

INVESTIGACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE RUIDO DE ELEMENTOS Y COMPONENTES DE CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA

José Ignacio Riesco García¹, Ángel Arenaz Gombau²,
Ana Esther Espinel Valdivieso³, Marco Lora Espinel⁴

¹ Audiotec Ingeniería Acústica S.A., Valladolid, España, ignacio.riesco@audiotec.es

² Audiotec Ingeniería Acústica S.A., Valladolid, España, angel.arenaz@audiotec.es

³ Audiotec Ingeniería Acústica S.A., Valladolid, España, ana.espinel@audiotec.es

⁴ Audiotec Ingeniería Acústica S.A., Valladolid, España, marco.lora@audiotec.es

Resumen

La construcción industrializada desplaza el riesgo acústico desde la obra hacia la fase de diseño y validación de prototipos.

Audiotec, como agente del sector de la construcción, trabaja en el diseño acústico estandarizado y flexible de componentes y sistemas de la construcción industrializada. El conocimiento adquirido bajo el modelo de construcción tradicional nos permite enfocar el diseño acústico industrializado poniendo el foco en los puntos más críticos, como son el mayor control de estanqueidad, el diseño de pasos de instalaciones, el diseño de juntas o la transmisión por flancos estructurales.

En este trabajo se analizan los principales riesgos acústicos de la construcción industrializada y se proponen recomendaciones y soluciones para la mejora en el diseño de juntas, la reducción de la rigidez estructural o para minimizar la transmisión entre módulos.

Palabras Clave: Construcción industrializada (CI), puentes acústicos, resonancias, transmisión por flancos.

1 Requisitos en materia de acústica de la construcción industrializada

El Documento Básico de Protección frente al Ruido (CTE DB-HR) supuso un cambio crítico al regular las exigencias de aislamiento acústico en base a las prestaciones del edificio terminado ($D_{nT,w}$ y $L'_{nT,w}$), y no solo a los índices de aislamiento de laboratorio de los componentes individuales (R_w). Este enfoque *in situ* penaliza gravemente las desviaciones de ejecución, la falta de control en obra y las transmisiones indirectas o por flancos, habituales en la construcción tradicional.

En este escenario, la construcción industrializada (CI) ofrece una ventaja cualitativa. Al trasladar el grueso del proceso constructivo a un entorno de fábrica automatizado, se minimiza la incertidumbre de la puesta en obra.

La repetitividad de los procesos industriales permite:

- Mitigación sistemática de puentes acústicos: El sellado de juntas, la colocación de bandas elásticas perimetrales y el posicionamiento de soluciones acústicas en patios de

instalaciones se realizan bajo protocolos de control de calidad industrial, reduciendo drásticamente la dispersión estadística de los resultados *in situ*.

- Modelización predictiva fiable: Las herramientas de cálculo del DB-HR (tanto el método simplificado como el general basado en la UNE-EN ISO 12354) dependen de la homogeneidad de los encuentros. La estandarización de los nudos en la CI dota de mayor fiabilidad a los modelos predictivos de proyecto.

Dado que los sistemas industrializados (modulares volumétricos, paneles de entramado ligero o cerramientos sintonizados) recurren con frecuencia a soluciones no tradicionales, su encaje en el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE es limitado. Por ello, la justificación documental de sus prestaciones acústicas y dinámicas debe instrumentarse a través de evaluaciones técnicas de idoneidad:

