

MODELADO SEA DE COMPONENTES ESTRUCTURALES FERROVIARIOS Y PREDICCIÓN ACÚSTICA DE UN TREN DE ALTA VELOCIDAD

PACS: 43.50.Lj

Palacios Higuera, J. Ignacio^{1,2}; Alarcón Rovira, Gabriel¹; Romeu Garbí, Jordi²

¹ SENER, Ingeniería y Sistemas, S.A.;

Provença, 392.

08025 Barcelona.

Tel. (34) 932 283 355. Fax (34) 932 283 322,

E-mail: [\[jignacio.palacios;gabriel.alarcon\]@sener.es](mailto:[jignacio.palacios;gabriel.alarcon]@sener.es)

² LEAM-UPC

Colom, 11.

08222 Terrassa.

Tel. (34) 937 398 061. Fax (34) 937 398 101

E-mail: jordi.romeu@upc.edu

ABSTRACT

Statistical Energy Analysis (SEA) allows to make predictions of vibro-acoustic behaviour since the very first steps of the product development. This method requires a limited set of geometrical and physical characteristics. The translation of physical description into SEA parameters is the most critical step in SEA modelling. Each software owns its internal methodology for obtaining SEA parameters, but many times it is both unknown by the user and not documented.

In this work, SEA parameters calculation method of two software will be evaluated with respect to single railway equipment and for the prediction of noise levels in a High-Speed train.

RESUMEN

El método Estadístico de Energía (SEA) permite realizar predicciones del comportamiento vibro-acústico desde las primeras fases del desarrollo del producto. Este método requiere solamente un conjunto reducido de dimensiones y características físicas. El paso más crítico en el modelado SEA consiste en el cálculo de los parámetros SEA a partir de la descripción física. Cada software posee una metodología propia para el cálculo de los parámetros SEA, pero en la mayor parte de las ocasiones ésta es desconocida para el usuario y no está documentada.

En este trabajo se evaluará el procedimiento de cálculo de los parámetros SEA de dos software comerciales para el caso de componentes ferroviarios simples y para la predicción de niveles de ruido en un tren de Alta Velocidad.

INTRODUCCIÓN

La normativa cada vez más restrictiva, tanto a nivel español (Ley 37/2003) como a nivel europeo (Directiva Europea 2002/49/CE) obliga a los fabricantes a mejorar la calidad acústica de sus productos, bien sea reduciendo los niveles de generación (caso de fabricantes de vehículos) o bien aumentando los niveles de aislamiento para reducir los niveles de ruido interior (empresas constructoras, industria aeronáutica, etc.). Así mismo los propios usuarios se encuentran más sensibilizados al problema del ruido y ellos mismos demandan menores

niveles de ruido tanto en el interior de sus viviendas como en el interior de cualquier medio de transporte. Es por ello de gran importancia el desarrollo de métodos numéricos que permitan a los ingenieros predecir los niveles finales de ruido de nuevos diseños.

El método Estadístico de Energía (SEA) fue desarrollado en los años 60 para el diseño de vehículos espaciales. Desde entonces ha sido empleado para resolver problemas de ruido y vibraciones a medias y altas frecuencias en multitud de áreas: edificación, industria naval, aeronáutica, automoción, industria ferroviaria, etc. Este método permite evaluar la influencia de modificaciones, tratamientos, diferentes fuentes de ruido, etc. sin un conocimiento muy detallado de las propiedades físicas o de la geometría de la estructura. De esta forma el método SEA descarta la influencia de las variaciones en el sistema propias del proceso de fabricación tales como tolerancias, desviaciones en las propiedades mecánicas de los materiales, etc.

El proceso de modelado SEA se divide en dos fases: la generación de los propios elementos (discretización de la estructura) y la obtención de los parámetros SEA (Modal Density, Internal Loss Factor y Coupling Loss Factor). Existe una gran cantidad de procedimientos de cálculo teóricos para la obtención del Modal Density y el Coupling Loss Factor (pues dependen de las características geométricas y físicas) para diferentes tipos de estructuras simples, a las que pueden asimilarse las estructuras reales [1]. Por otra parte, el Internal Loss Factor debe obtenerse experimentalmente.

