

# Absorción sonora en cristales de sonido: aplicación en el lanzamiento de cohetes espaciales



I. Herrero-Durá<sup>1</sup>, R. Picó<sup>1</sup>, V. J. Sánchez-Morcillo<sup>1</sup>, L. M. Garcia-Raffi<sup>2</sup>, V. Romero-García<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de las Zonas Costeras, UPV, España

<sup>2</sup> Instituto Universitario de Matemática Pura Aplicada, UPV, España

<sup>3</sup> Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, France

ivhevru@upvnet.upv.es

EAA - Best Paper and Presentation Awards 2016

PACS: 43.20.Hq; 43.40.Jc

## Resumen

Los elevados niveles de presión acústica experimentados por cohetes espaciales y lanzaderas durante el despegue son debidos, entre otros factores, a la reflexión de las ondas de sonido en la plataforma de lanzamiento. Se propone el uso de cristales de sonido en la base de lanzamiento para reducir el efecto de las vibraciones inducidas por la onda de choque generada en el despegue del vehículo espacial. En este trabajo se estudia el efecto de las pérdidas viscotérmicas en cristales de sonido en la absorción del sonido durante las primeras fases del lanzamiento de cohetes espaciales. Para ello, se modelan este tipo de pérdidas considerando el cristal de sonido como un panel rígido perforado y proponiendo una configuración específica para su ubicación en la base de lanzamiento.

## Abstract

The high acoustic pressure levels experienced by spacecrafts and launchers during the lift-off are due, among other factors, to the reflection of the sound waves in the launch pad. We propose in this work the use of sonic crystals in the launch pad, with the aim of reducing the effect of vibrations induced by the shock wave generated during the lift-off of the space vehicle. The effect of viscothermal losses in sonic crystals in sound absorption during the first stages of the rocket launch is studied. For this purpose, this kind of losses are modelled considering the sonic crystal as a rigid perforated panel and proposing a specific configuration for its placement in the launch pad.

## 1. Introducción

El lanzamiento de cohetes espaciales es un evento extremo en el cual las magnitudes físicas (temperatura, flujo de gases y presión) exceden los valores de situaciones convencionales en varios órdenes de magnitud [1]. En particular, la expulsión de gases del motor de un cohete genera niveles de presión sonora muy elevados que provocan una gran carga acústica en las estructuras terrestres. Asimismo, la reflexión de las ondas en la base de lanzamiento puede provocar daños importantes en los dispositivos sensibles a vibraciones que transporta el vehículo espacial. Se han propuesto diversas estrategias para reducir los niveles de ruido en el cohete como utilizar materiales absorbentes acústicos [2,3,4], o materiales activos [5,6]. Hoy en día, la solución más común consiste en la inyección de agua presurizada para reducir el ruido directo proveniente del cohete. Sin embargo,

el uso de agua presenta desventajas, como la corrosión y daños que produce en el cohete y en la base de lanzamiento.

El criterio principal para el diseño de lanzaderas y del entorno del cohete es el de favorecer la expulsión y enfriamiento adecuado de los gases calientes en el despegue. Sin embargo, no se ha considerado prioritario tener en cuenta el efecto acústico producido por la gran intensidad de la fuente sonora. En [7], los autores proponen un sistema para la mitigación del sonido de la componente reflejada en la plataforma de lanzamiento que afecta al área en la que se encuentra el vehículo espacial. Se basa en reducir la carga acústica en el cohete produciendo la deflexión de las ondas sonoras en la base de lanzamiento por medio de la instalación adecuada de estructuras periódicas denominadas Cristales de Sonido (CS). Un CS consiste en una distribución periódica de

