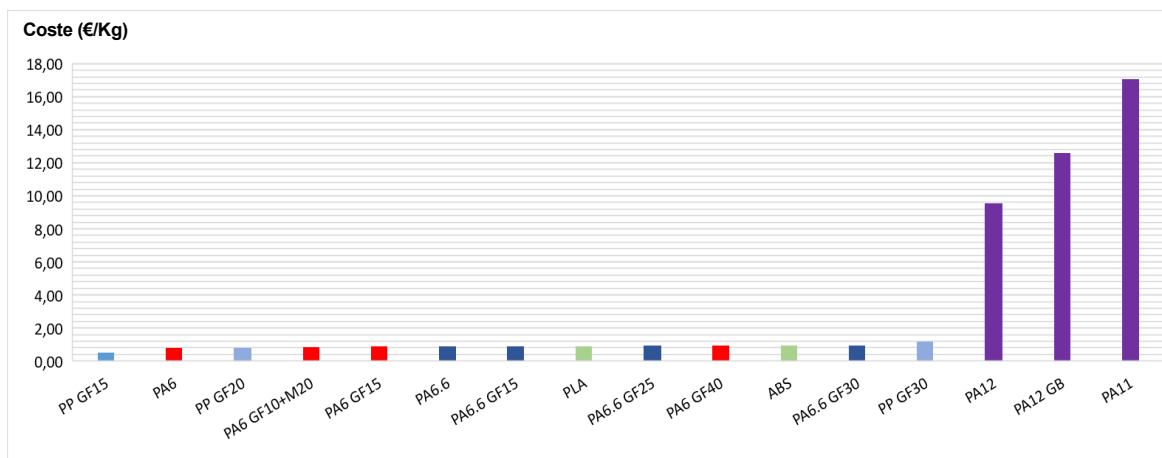


Fig. Anexo A.2 Gráfico representativo del coste por kilogramo de material en orden ascendente.

- Gráfico que permite comparar las propiedades de densidad y temperatura de deflexión térmica de los materiales utilizados tanto para molde de inyección como para tecnología de fabricación aditiva.

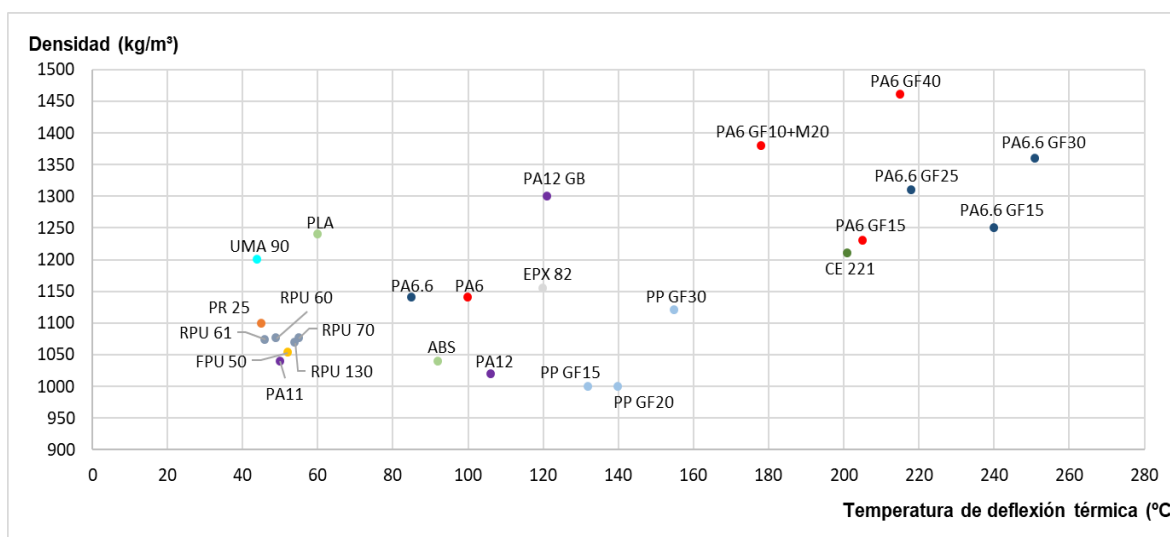


Fig. Anexo A.3 Gráfico de densidad – temperatura de deflexión térmica para distintos materiales.

