



Estudio experimental de técnicas pasivas de amortiguamiento en una viga en voladizo mediante parches piezoeléctricos y CLD

M. Melero Esteso¹, A. J. Nieto Quijorna², A. L. Morales Robredo², J.M. Chicharro Higuera²,
P. Pintado Sanjuán²

¹ Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén, Universidad de Castilla-La Mancha, Miguel.Melero@uclm.es

² Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Ciudad Real, Universidad de Castilla-La Mancha,
AntonioJavier.Nieto@uclm.es, AngelLuis.Morales@uclm.es, JoseManuel.Chicharro@uclm.es, Publio.Pintado@uclm.es

Este trabajo presenta un estudio experimental cuyo objetivo es identificar métodos efectivos para reducir las vibraciones en estructuras ligeras. Se comparan específicamente dos enfoques pasivos aplicados a una viga de aluminio en voladizo: parches piezoeléctricos y recubrimientos viscoelásticos. A diferencia de las soluciones activas, que requieren un consumo constante de energía, los métodos pasivos destacan por su simplicidad, bajo mantenimiento y eficacia a largo plazo.

La primera técnica propuesta utiliza parches piezoeléctricos, con tres valores de capacitancia distintos, ubicados en diferentes zonas de la viga y conectados a dos tipos de circuitos de derivación: resistivo e inductivo. Esta técnica logra una reducción de vibraciones del 92%. La segunda estrategia explora el amortiguamiento de la viga revistiéndola con un material viscoelástico disipativo y diferentes capas constrictoras (constrained layer damping, CLD), alcanzando una reducción del 89%. Ambos enfoques muestran un potencial significativo para reducir vibraciones indeseadas, proporcionando soluciones prácticas para su aplicación en estructuras ligeras.

Finalmente, se ha estudiado la combinación de ambas técnicas mediante la selección de las configuraciones que logren los mejores resultados, alcanzando una reducción del 95%. Los resultados de este trabajo ofrecen una perspectiva detallada sobre la efectividad de estos métodos pasivos, tanto por separado como en conjunto, con importantes implicaciones para aplicaciones que demanden sistemas con cierto amortiguamiento estructural.

1. Introducción

El transporte mundial, impulsado por el desarrollo social y económico, está aumentando considerablemente. Este hecho motiva la introducción de medios de transporte eficientes y sostenibles, y el ferrocarril de alta velocidad es un buen candidato para satisfacer esta necesidad en los viajes de media y larga distancia. Una de las necesidades de la industria ferroviaria se centra en el aumento de la velocidad, lo que exige coches más ligeros, siendo el aluminio el material preferido por su bajo peso, durabilidad y resistencia a la corrosión. Además, se están estudiando materiales como los polímeros reforzados con fibras para mejorar la resistencia y la rigidez. Sin embargo, la reducción de peso hace que la estructura ligera presente frecuencias de resonancia en valores bajos, lo que la hace más vulnerable a las excitaciones de la vía y afecta al confort de los pasajeros. Por lo tanto, es necesario desarrollar sistemas activos y pasivos que aumenten el amortiguamiento estructural, buscando alcanzar altas velocidades operativas manteniendo el confort de los pasajeros.

Los sistemas de amortiguación activos suelen ser menos robustos y fiables, especialmente en entornos adversos, debido a posibles fallos del hardware [1-2]. Los recientes avances en el desarrollo de nuevos materiales, junto con diversas herramientas experimentales, han renovado el interés por los sistemas pasivos. Estos sistemas ofrecen una opción más fiable y eficaz para aumentar la amortiguación, especialmente en la industria ferroviaria de alta velocidad [3]. De entre todas las metodologías pasivas para la reducción de vibraciones, los autores se han centrado en dos: la metodología basada en materiales viscoelásticos (VEM), y concretamente en la técnica CLD; y la metodología basada en elementos piezoeléctricos, y concretamente en parches conectados a circuitos en derivación.