La primera fase puede ser realizada por el software o por el usuario, introduciendo directamente los elementos, su geometría y sus propiedades mecánicas. La segunda fase comúnmente es llevada a cabo por el software empleando su propia metodología. Cada software SEA posee una mecánica de cálculo interna que condiciona el tipo y la cantidad de datos que debe solicitar al usuario. En este trabajo se realizará una evaluación de esta metodología para dos software comerciales existentes: AutoSEA2 (ESI-Group) y otro (llamado a partir de ahora SEAb). Así mismo se compararán los resultados obtenidos por los dos softwares en el caso de elementos constructivos simples de la industria ferroviaria y los niveles calculados de ruido interior en un tren de Alta Velocidad.

MODELADO DE ELEMENTOS SINGULARES

Se pretende en este apartado comprobar la validez de los resultados proporcionados por los dos software en evaluación así como comparar los resultados entre ellos. Para ello, se procedió al modelado de dos elementos ferroviarios simples: dos configuraciones de panel bajo ventana empleados en la construcción de trenes de Alta Velocidad. Para la correlación experimental, se procedió a realizar ensayos de ambos paneles en el la cámara de ensayos del Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica (LEAM) de la Universidad Politécnica de Cataluña (véase figura nº 1), cuyas instalaciones han sido validadas con prestigiosos laboratorios certificados.

Las dos configuraciones modeladas consisten en un perfil de aluminio extruido con pintura anti-ruido en una de sus caras (véase figura nº 1) y un perfil multi-capa compuesto por: el mismo perfil de aluminio, una capa de espuma de melamina, una cámara de aire y un panel decorativo en la cara interior.

El elemento perfil extruido se encuentra implementado en el software SEAb por lo que para modelar este tipo de panel sólo se requiere introducir sus características geométricas (espaciado, espesores, etc.) y físicas (modulo de Young, densidad, etc.) en el programa. AutoSEA2 no incluye este tipo de elemento [2] por lo que es necesario seguir un procedimiento [3] que requiere emplear la geometría CAD de la pieza y realizar un modelo SEA muy detallado (véase figura nº 2). Los modelos realizados siguiendo este método proporcionan buenos resultados solamente en medias y altas frecuencias, siendo necesario elaborar un modelo de placa simple equivalente si se desea obtener resultados a baja frecuencia. Tanto en AutoSEA2 como en SEAb debe añadirse el Internal Loss Factor adicional correspondiente a la pintura anti-ruido.



Figura nº 1: Instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica (LEAM) y detalle del perfil de aluminio extruido

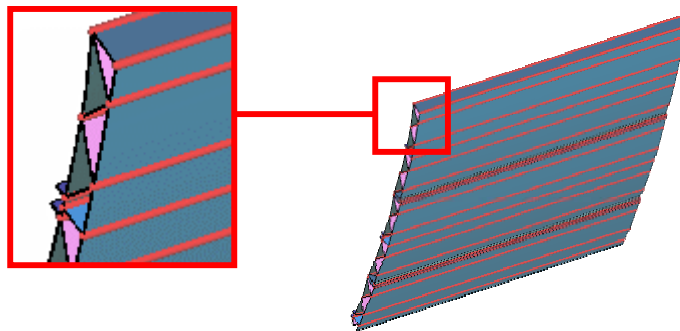


Figura nº 2: Modelo SEA detallado del perfil de aluminio. Detalle de las uniones entre elementos SEA

El modelado del panel multi-capas es sensiblemente más complejo. No existe en ninguno de los dos programas la posibilidad de modelar un elemento SEA multi-capas cuando alguna de las capas no es una placa simple [4].

En SEAb, la solución consistió en modelar una serie de elementos: perfil de aluminio, cámara de aire y panel decorativo, conectando la primera y la última capa a las cámaras receptora y emisora respectivamente. De esta forma el modelo considera únicamente el camino de transmisión resonante, pero dado que éste es el camino principal de transmisión de ruido en este caso, los resultados obtenidos resultan satisfactorios.