- Gráfico que permite comparar las propiedades de módulo de Young y alargamiento a rotura de los materiales utilizados tanto para molde de inyección como para tecnología de fabricación aditiva.

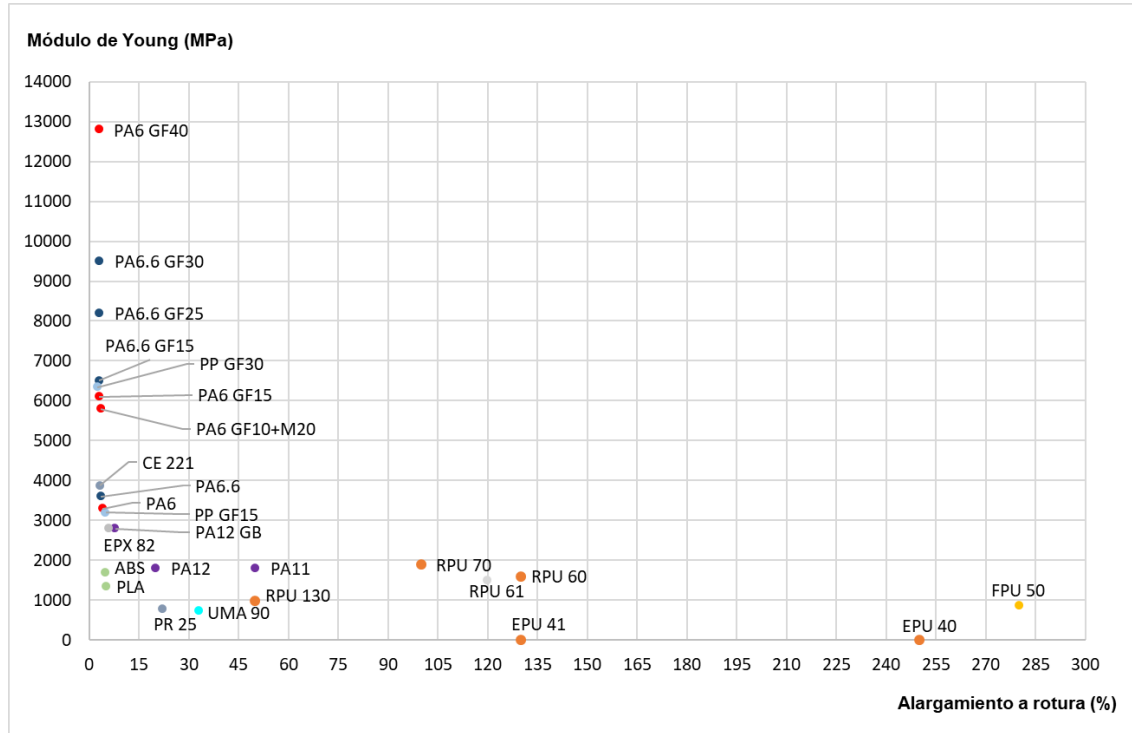


Fig. Anexo A.4 Gráfico de módulo de Young – alargamiento a rotura para distintos materiales.

Anexo B. Simulación de ensayo de vibración.

El objetivo del diseño generativo es optimizar la geometría de una pieza ya existente en CAD reduciendo la cantidad de material utilizado para fabricarla sin perder propiedades mecánicas.

Uno de los posibles métodos para conseguir una pieza con diseño generativo es la simulación por ordenador. Se trata de partir de la pieza original y ver los requisitos mecánicos que debe cumplir. A continuación, se suprimen secciones de la pieza que no afectan al funcionamiento de esta y se comprueba si sigue cumpliendo los requisitos mecánicos. Se realizan un seguido de simulaciones mediante un proceso de prueba-error hasta reducir el máximo de material posible dentro del rango de seguridad.

Una de las piezas que se ha tomado como referencia en este proyecto ha sido el soporte VIP Pedal, desarrollado en la empresa SEAT. A continuación, se detalla el proceso seguido para obtener un diseño generativo de dicha pieza.

Los ensayos de vibración se realizan para validar el rendimiento y la integridad estructural de un dispositivo durante su transporte y vida útil, evitando fallos de vida en el espacio. Para hacer una simulación de un ensayo de vibración por ordenador, se debe elaborar un estudio de frecuencia de resonancia de cada pieza.