La técnica CLD consiste en colocar una capa viscoelástica entre una capa rígida y la estructura base (Figura 1a). Ante un esfuerzo de flexión, las deformaciones por cizalladura predominan sobre las deformaciones normales, lo que permite a la capa viscoelástica disipar más energía, debido a la capacidad de las largas cadenas moleculares de dichos materiales viscoelásticos para convertir la energía de deformación mecánica en calor [4]. Esto da lugar a una capacidad de amortiguación significativamente mayor que los tratamientos de amortiguación de capa libre (aplicación directa de un material viscoelástico a la superficie de la estructura) [1, 2, 5]. Las técnicas de amortiguación pasiva con materiales viscoelásticos (principalmente CLD) se han utilizado ampliamente en la industria, especialmente en el sector del transporte: en la industria aeroespacial [3], en vehículos de transporte por carretera [6-7], y ampliamente en vehículos ferroviarios [2].

Las metodologías pasivas basadas en el uso de materiales piezoeléctricos, conocidos por su notable acoplamiento electromecánico y su excelente respuesta en frecuencia, también son prometedoras para mitigar las vibraciones en las estructuras [8]. Los materiales piezoeléctricos se basan en la generación de cargas eléctricas cuando se aplica una tensión mecánica (efecto piezoeléctrico directo), o en el efecto recíproco (efecto piezoeléctrico inverso). El uso de estos materiales como metodología pasiva para la minimización de vibraciones, utilizando el efecto piezoeléctrico directo, implica la conexión de circuitos electrónicos disipativos a los electrodos del transductor piezoeléctrico que se fija a la estructura [9-10] (Figura 1b). En este trabajo, los autores estudian la aplicación de dos de estos circuitos en derivación: los circuitos resistivos (R), en los que el elemento en derivación corresponde a una resistencia; y los circuitos inductivos o resonantes (RL), basados en una resistencia junto con una inductancia.

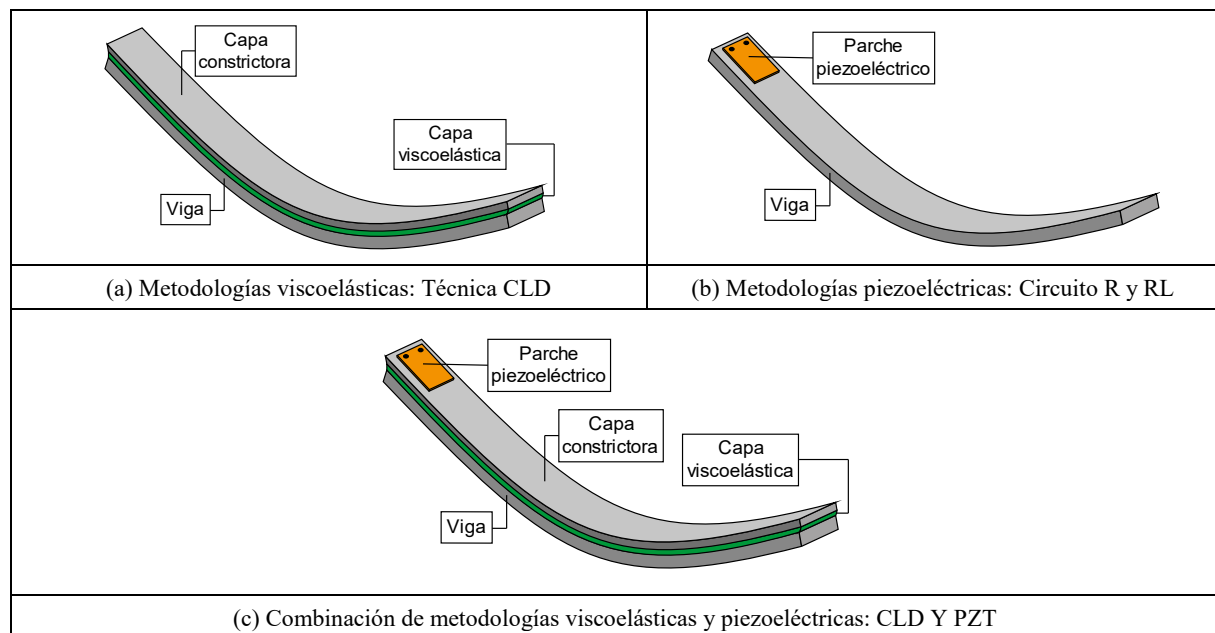


Figura 1: Técnicas utilizadas para el incremento del amortiguamiento.

