

# ARREGLOS DE RESONADORES APERIÓDICOS COMO METABARRERAS PARA LA PROTECCIÓN A GRAN ESCALA ANTE SISMOS

LOUKAS F. KALLIVOKAS,  
FRANCISCO J. SÁNCHEZ-SESMA,  
JOSÉ PIÑA FLORES, MATHIEU PERTON,  
HEEDONG GOH Y HUGO CRUZ JIMENEZ

En el marco de un proyecto conjunto de carácter exploratorio financiado por CONACYT y la Universidad de Texas (CONTEX), se desarrolla en el Instituto de Ingeniería de la UNAM un proyecto para estudiar metamateriales sísmicos en el contexto de la ingeniería sísmica.

A pesar de los esfuerzos científicos y tecnológicos destinados a proteger las estructuras de los efectos catastróficos que provocan los sismos intensos, estos continúan causando un número importante de víctimas humanas y grandes pérdidas económicas en todo el mundo. Durante décadas, la protección integral de las obras civiles se ha enfocado en el diseño estructural para resistir las solicitaciones de un sismo. Las primeras soluciones pusieron el énfasis en el diseño por resistencia (buscando dar rigidez a las estructuras), mientras que las más recientes agregan elementos de control activos o pasivos (aisladores de base o disipadores, por ejemplo) a la estructura o incrementan su ductilidad a partir de elementos de sacrificio. Hoy surgen nuevas posibilidades a partir del efecto que pueden tener conjuntos de difractores o resonadores alrededor de las estructuras. ¿Se podrían proteger a las estructuras de la energía de sismos lejanos mediante el diseño de esos difractores? En esta investigación se busca demostrar que eso es factible, tanto técnica como económicamente. La idea es bloquear la propagación de las ondas con arreglos de resonadores que reflejan las ondas o las dirigen a direcciones distintas a la de las estructuras.

## Descripción del proyecto

Tradicionalmente, la tarea principal para proteger las construcciones (edificios, centrales eléctricas, monumentos, puentes, carreteras, etc.) de los efectos de los sismos se ha restringido

a mejorar la estructura misma. Tal enfoque, conduce a que el diseño sísmico de las estructuras sea un diseño con resistencia excesiva. Actualmente, las estructuras son diseñadas tomando en cuenta tanto la resistencia como la ductilidad, donde parte de la energía sísmica es absorbida en deformación plástica. Estos diseños se basan en consideraciones de rendimiento o desempeño, indistintamente. Por otra parte, si la estructura se analiza de manera independiente o se toman en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura, la función del diseño sísmico sigue enfocada a la estructura.

A partir de los recientes avances en el estudio de los metamateriales y la ingeniería de difracción para medios periódicos, estamos convencidos que es el momento oportuno para un cambio de paradigma en el diseño sísmico.

Específicamente, nos interesa el diseño de arreglos resonantes periódicos que podrían instalarse alrededor de una estructura para ayudar a atrapar, reflejar, atenuar y eliminar las ondas en ciertas bandas de frecuencias o alejar las ondas incidentes antes de que alcancen la estructura (Fig. 1). En efecto, dado que todo lo que queda detrás de la barrera está protegido, sin importar las dimensiones del área protegida, es posible, para tales arreglos, formar escudos que protegerían no solamente una estructura individual, sino también, estructuras críticas de grandes dimensiones (puentes, centrales eléctricas), extendiéndose posiblemente incluso a ciudades enteras. Los beneficios sociales potenciales de un resultado exitoso serían múltiples, no sólo desde una perspectiva de mitigación sísmica, sino también, considerando que abre la posibilidad de estimular una nueva industria con impacto económico significativo y creación de empleos tanto en México como en Texas.