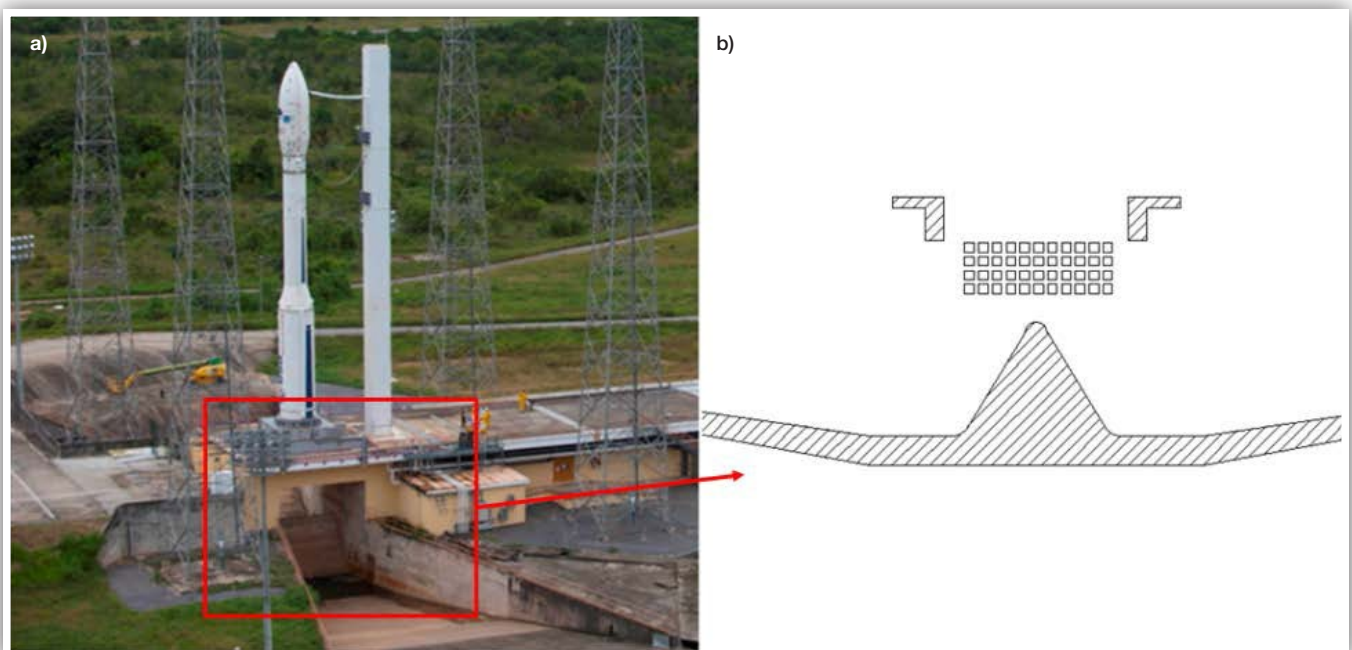
elementos rígidos o dispersores embebidos en un medio fluido huésped [8]. Estas estructuras permiten el control de la propagación de ondas acústicas a determinadas frecuencias. En este contexto, por medio de CS en 2D constituidos de barras alineadas en paralelo, se consigue reorientar parte de la energía acústica reflejada en la plataforma de lanzamiento a direcciones en las que no afecte a estructuras sensibles para el despegue del vehículo. Debido a la permeabilidad de los CS al paso de fluidos [9], su utilización es compatible con los sistemas de inyección de agua, aumentando la eficiencia en la mitigación de sonido.

Las ondas sonoras emitidas por el cohete, además de sufrir una reflexión controlada al incidir sobre el cristal de sonido, reducen su amplitud debido a mecanismos de atenuación durante la propagación en su interior. El cristal de sonido, además de controlar la difusión del sonido, se comporta como un material absorbente para el rango de frecuencias de emisión del cohete. Las ondas acústicas en fluidos presentan pérdidas incoherentes por efectos viscotérmicos, que pueden ser particularmente pronunciados en estructuras pequeñas, como las encontradas en las aplicaciones de los metamateriales [10]. En este trabajo se estudia el efecto de mitigación de sonido adicional por la reducción de la carga acústica en reflexión debido a las pérdidas viscotérmicas de la onda al propagarse en un cristal de sonido. Se pretende así estimar la pérdida de nivel producida por la absorción sonora en el cristal en una configuración a escala simplificada basada en la plataforma de VEGA.

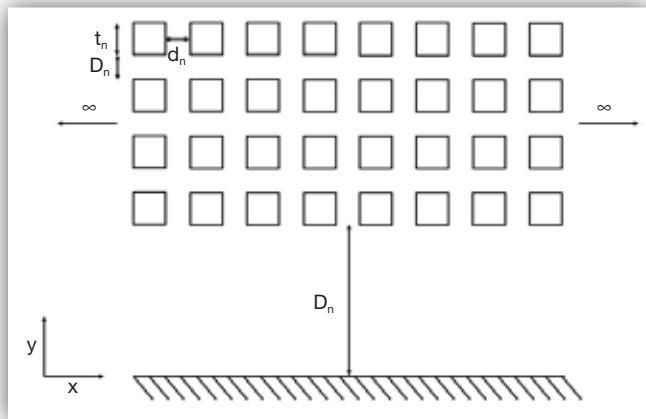
## 2. Modelo

La Figura 1 muestra un esquema simplificado del sistema al que se pretende aplicar los resultados del estudio. El objetivo del estudio es analizar la capacidad de los cristales de sonido como materiales que presenten atenuación del sonido, así como desarrollar una propuesta basada en las ideas planteadas en este trabajo para su futura aplicación a la plataforma empleada para el lanzamiento del cohete VEGA de la Agencia Espacial Europea (ESA), una nave diseñada principalmente para el lanzamiento de pequeñas cargas, como satélites para misiones científicas.