En AutoSEA2 sólo el perfil de aluminio fue definido como elemento SEA en el modelo principal. La unión entre este panel y la cámara receptora fue definida mediante el Transmission Loss propio del panel decorativo y de la capa de espuma de melamina, obtenido a partir de un modelo SEA auxiliar.

Una alternativa posible al procedimiento descrito consistiría en obtener una placa simple equivalente al perfil de aluminio. De esta forma sería posible definir un elemento SEA multi-capas en los dos programas. Sin embargo cabe señalar que la obtención de esta placa equivalente es aún más compleja que el procedimiento descrito, debido a la gran dificultad que conlleva sintonizar los resultados proporcionados por este tipo de elemento con los resultados experimentales.

La figura nº 3 muestra los resultados de Modal Density obtenidos con los dos procedimientos de modelado del perfil extruido (modelo con un único elemento SEA en SEAb y modelo detallado en AutoSEA2).

Resultados Obtenidos

Los resultados proporcionados por los dos programas presentan diferencias, como es esperable empleando dos metodologías totalmente diferentes. En el caso del perfil de aluminio, es conocido que los resultados proporcionados por el modelado siguiendo la metodología

expuesta para AutoSEA2 no son válidos a bajas frecuencias. En el rango de frecuencias medias ambos programas generan resultados similares (véase figura nº 4). Sin embargo los resultados divergen de nuevo a altas frecuencias. En el caso del panel multi-capa, los resultados obtenidos resultaron muy similares a pesar de las diferencias en el proceso de modelado.

Validación de los resultados

Se realizaron dos maquetas del panel de perfil extruido y del panel multi-capa con objeto de realizar una validación experimental en el laboratorio. Como puede verse en la figura nº 4, en el caso del perfil de aluminio, los resultados obtenidos por SEAb se ajustan mejor a los valores experimentales, mientras que en el caso del panel multi-capa los resultados de AutoSEA2 son mejores que los de SEAb. Las diferencias a bajas frecuencias en este caso podrían ser eliminadas mediante la generación de un modelo de placa equivalente del perfil de aluminio, como se comentó anteriormente.

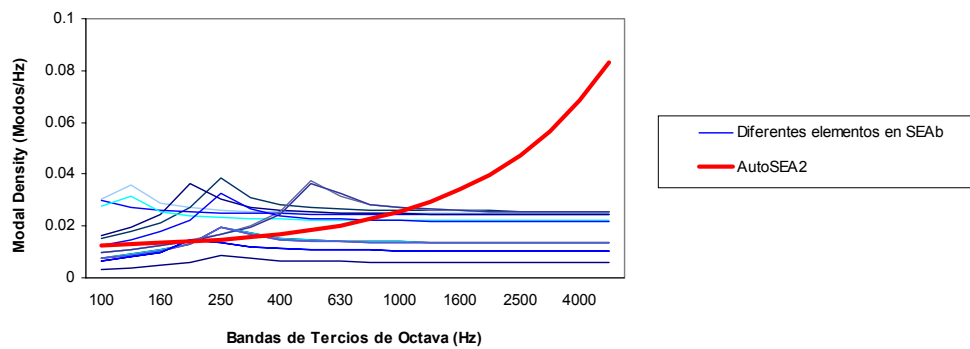


Figura nº 3: Modal Density de los elementos SEA que forman el modelo detallado (líneas en azul) y Modal Density del elemento perfil extruido generado en SEAb (línea roja)

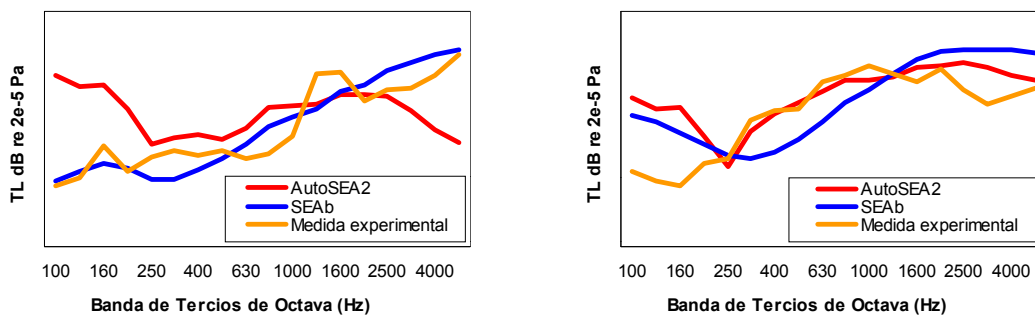


Figura nº 4: Resultados SEA y validación experimental para el perfil de aluminio (izquierda) y para el panel multi-capa (derecha)