Finalmente, se propondrá la combinación de ambas tecnologías (Figura 1c), con el objetivo de demostrar que la combinación de diferentes metodologías pasivas se posiciona como la mejor opción para minimizar las vibraciones en estructuras ligeras.

2. Metodología

2.1. Descripción de los especímenes

El espécimen de referencia consiste en una viga de aluminio de 292 mm de largo, 35 mm de ancho y 3 mm de espesor. Se trata de un espécimen con una geometría muy habitual en los trabajos con parches piezoeléctricos.

Se han estudiado dos tipos diferentes de coberturas CLD: CLD 2005 y CLD 4005, fabricadas por Heathcote Industrial Plastics. Ambos tipos presentan un VEM de 0,13 mm de grosor fabricado específicamente para proporcionar un factor de pérdida máximo y ser estable en el rango de frecuencias objetivo. Suponiendo temperaturas de ensayo típicas (en torno a 20 °C) y una frecuencia de vibración de 30 Hz, el factor de pérdida del viscoelástico se sitúa en torno a un valor de 1. La capa constrictora está fabricada en aluminio y tiene un grosor de 0,5 mm para el CLD 2005 y de 1 mm para el CLD 4005. Además de estudiar dos tipos diferentes de composiciones del CLD, también se estudiarán tres porcentajes de cobertura, todos ellos aplicados en el extremo sujeto de la viga: 25, 50 y 100 por ciento de cobertura.

En el caso de la técnica de amortiguación pasiva piezoeléctrica, se utilizarán parches piezoeléctricos modelo P-876 fabricados por Physik Instrumente (PI). El parche piezoeléctrico se colocará en el extremo empotrado de la viga. Estos parches se adherirán a la estructura utilizando el adhesivo epoxi Loctite EA 9466. Al igual que con el CLD, se estudiará la influencia de los distintos tipos de parches, principalmente en relación con su capacidad y fuerza de bloqueo: El parche P-876.A11, con una capacidad eléctrica de 150 nF y una fuerza de bloqueo de 90 N; el parche P-876.A12, con una capacidad eléctrica de 90 nF y una fuerza de bloqueo de 265 N; y, por último, el parche P-876.A15, con una capacidad eléctrica de 45 nF y una fuerza de bloqueo de 775 N.

En el caso de la combinación de ambas técnicas, el parche piezoeléctrico se adherirá a la capa constrictora del piezoeléctrico, como se muestra en la Figura 1c.

2.2. Banco de ensayos

Para la realización del Análisis Modal Experimental (EMA, de sus siglas en inglés) se ha establecido la condición de contorno empotrada libre. Esta condición de contorno se consigue mediante un dispositivo de sujeción, tipo “garra”, en el que la viga se sujeta por uno de sus extremos mediante una serie de tornillos, tal y como se puede observar en la Figura 2.

En relación con el esquema experimental, tanto el sistema de excitación como el de medida se muestran en la Figura 2. Atendiendo al sistema de excitación, el dispositivo se ha fijado a la mesa deslizante del vibrador modelo V5344 fabricado por Data Physics Corporation con una capacidad de hasta 53 kN. El vibrador está conectado a la mesa por medio de un acoplador fijado al cabezal de éste cuando se encuentra en posición horizontal. El vibrador está controlado por un Abacus 70310, también de Data Physics Corporation. Este controlador se alimenta con la información proporcionada por un acelerómetro KISTLER 8702B25 con una sensibilidad nominal de 202,08 mV/g. La señal que llega al excitador ha sido amplificada mediante un amplificador a la salida del controlador. La señal de excitación consiste en un ruido blanco de hasta 0,0001 g²/Hz en un ancho de banda entre 25 y 40 Hz.