Para describir el comportamiento acústico de un CS (que en este estudio consideraremos bidimensional), proponemos un modelo en el que el cristal se asimila a un conjunto de paneles rígidos perforados [11] alineados y dispuestos horizontalmente en serie, de espesor  $t_n$  y separados una distancia  $D_n$  y con perforaciones  $d_n$ . Esta configuración presenta unas características similares a una distribución ordenada de dispersores en forma de barras rígidas, que es la forma clásica de un cristal de sonido. En la Figura 2 se muestra un corte transversal del cristal, instalado en una plataforma simplificada. Puesto que la extensión transversal (en  $x$ ) de los cristales es mucho mayor que la del haz acústico de la fuente sonora (el cohete), podemos suponer de forma simplificada que los cristales de sonido tienen una extensión infinita en  $x$ . Por debajo del cristal a una distancia  $D_n$  (en  $y$ ) se encuentra el canal por el que se expulsan los gases. De forma aproximada, supondremos para la estimación del coeficiente



**Figura 1.** a) Base de lanzamiento de un cohete espacial. b) Ubicación del cristal de sonido en la base de lanzamiento.



**Figura 2.** Esquema del cristal de sonido en la plataforma como un sistema multicapa de paneles perforados.

de absorción del conjunto, que la plataforma no tiene deflector y el fondo del canal es paralelo al cristal de sonido. Con el modelo propuesto podemos determinar el coeficiente de absorción en incidencia normal de un cristal de sonido, descrito como un material multicapa de paneles perforados [12].

En un sistema compuesto por  $N$  capas (paneles), la impedancia acústica del panel  $n$  viene dada por medio de la siguiente expresión [13]:

$$Z_{mn} = (t_n + 2\varepsilon_{en}) \left[ (1+j) \frac{4R_s}{\rho_n d_n} + \frac{j\omega\rho_0}{\rho_n} \right], \quad (1)$$

donde  $\rho_0$  es la densidad del aire,  $\rho_n$  es la porosidad, respectivamente,  $\varepsilon_{en} = 0.425d_n(1 - 1.14\sqrt{\rho_n})$  es la corrección de longitud, y  $R_s = \sqrt{\rho_0\omega\mu}/2$  es la resistencia de superficie de la capa de aire vibrando en el interior de cada perforación.

De igual manera, la impedancia acústica de las cavidades de aire situadas entre cada uno de los paneles puede calcularse como

$$Z_{Cn} = Z_0 \frac{Z_{n+1} \cos(kD_n) + jZ_0 \sin(kD_n)}{Z_0 \cos(kD_n) + jZ_{n+1} \sin(kD_n)}, \quad \text{para } n=1, 2, \dots, N-1, \quad (2)$$

siendo  $Z_0$  la impedancia acústica característica del aire y  $k$  el número de onda. Nótese que la plataforma no es más que el caso particular de una cavidad de tamaño  $D_N$  con impedancia infinita (acústicamente rígido) y, su impedancia puede calcularse como

$$Z_{CN} = -jZ_0 \cot(kD_N), \quad (3)$$

donde  $n = N$ . El comportamiento acústico conjunto del cristal y la plataforma se describen por medio de la impe-

dancia de entrada de cada uno de los sistemas panel-cavidad y se compone de la suma de impedancias acústicas de sus dos elementos

$$Z_n = Z_{mn} + Z_{Cn}. \quad (4)$$

Con estos parámetros es posible calcular el coeficiente de reflexión en incidencia normal en función de la frecuencia como

$$R(f) = \frac{Z_n(f) - Z_0}{Z_n(f) + Z_0}, \quad (5)$$

Finalmente, se define el coeficiente de absorción en incidencia normal mediante la siguiente expresión