- Documento de Idoneidad Técnica (DIT): El DIT evalúa la idoneidad de empleo de un sistema en el ámbito nacional. En materia acústica, el DIT es la herramienta clave para certificar que un conjunto industrializado cumple las exigencias del DB-HR, aportando los valores de los índices acústicos de los componentes y, críticamente, validando las secciones de amortiguación de vibraciones en los apoyos estructurales.
- Evaluación Técnica Europea (ETE): Para sistemas con proyección internacional, la ETE constituye el documento de evaluación armonizado en el marco del Reglamento de Productos de Construcción, siendo la vía reglamentaria para la obtención del Mercado CE. La ETE declara de forma transparente las prestaciones acústicas del sistema bajo estándares europeos (EAD).
- El valor del DIT plus: Cuando un fabricante industrializado opta por la proyección europea mediante una ETE, se encuentra frecuentemente con la necesidad de demostrar la compatibilidad específica de sus valores con las exigencias del código técnico español. El DITplus se consolida aquí como el instrumento idóneo, ya que complementa la ETE evaluando de forma expresa la aptitud de uso del sistema frente a los requisitos de aislamiento a ruido aéreo, de impactos y de vibraciones exigidos por el CTE DB-HR.

En conclusión, la integración de ensayos de laboratorio tipo y la certificación mediante DIT/ETE transforman la incertidumbre acústica de la obra en un parámetro prestacional cerrado y garantizado desde la fase de diseño de la solución industrializada.

2 Riesgos tecnológicos de la edificación industrializada en materia de acústica

La construcción industrializada introduce innegables ventajas en el control de procesos; sin embargo, desde la perspectiva de la ingeniería acústica, traslada el riesgo desde la fase de ejecución artesanal hacia la fase de diseño de producto, tolerancia dimensional y obsolescencia sistémica. La sustitución del hormigón y la mampostería tradicional por entramados y células modulares ligeras genera una serie de vulnerabilidades tecnológicas específicas que se analizan a continuación.

2.1 Riesgo de subestimación de las bajas frecuencias

Uno de los principales riesgos tecnológicos de los sistemas industrializados ligeros es su comportamiento deficiente en el rango de bajas frecuencias (especialmente por debajo de los 100Hz. Los índices de aislamiento global regulados por el CTE DB-HR se basan en curvas de

ponderación que, en ocasiones, no penalizan suficientemente las frecuencias muy bajas. En consecuencia, un sistema puede cumplir formalmente con los requisitos del código técnico y, sin embargo, generar insatisfacción habitacional debido a la transmisión de ruidos en bandas de frecuencia que los elementos ligeros no logran atenuar.

El acoplamiento de modos de vibración y las transmisiones de baja frecuencia pueden ocasionar pérdidas de entre 8 y 15 dB.

2.2 Tolerancias dimensionales, rigidez de juntas y puentes acústicos

En la construcción tradicional, la continuidad de los materiales actúa como una barrera frente al ruido. En la CI, el edificio se convierte en un conjunto de componentes donde la junta es el elemento crítico. Los riesgos tecnológicos asociados a la interfaz entre componentes incluyen:

- Acoplamiento mecánico por sobreapriete o pérdida de elasticidad: El uso de fijaciones mecánicas rígidas (pernos, cartelas soldadas) sin la interposición de bandas elásticas calibradas anula el principio de desolidarización. Si la banda elástica se calcula incorrectamente y sufre un fenómeno de sobrecompresión, pierde sus propiedades resilientes a medio plazo, transformando una unión elástica en un puente acústico estructural rígido.
- Desviaciones de montaje (tolerancias dimensionales): Las holguras de montaje, inevitables en la puesta en obra de grandes componentes volumétricos, pueden generar pasos de aire residuales. Una discontinuidad o fisura milimétrica en el sellado de una junta entre dos módulos puede degradar el aislamiento a ruido aéreo del conjunto, arruinando las prestaciones ensayadas en el laboratorio.

Los huecos en las juntas de montaje pueden producir reducciones del aislamiento a ruido aéreo superiores a 10 dB, mientras que los puentes acústicos y la transmisión por flancos, de 4 a 8 dB.

2.3 Flanqueo bidireccional en estructuras modulares

La repetición geométrica en los sistemas modulares volumétricos genera espacios intersticiales (cámaras de aire entre módulos contiguos y superpuestos). Si bien estas cámaras potencian el efecto masa-muelle-masa, introducen el riesgo tecnológico del llamado flanqueo por cavidad acoplada.