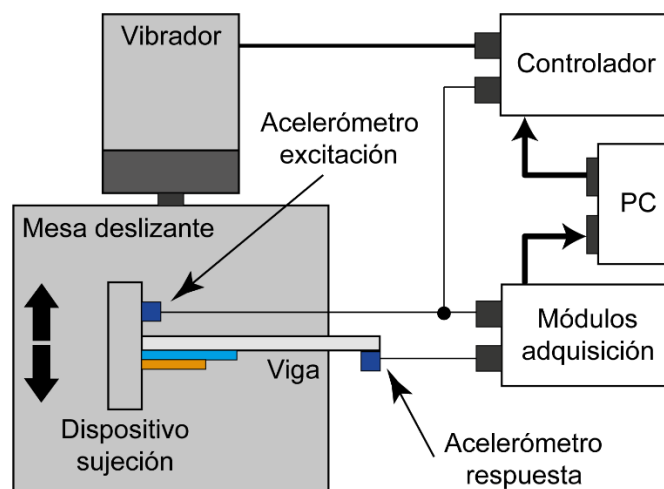


Figura 2: Banco de ensayos.

En relación con el sistema de medición, hay dos acelerómetros (uno de ellos corresponde al utilizado para controlar el vibrador). El acelerómetro de respuesta está colocado en el extremo libre de la viga. Corresponde a un modelo 352C22 del fabricante PCB Piezotronics con una sensibilidad nominal de 10 mV/g. Las señales del sensor se registraron durante 90 segundos a una frecuencia de muestreo de 200 Hz con un chasis National Instruments cDAQ-9179 equipado con módulos de adquisición de datos NI-9234 adecuados para sensores piezoeléctricos de electrónica integrada (IEPE).

3. Resultados y discusión

En primer lugar, se analizan los resultados obtenidos mediante la técnica de amortiguamiento pasivo CLD. La influencia del porcentaje de cobertura de la viga para un espécimen CLD 2005 se muestra en la Figura 3 para tres casos diferentes (25, 50 y 100 % de cobertura desde el extremo empotrado de la viga) en comparación con la viga de referencia sin ningún tratamiento. Los resultados se muestran en términos de la función de respuesta en frecuencia (FRF) entre la aceleración medida en el extremo libre y la entrada de aceleración aleatoria del extremo empotrado.

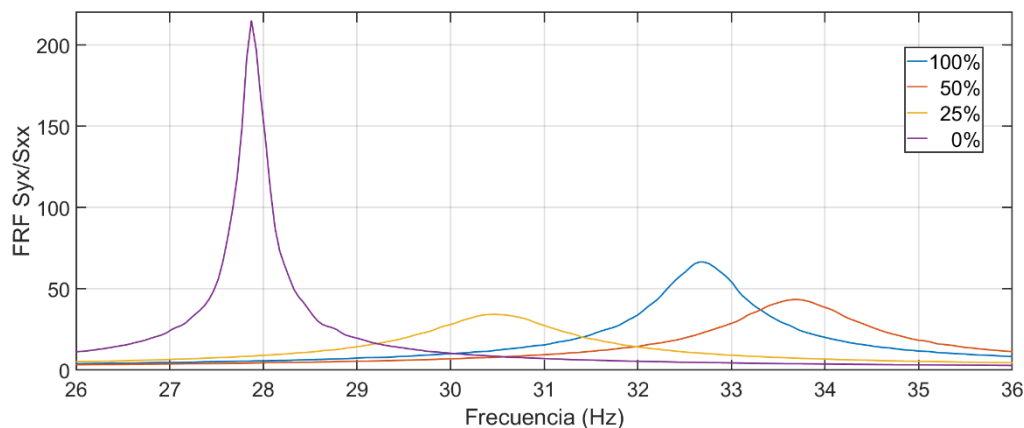


Figura 3: Estudio del porcentaje de cobertura CLD del tipo 2005.

Los resultados obtenidos son muy prometedores, ya que es posible conseguir aproximadamente una reducción del 84% en el pico de la FRF con sólo una cobertura del 25%. De hecho, coberturas más altas conducen a reducciones de vibración más bajas: 79% para un porcentaje de cobertura del 50%, y 69% para el caso de cobertura total. Esto se debe a que el mayor efecto disipador del material viscoelástico se obtiene cuando se coloca cerca de la zona con mayores deformaciones de la viga, es decir, cerca del extremo empotrado. Aumentar el porcentaje de cobertura de CLD en el resto de la viga, y especialmente cerca del extremo libre, presenta un efecto de masa añadida que conduce a una reducción de la amortiguación modal.