$$\alpha(f) = 1 - |R(f)|^2, \quad (6)$$

### 3. Reducción del nivel de presión sonora

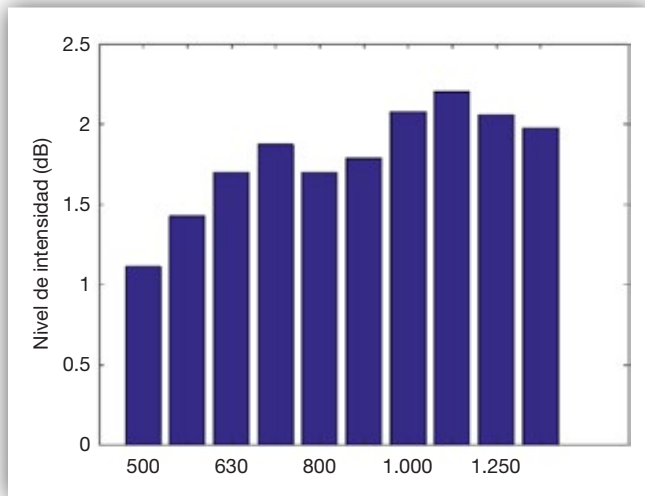
Una restricción importante a la hora de aplicar los sistemas de reducción de ruido es el espacio disponible en la base de lanzamiento. El tamaño de la estructura debe adaptarse a las dimensiones de la misma. Al mismo tiempo, es necesaria una optimización en el diseño del cristal de sonido para que presente una absorción sonora máxima en el rango de frecuencia de interés. Por último, como se ha comentado anteriormente, el cristal de sonido debe ser permeable al paso de los gases expulsados por el cohete, lo cual impone condiciones restrictivas adicionales al tamaño de las perforaciones (o distancia entre barras).

En la configuración propuesta, el cristal de sonido está ubicado debajo del cohete, de forma que la incidencia de las ondas acústicas generadas por la fuente es prácticamente normal. El cristal de sonido propuesto en este trabajo se compone de 6 capas de dispersores. Los parámetros de diseño son:  $d_n = 0.046$  m,  $t_n = 0.07$  m,  $\rho_n = 0.3966$ ,  $D_n = 0.046$  m y  $D_N = 8$  m. Por tanto, el sistema tiene una altura total de 8.96 m.

Con el objeto de cuantificar el efecto en la mitigación del sonido de la estructura en la Figura 3 se muestra la reducción de la intensidad de sonido debido a las pérdidas viscotérmicas en el cristal de sonido, la cual obedece la conocida expresión

$$LI = -10 \log(\alpha), \quad (7)$$

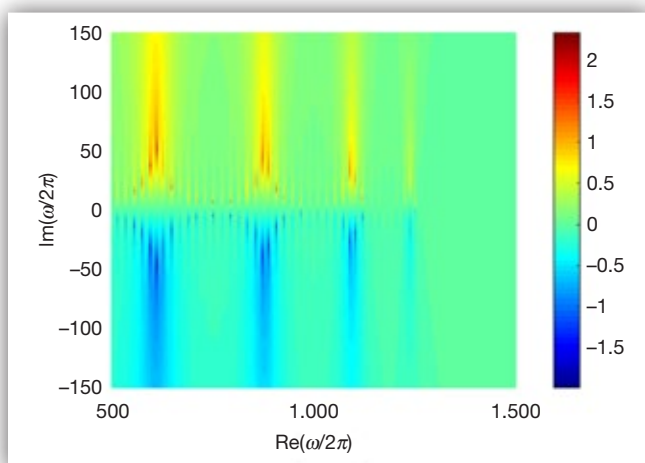
Como se puede observar en la Figura 3, el nivel de reducción de la intensidad del sonido en el rango de



**Figura 3.** Reducción del nivel la intensidad de sonido debido a pérdidas viscotérmicas producidas por el CS 2D en su instalación en la plataforma de lanzamiento VEGA.

frecuencias estudiado es considerable, situándose en un rango entre 1.1 y 2.2 dB. Nótese que, en el contexto aeroespacial, estos valores se consideran como una mejora significativa, dada la dificultad de atenuar el sonido por los mecanismos convencionales. Asimismo, modificando los parámetros de diseño, especialmente la cavidad de aire correspondiente al panel N, es posible incrementar aún más los niveles de reducción de la intensidad sonora, es decir, el problema admite optimización.

Una manera de identificar las condiciones óptimas de absorción consiste en representar el coeficiente de reflexión en el plano de frecuencia complejo. El resultado se presenta en la Figura 4 para la configuración estudiada, en la que se aprecia la distribución de ceros (azul) y polos (rojo) del coeficiente de reflexión. Los picos de absorción perfecta están presentes en frecuencias a las cuales los ceros se encuentran en el eje de frecuencias



**Figura 4.** Representación del coeficiente de reflexión en el plano de frecuencia complejo.

real [14]. La multiplicidad de máximos locales de absorción está relacionada con las múltiples reflexiones de la onda entre el fondo de la base de lanzamiento y el cristal de sonido. En esta figura, se puede destacar la presencia de resonancias de cavidad debidas a la cavidad correspondiente a  $D_N$ , es decir, al conducto de evacuación de gases de la plataforma de lanzamiento. Asimismo, se pueden observar resonancias de Fabry-Pérot por debajo de la frecuencia de *band gap* (calculada como  $f_B = c / 2(d_n + t_n) = 1478\text{Hz}$ , donde  $c$  es la velocidad de propagación de sonido en el aire).