Si las paredes internas de estos espacios no reciben un tratamiento absorbente adecuado, la cavidad puede actuar como una caja de resonancia. El ruido transmitido por un usuario en un módulo puede excitar el aire de la cavidad intersticial, transmitiendo el sonido horizontal o verticalmente hacia recintos distantes, invalidando los cálculos predictivos tradicionales.

El efecto cavidad puede ocasionar pérdidas acústicas de entre 5 y 12 dB.

2.4 Dependencia de la cadena de suministro y sustitución de componentes

La CI se basa en soluciones de catálogo validadas mediante ensayos tipo en laboratorios acreditados. Esto introduce un riesgo tecnológico de carácter operativo: la rigidez de sustitución. Si durante la fase de fabricación o debido a tensiones en la cadena de suministro se sustituye una banda elástica, un tipo de placa de yeso laminado o un núcleo aislante por otro de apariencia similar pero distintas propiedades dinámicas, la certificación acústica global del sistema (DIT o ETE) pierde su validez técnica y el comportamiento *in situ* se vuelve impredecible.

3 El ruido y las vibraciones en los sistemas industrializados: problemas y soluciones

Cada sistema y subsistema constructivo industrializado que forma parte del edificio terminado presenta riesgos acústicos, tanto a nivel individual, como en el conjunto final del edificio.

El riesgo crítico en estos entornos no reside únicamente en el comportamiento aislado de cada componente, sino en la compatibilidad acústico-mecánica entre sistemas de diferente naturaleza. Cuando coexisten subsistemas de distintas rigideces, densidades y módulos de elasticidad (por ejemplo, hibridaciones acero-madera o paneles ligeros sobre cimentaciones), las interfaces se convierten en discontinuidades de impedancia que actúan como puentes térmicos y acústicos si no se diseñan bajo criterios de disipación energética.

3.1 Cimentaciones de zapatas y vigas de atado

El riesgo principal radica en la alteración de la impedancia mecánica del encuentro suelo-estructura y la recepción de la estructura portante.

Las uniones secas o semi-secas entre zapatas y vigas de atado industrializadas carecen de la rigidez rotacional de las cimentaciones ejecutadas *in situ*. Esto puede generar, si no se hace el tratamiento adecuado, discontinuidades que propagan de forma eficiente las vibraciones de baja frecuencia hacia la superestructura.

El punto crítico de este sistema constructivo es la interfaz entre la cimentación (hormigón de alta masa y rigidez) y estructuras industrializadas ligeras (madera o acero). Al pasar de un medio de alta impedancia a uno de baja impedancia, las vibraciones estructurales pueden amplificarse en los arranques de los pilares o muros portantes.

Para evitar estos problemas se deben emplear materiales aislantes o atenuadores acoplados a la solución constructiva.

3.2 Estructuras

En las estructuras prefabricadas de hormigón, el riesgo acústico se concentra en los nodos de conexión. Si las juntas entre paneles o pórticos se resuelven mediante conexiones metálicas atornilladas directas, se crean caminos de transmisión estructural. En estos sistemas industrializados, el comportamiento acústico estará determinado en gran medida por el adecuado diseño de las juntas y conexiones.

Las estructuras de madera, al ser ligeras, presentan problemas a bajas frecuencias (ruido de pisadas). El gran riesgo de compatibilidad ocurre al conectar forjados de madera con muros de hormigón o núcleos de ascensor: la diferencia de rigidez flexional exige bandas acústicas desolidarizantes.

Para el caso de las estructuras de acero, la alta rigidez y nula amortiguación interna del acero facilita la propagación de ondas estructurales a gran distancia. Presenta una grave incompatibilidad con los paneles de cerramiento si no se interponen bandas de rotura de puente acústico, pues las frecuencias críticas del acero pueden excitar a las placas de yeso o tableros de fachada, induciendo el fenómeno de resonancia.

Las soluciones empleadas para evitar estos problemas pasan por el desacoplamiento estructural mediante bandas y silentblocks, conexiones elásticas y juntas de dilatación y separación elástica.