La Figura 4 muestra las FRF de los dos tipos diferentes de CLD (2005, con la capa constrictora más fina; y 4005, con la capa constrictora más gruesa) con la cobertura óptima del 25%. Como puede observarse, existe una mayor reducción de la amplitud de vibración (89%) para el tipo de CLD con la capa constrictora más gruesa (especimen 4005). Un aumento de la inercia del área de la sección transversal de la capa constrictora mejora la capacidad de amortiguación del VEM, pero también presenta ciertas desventajas, como un mayor peso y rigidez (desplazamiento neto de la frecuencia natural a valores más altos) y un coste más elevado.

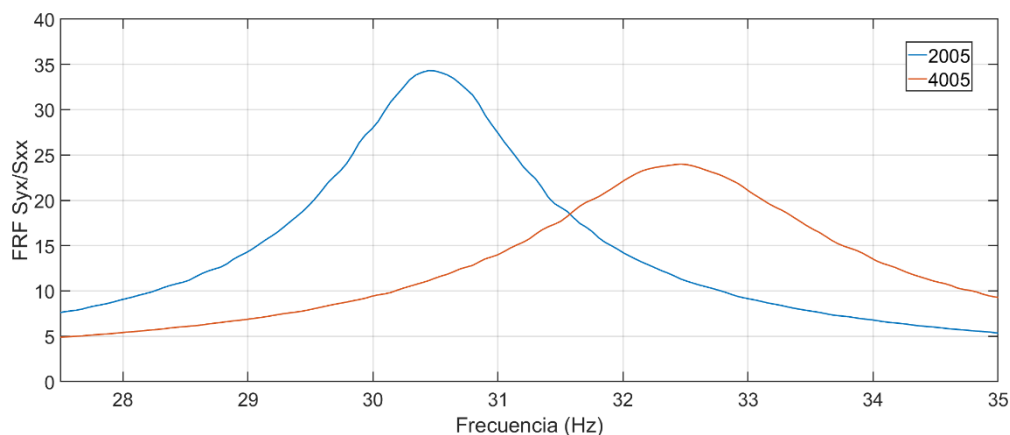


Figura 4: Estudio de los tipos de CLD para una cobertura del 25%.

A continuación, se analizan los resultados del incremento del amortiguamiento utilizando, de forma pasiva, parches piezoeléctricos y circuitos en derivación. Debe tenerse en cuenta que el parche se ha colocado siempre en el extremo empotrado de la viga, donde se producen las mayores deformaciones y, por tanto, se maximiza el acoplamiento electromecánico del material piezoeléctrico. Para ello, se han considerado un circuito resistivo (circuito R-shunt) y un circuito inductivo (circuito RL-shunt). La optimización de ambos circuitos se basa en el trabajo de Heuss et al [11].

La resistencia óptima del circuito R-shunt se puede obtener a partir de la expresión

$$R_{R-opt} = \frac{2}{C_{pi}^S \omega_n^E} \sqrt{\frac{1}{4 + 2K_{ij}^2}} \quad (1)$$

donde C_{pi}^S es la capacidad inherente del piezoeléctrico a voltaje constante, ω_n^E es la frecuencia de resonancia del sistema con el elemento piezoeléctrico en cortocircuito, ω_n^D es la frecuencia de resonancia del sistema con el elemento piezoeléctrico en circuito abierto, y K_{ij} es el coeficiente de acoplamiento electromecánico generalizado, expresado como

$$K_{ij} = \sqrt{\frac{\omega_n^{D^2} - \omega_n^{E^2}}{\omega_n^{E^2}}} \quad (2)$$

Se ha de mencionar que ha sido necesario realizar un ajuste experimental de la resistencia para obtener el pico mínimo de FRF.

Del mismo modo, la resistencia y la inductancia teóricas óptimas del circuito RL-shunt se han determinado mediante las expresiones

$$R_{RL-opt} = \frac{2}{C_{pi}^S \omega_n^E} \sqrt{\frac{1}{\frac{2}{K_{ij}^2} + 4 + 2K_{ij}^2}} \quad (3)$$

$$L_{RL-opt} = \frac{2}{C_{pi}^S (\omega_n^E)^2} \frac{1}{1 + K_{ij}^2} \quad (4)$$

De nuevo, los valores de resistencia y, sobre todo, de inductancia tuvieron que ser ajustados experimentalmente debido, principalmente, a las impedancias parásitas inherentes al circuito electrónico que genera la inductancia sintética [12].