## 4. Conclusiones

Los cristales de sonido son estructuras periódicas que producen difusión del sonido. Su instalación en la base de lanzamiento de vehículos espaciales se propone como solución para la mitigación de la carga acústica que soportan en el despegue por la reflexión. En este trabajo se estudia, mediante un modelo simplificado, el efecto adicional en la reducción de ruido debido a la absorción por pérdidas viscotérmicas de las ondas emitidas por el cohete en su propagación a través del cristal y el canal de evacuación de gases. Se propone un diseño específico sobre la base de lanzamiento VEGA. Las reducciones obtenidas en el nivel de intensidad son significativas (entre 1.1 y 2.2 dB) en el rango de emisión del cohete.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de European Space Agency (ESA) a través del doctorando cofinanciado 441-2015 «Acoustic Noise Reduction Methods for the Launch Pad», el Ministerio de Economía y Competitividad a través del Proyecto Coordinado «Ondas de luz y sonido en cristales, medios estructurados y metamateriales», y la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte a través del Proyecto AICO/2016/060.

## 6. Referencias

- [1] J.P. Arenas and R.N. Margasahayam. Noise and vibration of spacecraft structures. *Revista chilena de acústica*, **14** (3), pp. 251-264, 2006.
- [2] C.H. Sohn, J.H. Park. A comparative study on acoustic damping induced by half-wave, quarter wave and Helmholtz resonators. *Aerospace Science and Technology*, **15** (8), pp. 606-614 (2011).
- [3] S.A. Lane, K. Henderson, A. Williams, E. Ardelean. Chamber core structures for fairing acoustic mitigation. *Journal of Spacecraft and Rockets*, **44** (1), pp. 156-163 (2007).

- [4] G. Ghiringhelli, M. Terraneo, E. Vigoni. Improvement of structures vibroacoustics by widespread embodiment of viscoelastic materials. *Aerospace Science and Technology*, **28** (1), pp. 227-241 (2013).
- [5] A. Grewal, D. Zimcick, B. Leigh. Feedforward piezoelectric structural control: an application to aircraft cabin noise reduction. *Journal of Aircraft*, **38** (1), pp. 164-173 (2001).
- [6] T. Bein, J. Bös, S. Herold, D. Mayer, T. Melz, M. Thomaier. Smart interfaces and semi-active vibration absorber for noise reduction in vehicle structures. *Aerospace Science and Technology*, **12** (1), pp. 62-73 (2008).
- [7] Universitat Politècnica de València. Sonic Crystals for Noise Reduction at the Launch Pad. Informe técnico (2016).
- [8] R. Martínez-Sala, J. Sancho, J.V. Sánchez, V. Gómez, J. Linares, F. Meseguer. Sound Attenuation by sculpture. *Nature*, **378**, 241 (1995).
- [9] S. Castiñeira-Ibáñez, V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez, L.M. Garcia-Raffi. Periodic Systems As Road Traffic Noise Reducing Devices Prototype And Standardization. *Environmental Engineering and Management Journal*, **14** (12), pp. 2759-2769 (2015).
- [10] D. Guild, V.M. García-Chocano, W. Kan, J. Sánchez-Dehesa. Acoustic metamaterial absorbers based on multilayered Sonic crystals. *J. Appl. Phys.*, **117**, 114902 (2015).
- [11] D.Y. Maa. Potential of microperforated panel absorber. *J. Acoust. Soc. Am.*, **104** (5), pp. 2861-2866 (1998).
- [12] H. Ruiz, P. Cobo, F. Jacobsen. Optimization of multiple-layer microperforated panels by simulated annealing. *Applied Acoustics*, **72**, pp. 772-776 (2011).
- [13] N. Atalla, F. Sgard. Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models. *Journal of Sound and Vibration*, **303**, pp. 195-208 (2007).
- [14] V. Romero-García, G. Theocharis, O. Rochoux and V. Pangeux. Use of complex frequency plane to design broadband and sub-wavelength absorbers. *J. Acoust. Soc. Am.*, **139** (6), pp. 3395-3403 (2016).





decustik<sup>®</sup>

Paneles acústicos microperforados  
la acústica invisible