MODELADO DE UN TREN DE ALTA VELOCIDAD

Como paso siguiente se procedió al modelado de un tren de Alta Velocidad en los dos software objeto de estudio. La metodología empleada para el modelado de trenes puede encontrarse detallada en la referencia [5].

SENER ha realizado el proyecto de control de ruido y vibraciones de un nuevo diseño de tren eléctrico, consistente en tres coches, dos de ellos equipados con pantógrafo. Durante el desarrollo del proyecto SENER ha llevado a cabo acciones encaminadas a cumplir los estrictos requerimientos de acondicionamiento acústico de la compañía contratante (véase figura nº 5).

SENER realizó el modelado del tren empleando una metodología basada en la división en *cubos* de todo el entorno, incluyendo tanto el tren como el espacio circundante, hasta una

distancia de 10 metros de la superficie exterior de la estructura en todas las direcciones (véase figura nº 6). Cada uno de estas cavidades fue conectada a las cavidades adyacentes mediante el correspondiente Transmission Loss (obtenido de medidas experimentales o de la bibliografía disponible en la base de datos de SENER). En cada cavidad fueron definidas las características de absorción equivalentes propias de los materiales y superficies que rodean el espacio real modelado (correspondiente a moquetas de suelos, paredes, techos, etc.). Las fuentes de ruido fueron modeladas como fuentes de energía equivalente definidas en las cavidades donde el ruido es generado (el compartimiento del motor, los bogies, etc.). Sólo fueron modelados el coche tractor y la mitad del coche intermedio, aprovechando la simetría existente. Las superficies exteriores de las cavidades de aire fueron conectadas a elementos SEA de tipo semi-infinito, representando de esta forma el sumidero de energía que supone la emisión a la atmósfera en campo libre. En el plano de simetría (el plano transversal situado en el medio del coche intermedio) no se realizaron conexiones, con objeto de establecer la condición de simetría en el modelo. En la parte inferior del modelo tampoco se establecieron conexiones, simulando de esta forma una reflexión perfecta del balastro (hipótesis que ha sido verificada experimentalmente en el pasado).



Figura nº 5: Tren de Alta Velocidad modelado

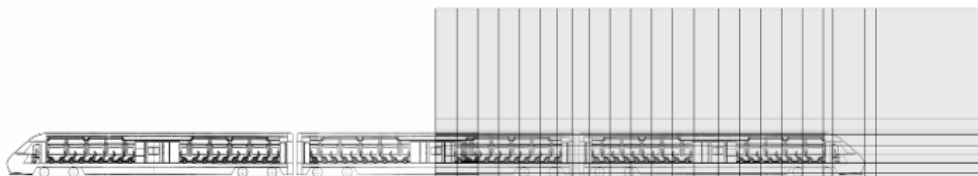


Figura nº 6: Procedimiento de modelado del tren, división en cavidades

La figura nº 7 muestra tres cortes longitudinales a lo largo de la longitud del tren así como una representación del modelo completo del tren (en corte longitudinal).