La Figura 5 muestra los resultados para ambos circuitos de derivación optimizados. La máxima reducción se consigue con el circuito RL-shunt, proporcionando una reducción del 92% del pico de la FRF; por el contrario, el circuito R-shunt obtiene una reducción del 57%, nada despreciable pero lejos de las mejoras ofrecidas por el RL-shunt.

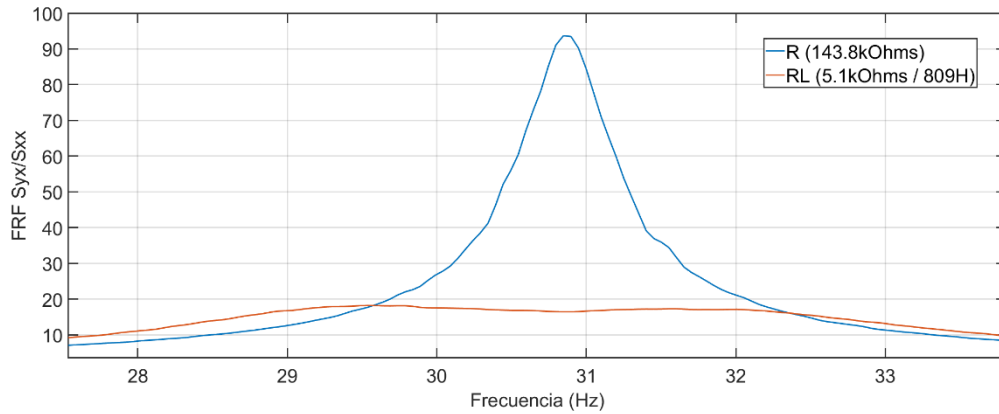


Figura 5: Estudio del tipo de circuito de derivación para un parche piezoeléctrico A15.

La Figura 6 muestra la influencia de las características piezoeléctricas del parche, manteniendo el uso de un circuito RL-shunt óptimo. El parche piezoeléctrico que proporciona los mejores resultados es el parche A15 (el que corresponde a una menor capacidad eléctrica pero una mayor fuerza de bloqueo). Los porcentajes de reducción obtenidos son 83% para el parche A11, 90% para el parche A12 y 92% para el parche A15.

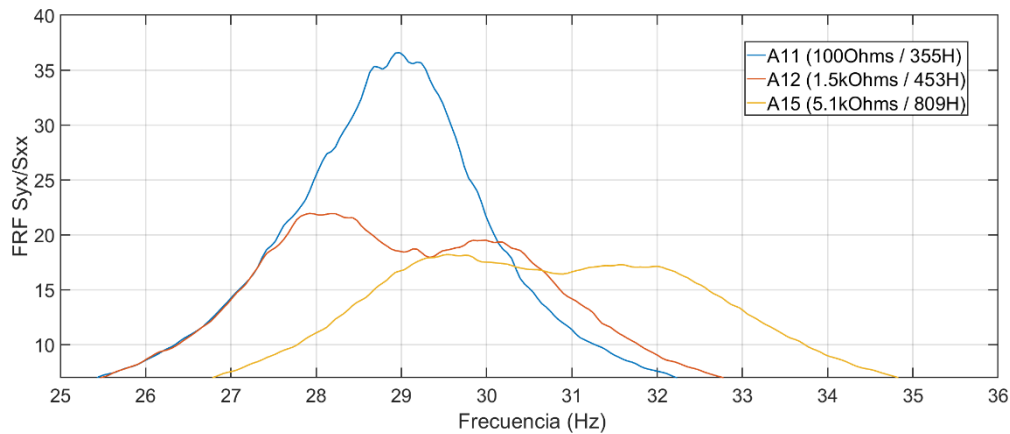


Figura 6: Estudio del tipo de parche piezoeléctrico para un circuito RL-shunt óptimo.