Si la frecuencia de las vibraciones que sufre un componente de una máquina o estructura es cercana a la frecuencia natural de los mismos, tiene lugar un fenómeno conocido como resonancia. Cuando entra en resonancia un componente mecánico o estructura las fuerzas que actúan sobre ellos este sufre desplazamientos enormes que o bien impiden su correcto funcionamiento o producen el fallo de este.

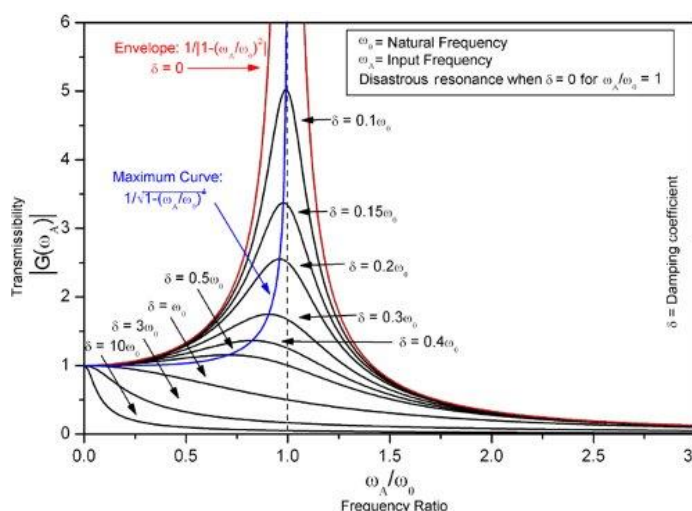


Fig. Anexo B.1 Gráfico de transmisividad – ratio de frecuencia donde se observa el fenómeno de la resonancia.

Según la normativa VW, los ensayos de vibraciones se realizan siguiendo estos parámetros:

	Eje Z	Eje X	Eje Y
Espectro de frecuencia (Hz)	5 – 200	5 – 200	5 – 200
Nivel RMS de Amplitud (m/s²)	14,13	9,42	12,07
Duración del ensayo (h)	12h	12h	12h

Fig. Anexo B.2 Tabla de datos para ensayo de vibración.

Por lo tanto, para que una pieza deba resistir a los ensayos de vibración, tiene que estar bien fijada y debe soportar frecuencias de hasta 200Hz. De esta forma, añadiendo un factor de seguridad del 20%, la primera frecuencia de resonancia de una pieza debe ser superior a 240Hz.

Simulación de ensayo de vibración de soporte VIP Pedal:

Originalmente el soporte VIP Pedal se obtiene mediante la tecnología de molde de inyección. Para obtener el diseño generativo de esta pieza orientada a fabricación aditiva se ha seguido una serie de pasos: Se simula la pieza original de material PP GF 20 y se comprueba que resistiría al ensayo de vibración con frecuencias de resonancia superiores a los 200Hz. A continuación, se simula la pieza con la geometría original, pero con las características de una pieza obtenida por fabricación aditiva (en este caso, mediante la tecnología MJF y el material PA 12). Por último, se inicia un conjunto de simulaciones de forma que con prueba-error se obtenga una geometría final con el mínimo material posible manteniendo las prestaciones para la cual ha sido diseñada.

- **VIP PEDAL PP GF 20 (Fabricación con molde de inyección):** Simulación de vibración de la pieza original, fabricada mediante molde de inyección y con material PP GF 20. El peso de la pieza es de 16,5g. Se fija la cara inferior del soporte que irá pegado al parachoques trasero mediante una cinta de doble cara. También se simula el peso de la centralita en la cara superior del soporte. Y, por último, se crea la malla para realizar el análisis mediante elementos finitos.