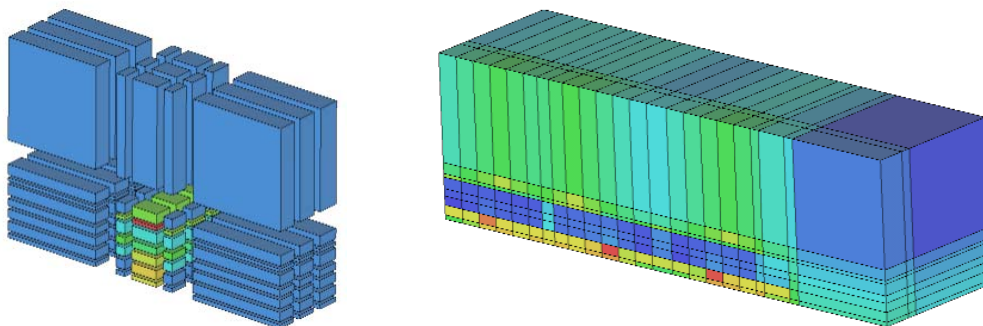


Figura nº 7: Discretización del tren y del aire circundante (a la izquierda, la escala de color representa Internal Loss Factor a 125 Hz) y modelo global del tren (a la derecha, la escala de color representa nivel de presión sonora a 500 Hz)

Como en el caso de los elementos simples, los valores proporcionados por los dos programas resultaron similares. Los niveles calculados por AutoSEA2 son ligeramente

inferiores en casi todas las cavidades cercanas a los bordes del modelo (parte frontal del coche tractor y mitad del coche intermedio). En todo caso ambos códigos proporcionan resultados razonablemente acertados y de gran utilidad en proyectos de evaluación y diseño de ruido y vibraciones (veáse figura nº 8).

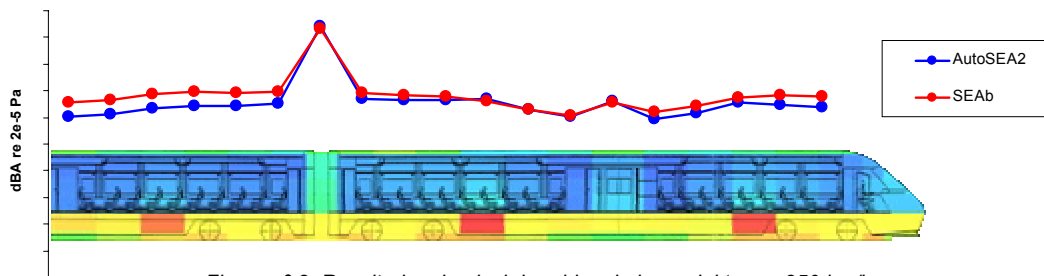


Figura nº 8: Resultados de nivel de ruido a lo largo del tren a 250 km/h

CONCLUSIONES

La metodología implementada por SENER para el modelado SEA y su aplicación en el sector ferroviario permiten mejorar las características vibro-acústicas de nuevos diseños de trenes, haciendo posible cumplir los requisitos acústicos de las compañías y de las administraciones públicas, cada vez más restrictivos.

A pesar del uso de diferentes procedimientos de modelado en los dos programas estudiados, los resultados son razonablemente similares y validados experimentalmente. En el caso de tren completo los resultados proporcionados por ambos códigos coinciden aún en mayor medida, probablemente debido al efecto de promediar un mayor número de elementos, lo que comúnmente reduce el error en métodos estadísticos como el SEA.

En todo caso, la metodología desarrollada durante la realización de este trabajo puede ser transferida a otras áreas de la ingeniería (automoción, aeronáutica, industrial naval, etc.) puesto que su problemática posee muchos puntos en común con el sector ferroviario.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a ESI-Group su colaboración en la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] SEADS Statistical Energy Analysis Design System, User's Manual, LMS Numerical Technologies, 1998
- [2] AutoSEA2 2004 User's Guide, ESI-Group, 2004
- [3] Y. Pang, U. Orrenius, B. Stegemann and S. Finnveden, Modelling sound transmission through floor structures in trains based on extruded profiles, *Proceedings of the Vibro-Acoustic Users Conference*, Paris, France, 2004
- [4] G. Alarcón, J. Solé and J. Romeu, Development of an Acoustically High-Efficient Train Wall Configuration, *Proc. 33rd Internoise*, Prague, Czech Republic, 2004
- [5] G. Alarcón and J. Palmiola, An application of the statistical energy analysis (SEA) to the internal noise prediction in trains, *Forum Acusticum*, Sevilla, 2002