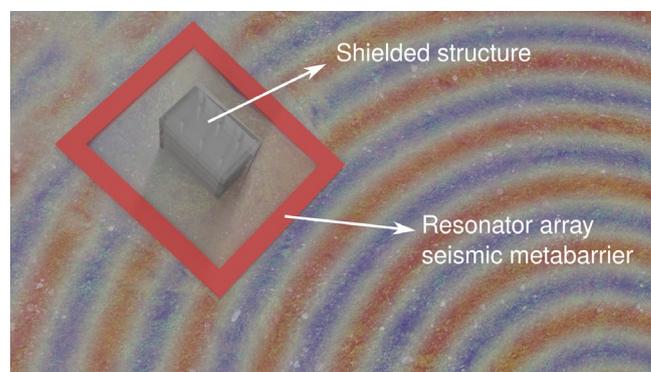


Figura 1. Esquema de una metabarrera sísmica basada en un arreglo de resonadores. Las ondas sísmicas incidentes, que se muestra aquí como ondas superficiales, se encuentra con un arreglo de resonadores que protege la estructura

## Objetivos y plan de trabajo

Los objetivos claves de la investigación son, 1) desarrollar métodos para el diseño de metabarreras sísmicas en forma de arreglos de resonadores periódicos, 2) demostrar su efectividad de protección sísmica y aplicabilidad mediante simulaciones numéricas utilizando como entrada señales de sismos pasados. La ingeniería de difracción es actualmente uno de los campos de más rápido crecimiento en ciencia e ingeniería debido al gran interés y a la emergencia por los nuevos materiales cuyo diseño se basa en desempeño.

## Antecedentes

La forma en que las ondas se propagan en un medio periódico es fundamental en la noción de una metabarrera sísmica. Un medio periódico consiste en celdas dispuestas en un patrón topológicamente repetido (ver Fig. 2a para un medio 1D). Al diseñar las propiedades de la celda es posible crear condiciones que impidan la propagación de las ondas. Por ejemplo, las zonas grises de la Fig. 2b representan zonas de sombra en algunas bandas de frecuencia: las ondas con frecuencias dentro de estas bandas no pueden propagarse en el medio periódico. En la Fig. 2c se representa una onda bicromática que incide en

un medio periódico. Sólo se transmite una monocromática, dado que una de las dos ondas fue eliminada dentro del medio que fue diseñado para tener un hueco en la banda de frecuencias.

En general, en una estructura periódica hay dos mecanismos clave responsables de la aparición de brechas o hiatos en bandas de frecuencias prohibidas. Primero, la periodicidad espacial crea patrones de interferencia de onda que pueden ser destructivos y/o constructivos. La interferencia destructiva, inducida únicamente por la difracción geométrica de las celdas, se conoce como resonancia de Bragg. En segundo lugar, una inclusión heterogénea tiene sus propias características de resonancia, que pueden ser amortiguadas creando así brechas de banda. Éstas se pueden introducir en un medio huésped mediante resonadores simples (los cilindros en la Fig. 3) distribuidos espacialmente dentro del medio huésped. Sin embargo, las brechas se manifiestan cerca de la frecuencia natural del resonador y están altamente localizadas. Si se desea una brecha más amplia, como es el caso de las aplicaciones sísmicas, entonces una distribución de resonadores con características de resonancia variables podría ampliar la banda de frecuencias prohibidas (Fig. 3b y 3c), dando como resultado el llamado efecto de atrapamiento de arcoíris donde el rango de frecuencia deseado está cubierto por el conjunto de las frecuencias de cada resonador.