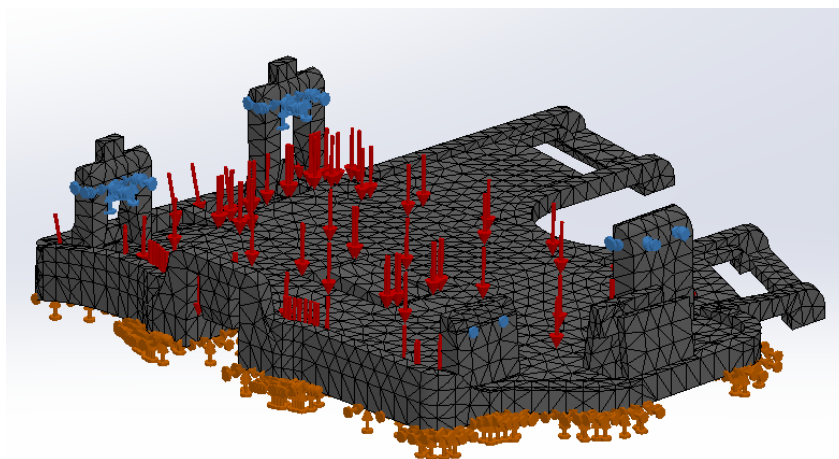


Fig. Anexo B.3 Simulación del soporte VIP Pedal PP GF 20 con restricciones de movimiento.

Finalmente se obtienen los resultados del análisis de vibración, de la misma forma que se realiza en el laboratorio de ensayos de vibración y según la normativa VW:

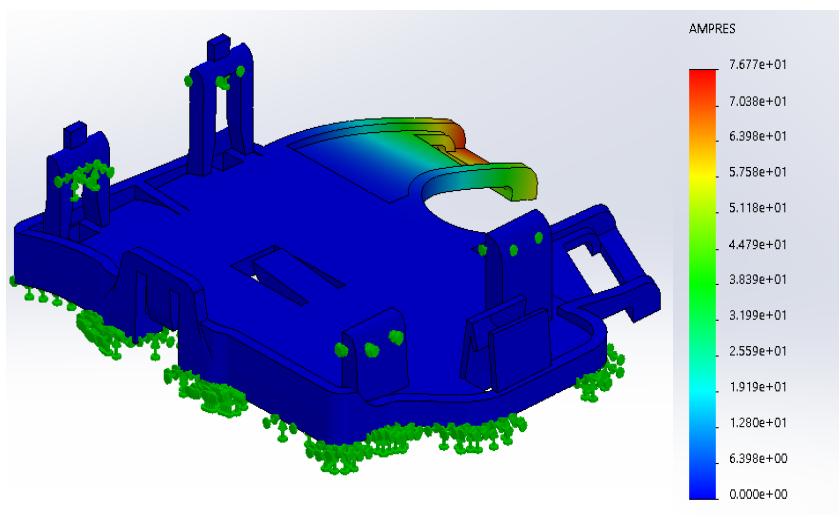


Fig. Anexo B.4 Simulación de ensayo de vibración del soporte VIP Pedal PP GF 20.

Obtenemos como resultados frecuencias de resonancia superiores a 550Hz, muy por encima de los 240Hz solicitados. Esta pieza debería superar sin problemas un ensayo de vibración.

Nº de modo	Frecuencia(Rad/seg)	Frecuencia(Hertz)	Período(Segundos)
1	3496.3	556.45	0.0017971
2	7677.2	1221.9	0.00081842
3	8191.8	1303.8	0.00076701
4	16720	2661	0.00037579
5	16779	2670.5	0.00037446

Fig. Anexo B.5 Tabla de resultados de frecuencias de resonancia (Material: PP GF 20).

- **VIP PEDAL PA 12 (Fabricación aditiva):** Estudio de vibración de la pieza obtenida mediante fabricación aditiva MJF con material PA 12. Se crean las fijaciones de la misma forma que en la simulación anterior. Seguidamente se crea la malla para realizar el análisis mediante elementos finitos. El peso de pieza es de 15,4g.

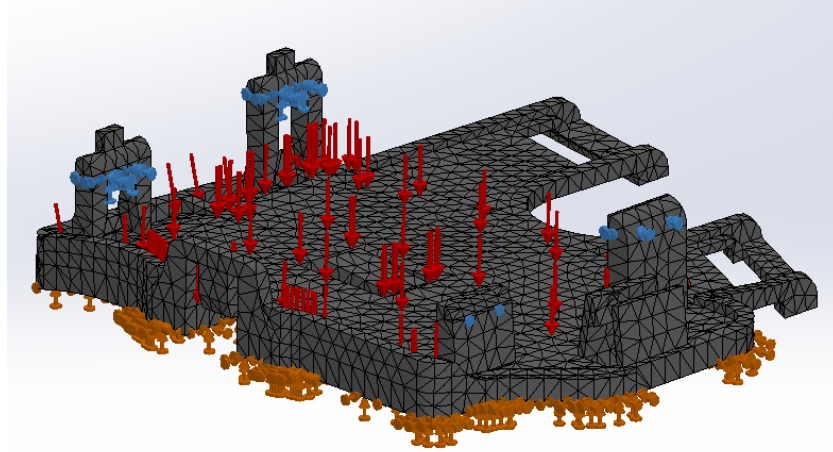


Fig. Anexo B.6 Simulación del soporte VIP Pedal PA 12 con restricciones de movimiento.