3.3 Fachadas y cubiertas

Los sistemas de envolvente modular (paneles sándwich, fachadas de entramado o módulos volumétricos de fachada) presentan riesgos asociados a sus uniones dinámicas:

Las tolerancias de montaje en obra generan holguras perimetrales que penalizan el aislamiento a ruido aéreo exterior. Asimismo, muchos paneles ligeros sufren caídas de aislamiento en el rango de frecuencias del tráfico urbano debido al efecto masa-muelle-masa de sus cámaras internas.

Las fachadas industrializadas deben anclarse a la estructura portante (sea de hormigón, acero o madera). Si el sistema de fijación es completamente rígido para absorber las cargas de viento, se produce una incompatibilidad acústica, pues el ruido estructural del edificio (ascensores, climatización, etc.) viaja hacia los paneles de fachada, y la envolvente exterior puede amplificar el sonido. Se requiere compatibilidad entre los movimientos estructurales por deformación y la flexibilidad del sellado acústico.

Para evitar problemas de ruido en el edificio terminado, las soluciones de fachada se deben diseñar y fabricar con fijaciones flotantes o elásticas y con un sellado entre paneles multicapa.

3.4 Particiones interiores

Las divisorias modulares o sistemas de tabiquería seca autoportante ensamblada *off-site* se enfrentan al problema de la transmisión por flancos estructurales.

La fijación rígida de canales metálicos a los forjados transmite la energía vibratoria del suelo directamente a las placas de la partición, radiando ruido al recinto protegido. Por este motivo se deben evitar las fijaciones rígidas, intercalando bandas elásticas en la fase de diseño de los sistemas.

Existe una severa incompatibilidad dimensional y geométrica entre las flechas diferenciales de los forjados (especialmente en grandes luces de acero o madera) y la rigidez de las particiones interiores prefabricadas. Si el forjado de techo deforma más de lo previsto, aplasta mecánicamente la partición interior. Este acoplamiento forzado destruye la holgura acústica superior, provocando una transmisión directa de ruidos de impacto del piso superior a través de la partición, además de fisurar los sellados acústicos de masilla elastomérica en los encuentros.

Las soluciones empleadas para que el comportamiento acústico de los sistemas sea el adecuado pasan por el diseño de estructuras dobles independientes, por los desacoplamientos perimetrales con bandas elásticas o por una correcta configuración de placas mediante el empleo de placas de alta densidad y láminas viscoelásticas intermedias.

3.5 Cuartos húmedos, patinillos e instalaciones

Los módulos de baño y cocina prefabricados, al introducir un módulo rígido exento dentro de la estructura principal, genera un riesgo crítico de transmisión por flancos. Las vibraciones de descargas, griferías y pasos se transmiten a la estructura si el módulo no está suspendido elásticamente.

La industrialización de patinillos (módulos técnicos verticales) exige que las tuberías y conductos vengan preinstalados de fábrica. La incompatibilidad surge en las conexiones de obra entre el módulo vertical y las redes horizontales de las viviendas. Si los ejes geométricos no alinean perfectamente debido a tolerancias constructivas, las tuberías se fuerzan mecánicamente,

entrando en contacto rígido con las paredes del patinillo o los forjados. Esto anula las abrazaderas de fábrica, generando puentes acústicos que propagan el ruido de fluidos y golpes de ariete de forma solidaria por todo el edificio.

4. Nuevas tecnologías e I+D para la mitigación de patologías acústicas en la construcción industrializada

La construcción industrializada adolece de limitaciones físicas intrínsecas debido a la a menudo reducción de la masa de sus componentes y a la proliferación de interfaces de montaje secas. Por ello, las líneas de I+D actuales se centran en el control dinámico de la energía mediante sistemas resonantes locales, materiales inteligentes con cambio de fase o propiedades adaptativas y geometrías variables. El objetivo es resolver de manera simultánea los fallos por puentes acústicos, transmisiones por flancos, efectos cavidad y resonancias.