A partir de los resultados anteriores, las configuraciones óptimas para ambas técnicas por separado y en combinación se muestran en la Figura 7. Estas configuraciones son:

- Técnica CLD: 25% de cobertura de CLD 4005.
- Técnica PZT: Circuito RL-shunt ($R=5.1$ kOhms y $L=809$ H) con un parche piezoeléctrico A15.
- Técnica híbrida CLD & PZT: cobertura del 25% de CLD 4005 y circuito RL-shunt ($R=5.1$ kOhms y $L=710$ H) con un parche piezoeléctrico A15.

La Figura 7 muestra los mejores resultados obtenidos con la combinación de ambas técnicas. Se ha obtenido una reducción máxima del pico del 95% al combinar ambas metodologías, pero los resultados son casi tan buenos como los obtenidos por separado. De hecho, su uso por separado también supone una simplificación de la configuración pasiva aplicada a la viga. Las reducciones de FRF obtenidas son del 92% cuando se utiliza un parche piezoeléctrico y su circuito RL-shunt óptimo, y del 89% cuando se utiliza exclusivamente la configuración CLD óptima.

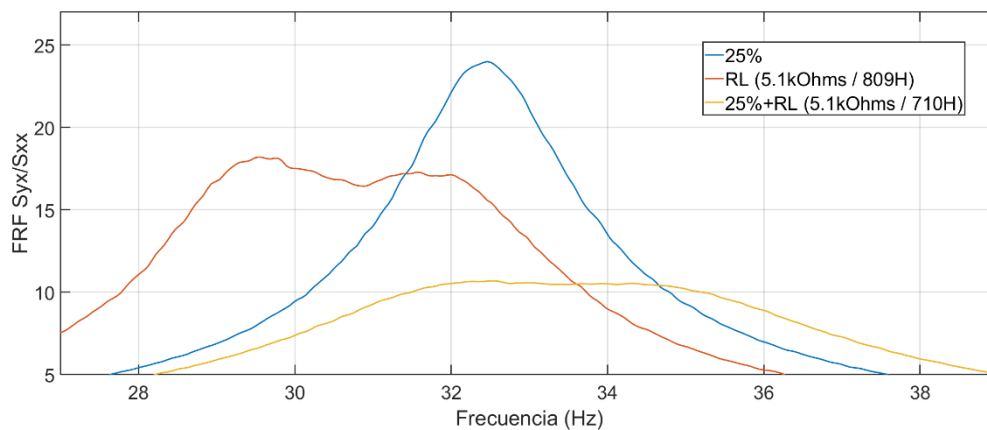


Figura 7: Estudio de la combinación CLD & Parche piezoeléctrico para un espécimen con CLD 2005 y un parche piezoeléctrico A15.

La Tabla 1 muestra un resumen de todos los resultados obtenidos en este estudio.

Tabla 1: Resumen de resultados.

Técnica de amortiguación pasiva	Variable de estudio	Configuración	Pico FRF	Reducción (%)
EN BLANCO	-	-	215.07	-
CLD	Porcentaje de cobertura	100% CLD 2005	66.50	69
		50% CLD 2005	43.46	79
		25% CLD 2005	34.32	84
	Tipo de CLD	25% CLD 2005	34.32	84
		25% CLD 4005	24.00	89
PZT	Tipo de circuito shunt	R-shunt / A15	93.70	57
		RL-shunt / A15	18.21	92
	Tipo de parche	RL-shunt / A15	18.21	92
		RL-shunt / A12	21.95	90
		RL-shunt / A11	36.58	83
CLD + PZT	-	25% CLD 4005 RL-shunt / A15	10.69	95

4. Conclusiones

Los resultados experimentales obtenidos demuestran que las técnicas pasivas son una gran opción para minimizar las vibraciones en estructuras ligeras y que la combinación de estas técnicas permite conseguir una mitigación casi total.

En cuanto a la técnica pasiva CLD, cubrir toda la estructura objetivo no es la mejor opción. Existe un porcentaje de cobertura óptimo con el que se consiguen los mejores resultados. También se ha observado que cuanto mayor espesor tiene la cobertura CLD, mejores son los resultados en términos de reducción de la amplitud de las vibraciones. Así, con una probeta en la que se ha optimizado el porcentaje de cobertura (25%) y con el mayor de los espesores de capa constrictora (CLD 4005), se ha conseguido reducir el pico de la FRF en un 89%.