Se obtienen los resultados del análisis de vibración, de la misma forma que se realiza en el laboratorio de ensayos de vibración y según la normativa VW:

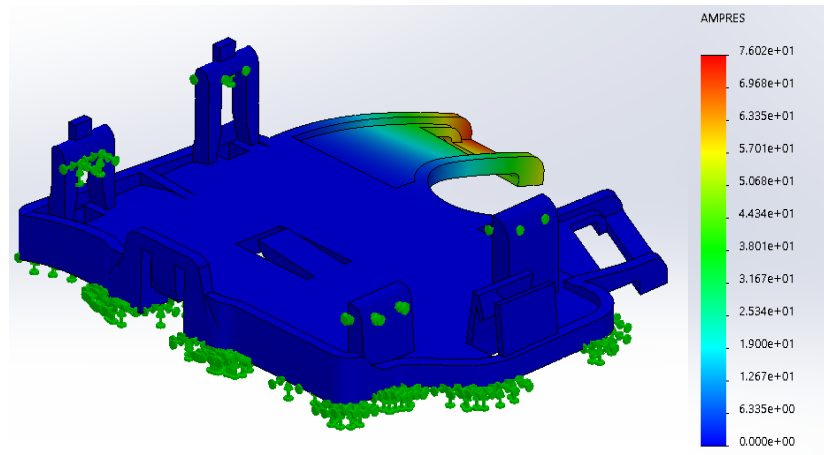


Fig. Anexo B.7 Simulación de ensayo de vibración del soporte VIP Pedal PA 12.

Con frecuencias de resonancia superiores a 350Hz, cuando se solicitan por encima de 240Hz. Esta pieza debería superar sin problemas un ensayo de vibración.

Nº de modo	Frecuencia(Rad/seg)	Frecuencia(Hertz)	Período(Segundos)
1	2214.2	352.4	0.0028377
2	4862	773.81	0.0012923
3	5187.8	825.67	0.0012111
4	10589	1685.2	0.00059339
5	10626	1691.3	0.00059128

Fig. Anexo B.8 Tabla de resultados de frecuencias de resonancia (Material: PA 12).

- **VIP PEDAL PA 12 (Fabricación aditiva y diseño generativo):** Estudio de vibración de la pieza obtenida mediante fabricación aditiva MJF y con material PA 12. Esta pieza tiene una estructura obtenida mediante diseño generativo, lo que implica un ahorro de material y de peso respecto a la versión anterior. Se crean las fijaciones de la misma forma que en la simulación anterior. Y después se crea la malla para realizar el análisis mediante elementos finitos. Esta pieza tiene un peso de 12,9g.

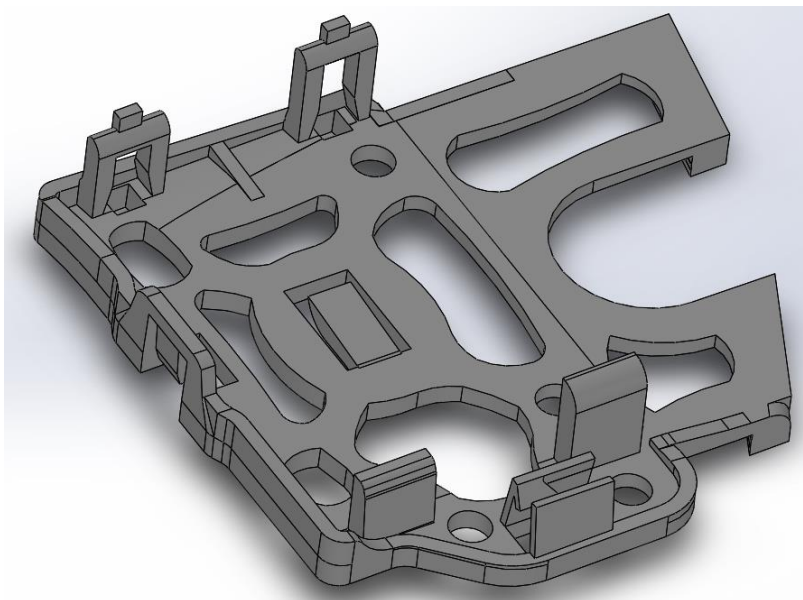


Fig. Anexo B.9 Simulación del soporte VIP Pedal PA 12 con diseño generativo.