Las principales líneas de investigación abiertas para evitar los errores dimensionales y las tolerancias de montaje en obra son las siguientes:

- Materiales de cambio de fase (PCM): absorción de vibraciones y mejora aislamiento acústico;
- Aerogeles infiltrados en matrices de fibras;
- Polímeros autorreparables que evitan la degradación mecánica, la aparición de grietas y la pérdida de estanqueidad;
- Juntas neumáticas con tecnología mecánica activa;
- Juntas con sensores integrados (micrófonos y acelerómetros).

Con respecto a los trabajos en curso para evitar problemas de resonancias y efectos cavidad, algunas de las líneas de investigación abiertas son:

- Amortiguadores de vibración;
- Diseños de geometría variable;
- Cavidades de geometría no paralela;
- Paneles microperforados;
- Resonadores de Helmholtz integrados.

Para evitar los puentes acústicos y la transmisión por flancos, algunas de las investigaciones se centran en las siguientes líneas:

- Conectores Estructurales Desolidarizados (Uniones Híbridas Metal-Elastómero);
- Metamateriales para ruptura de puente acústico.

5 Conclusiones

La construcción industrializada traslada gran parte del proceso constructivo a un entorno de fábrica automatizado, minimizando la incertidumbre de la puesta en obra. Esto supone que, desde la perspectiva de la ingeniería acústica, los esfuerzos se deban de centrar fundamentalmente en la fase de diseño y control dimensional.

La sustitución de sistemas constructivos de gran masa por soluciones modulares y entramados más ligeros, unido a las particularidades del montaje en obra de los distintos elementos y componentes, introduce vulnerabilidades tecnológicas específicas, como los huecos en las juntas

de montaje, las resonancias, el efecto cavidad, los puentes acústicos y la transmisión por flancos, que han de ser convenientemente tratados.

Se han realizado mediciones acústicas y comparativas para analizar el impacto de las debilidades tecnológicas anteriormente citadas, y los problemas derivados por la falta de masa, por los puentes estructurales o por las holguras debidas a tolerancias o mala ejecución en obra pueden ocasionar una pérdida de rendimiento que puede oscilar entre los 10 y los 25 dB.

Garantizar el éxito acústico de la construcción industrializada requiere que todos los agentes implicados apuesten por la I+D+i. Este esfuerzo debe orientarse en una doble dirección: perfeccionar el diseño de los componentes prefabricados y adoptar un enfoque integral del edificio terminado. Solo así se podrá compatibilizar el comportamiento estructural y sus deformaciones con las exigencias de hermeticidad, control de la estanqueidad y desacoplamiento de impedancias.

6 Referencias

- [1] Smith, R. (2020). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. John Wiley & Sons.
- [2] Hopkins, C. (2012). *Sound Insulation in Buildings*. Routledge.
- [3] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana (España). Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HR: Protección frente al ruido (DB-HR). Versión con comentarios del Ministerio.
- [4] Ljunggren, F., & Ågren, A. (2011). Potential for improving sound insulation in lightweight wooden buildings at low frequencies. *Applied Acoustics*, 72(4), 135-140.
- [5] Schoenwald, S., Tröbs, H., & Scholl, W. (2013). Flanking transmission of lightweight modular structures. *Proceedings of Meetings on Acoustics, ICA 2013, Montreal, Canada*.
- [6] Caniato, M., Marzi, A., & Schmid, C. (2021). Acoustic binder performance of elastic interlayers in prefabricated and modular construction. *Construction and Building Materials*, 273, 121–134.
- [7] Díaz, C., & Pedrero, A. (2023). *Acústica arquitectónica y de la edificación: Modelos de predicción y control de flancos*. Editorial Síntesis.
- [8] Pérez-Galicia, J., & Alba, J. (2024). Desafíos estructurales y acústicos en la hibridación de sistemas constructivos off-site: Madera, acero y hormigón. En *Actas del Congreso Internacional de Industrialización de la Edificación (CIIE 2024)* (pp. 112–125). Getafe, España.