En relación con la técnica pasiva utilizando parches piezoeléctricos conectados a un circuito shunt, se concluye que el circuito RL-Shunt produce un comportamiento ligeramente mejor (en torno a un 3% mejor) en comparación con las mejoras obtenidas para el mejor caso de la técnica CLD. La principal ventaja de la técnica pasiva CLD reside en el hecho de que no se necesitan circuitos eléctricos, por lo que no hay necesidad de alimentación externa, además de ser una configuración más robusta. Por el contrario, los CLD ocupan más espacio sobre la viga e implican añadir más masa y rigidez a la misma. En la misma línea, no podemos pasar por alto la reducción obtenida por un simple circuito R-shunt, que consigue una reducción del 57% simplemente añadiendo una resistencia entre los terminales del parche piezoeléctrico.

Basándose en todos estos resultados, cabría esperar que se obtuvieran mejores resultados con la combinación de estas dos técnicas. De hecho, se consigue una reducción máxima del 95%, pero la mejora obtenida es algo pobre en comparación con las reducciones de vibración conseguidas individualmente (89% para el mejor CLD y 92% para el mejor parche piezoeléctrico).

Por lo tanto, los autores concluyen que ambas técnicas pasivas de reducción de la vibración, por separado, reducen significativamente la amplitud de la vibración, y que la combinación de ambas sería la mejor opción para conseguirlo. No obstante, el uso de una técnica individual o la combinación de ambas dependerá de los requisitos y posibilidades de cada espécimen considerado (peso, volumen ocupado, posibilidades de alimentación externa y cualquier otro criterio de diseño).

5. Agradecimientos

Este trabajo está enmarcado dentro de dos proyectos: PID2020-113747RB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, y el proyecto SBPLY/23/180225/000172, financiado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Los autores también desean mostrar su agradecimiento a la empresa “Heathcote Industrial Plastics” por la donación de los parches CLD para realizar este estudio.

6. Referencias

- [1] Shen I. Y., “Hybrid damping through intelligent constrained layer treatments”, *Journal of Vibration and Acoustics* **116**, No. 3, 341-349 (1994)
- [2] Fan R., Meng G., Yang J., He C., “Experimental study of the effect of viscoelastic damping materials on noise and vibration reduction within railway vehicles”, *Journal of Sound and Vibration* **319**, No. 1, 58-76 (2009)
- [3] Rao M. D., “Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes”, *Journal of Sound and Vibration* **262**, No. 3, 457-474 (2003)
- [4] Johnson C. D., “Design of passive damping systems”, *Journal of Mechanical Design* **117**, No. B, 171-176 (1995)
- [5] Plunkett R., Lee C. T., “Length optimization for constrained viscoelastic layer damping”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **48**, 150-161 (1970)
- [6] Furukawa M., Gerges S., Neves M., Coelho B., “Analysis of structural damping performance in passenger vehicle chassis”, in *Proceedings of the 2010 International Congress on Sound and Vibration*, El Cairo (2010)
- [7] Danti M., Vige D., Nierop G., “Modal methodology for the simulation and optimization of the free-layer damping treatment of a car body”, *Journal of Vibration and Acoustics* **132**, No. 2 (2010)
- [8] Marakakis K., Tairidis G., Koutsianitis P., Stavroulakis G., “Shunt piezoelectric systems for noise and vibration control: A review”, *Frontiers in Built Environment* **5**, No. 64 (2019)
- [9] Forward R., “Electronic damping of vibrations in optical structures”, *Applied Optics* **18**, 690-697 (1979)
- [10] Hagood N., Von Flotow A., “Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks”, *Journal of Sound and Vibration* **146**, No. 2, 243-268 (1991)
- [11] Heuss O., Salloum R., Mayer D., Melz T., “Tuning of a vibration absorber with shunted piezoelectric transducers”, *Archive of Applied Mechanics* **86**, 1715-1732 (2016)
- [12] Gripp J., Rade D., “Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review”, *Mechanical Systems and Signal Processing* **112**, 359-383 (2018)