Finalmente se obtienen los resultados del análisis de vibración, de la misma forma que se realiza en el laboratorio de ensayos de vibración y según la normativa VW:

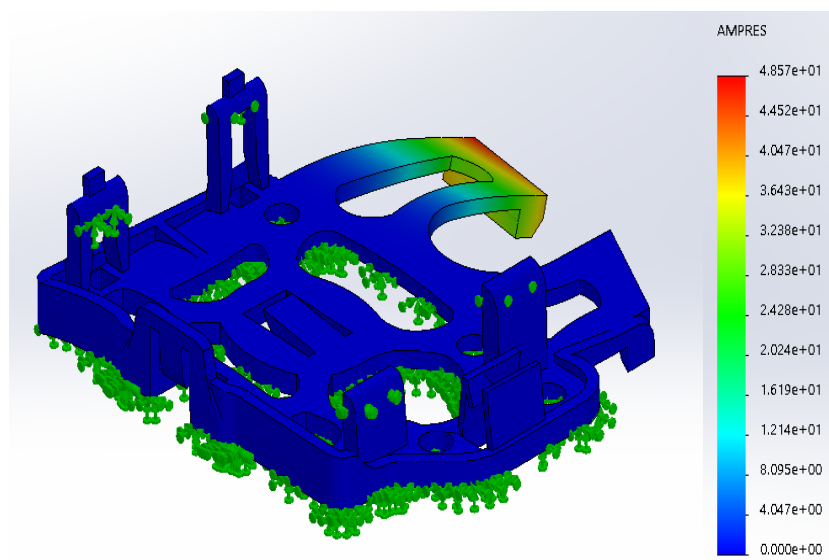


Fig. Anexo B.10 Simulación de ensayo de vibración del soporte VIP Pedal PA 12 con diseño generativo.

En este caso, el procedimiento ha sido el siguiente: Partiendo de la pieza diseñada para fabricación aditiva, se ha eliminado parte del material que estaba situado en zonas que no eran críticas según las simulaciones anteriores. A continuación, se ejecuta la simulación de ensayo de vibración para esta geometría y se comprueba que su frecuencia de resonancia sigue siendo superior a 240Hz. A continuación, se vuelve a eliminar parte de material y se hace la simulación de nuevo. Tras varias reiteraciones, se obtiene la geometría final.

Los resultados de la geometría de pieza final son los siguientes:

Nº de modo	Frecuencia(Rad/seg)	Frecuencia(Hertz)	Período(Segundos)
1	1547.3	246.27	0.0040606
2	3869.6	615.87	0.0016237
3	5127.8	816.12	0.0012253
4	8876.5	1412.7	0.00070784
5	10241	1629.9	0.00061352

Fig. Anexo B.11 Tabla de resultados de frecuencias de resonancia (Material: PA 12).
Pieza con diseño generativo.

Con frecuencias de resonancia superiores a 245Hz, cuando se solicita un máximo de 240Hz, esta pieza debería superar el ensayo de vibración sin problema.

Resumen de resultados:

Soporte VIP Pedal	Peso (g)	1a frecuencia de resonancia (Hz)
PP GF 20 (Fabricación con molde de inyección)	16,5	550 (A 310Hz del límite: 240Hz)
PA 12 (Fabricación aditiva)	15,4 ↓ 6,6%	350 (A 110Hz del límite: 240Hz)
PA 12 (Fabricación aditiva y diseño generativo)	12,9 ↓ 21,8%	245 (A 5Hz del límite: 240Hz)

Fig. Anexo B.12 Tabla resumen de resultados de la simulación del ensayo de vibración.

Aplicando el método de diseño generativo y fabricando la pieza mediante fabricación aditiva (en este caso MJF) se reduce el peso de la pieza un 21,8%. Una reducción de peso significativa si se extrapola a otras piezas que pueden ir en los vehículos y teniendo en cuenta que se mantienen las prestaciones para las cuales han sido diseñada la pieza.