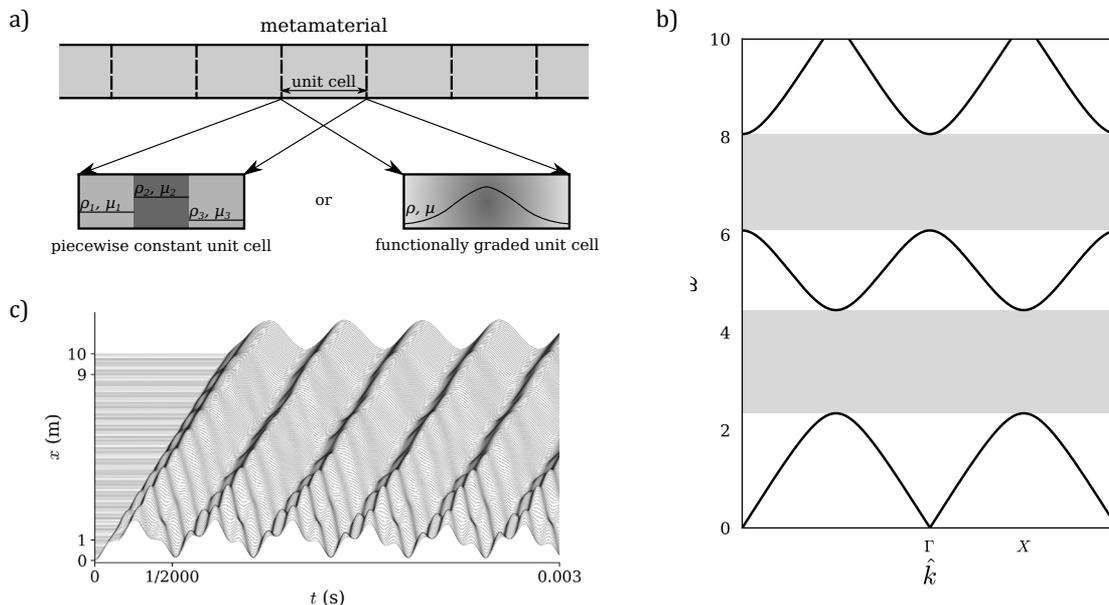


Figura 2. a) Estructura periódica 1D que comprende una secuencia infinita de celdas unitarias; b) estructura de banda de una estructura periódica 1D; c) una onda dicromática que entra a un medio 1D con periodicidad finita sale como una onda monocromática debido a las brechas en la banda de frecuencias

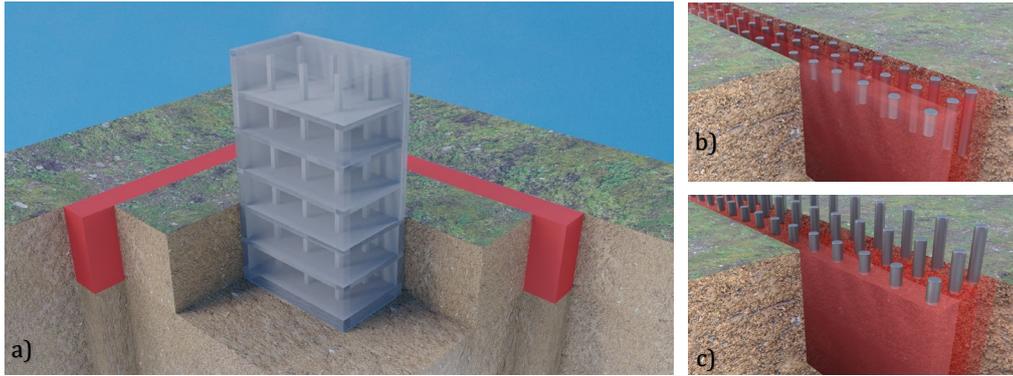


Figura 3. a) Diseño conceptual de una metabarrera sísmica de resonadores; b) detalle de la metabarrera sísmica que muestra un arreglo enterrado de resonadores aperiódicos; c) metabarrera sísmica con arreglo de resonadores por encima del suelo

### Diseño específico del arreglo de resonadores

Dado un escenario sísmico, expresado en términos del contenido de energía en ciertas frecuencias y de la direccionalidad, el objetivo primordial del diseño inverso es concebir un arreglo de resonadores periódicos que permita minimizar el movimiento incidente considerando todos los tipos de ondas, las ondas superficiales y de cuerpo. El diseño inverso abarca tanto la disposición topológica de los resonadores, como sus características de resonancia individuales. Nosotros intentamos perseguir tanto los diseños de dirección específica, como las metabarreras omnidireccionales (es decir, barreras capaces de bloquear ondas independientemente de sus direcciones de propagación).

### Diseño de un resonador individual

A partir de las características dinámicas y/o resonantes de cada metabarrera, surge un segundo problema de diseño:

encontrar la composición del material del resonador para una geometría fija, que satisfaga el comportamiento resonante deseado. Entonces, surge la pregunta ¿de qué debería estar hecho el resonador para comportarse según el diseño? Para abordar los problemas de diseño en el arreglo y en el resonador individual, implantamos un método de optimización de la topología y de los materiales. La Fig. 4a muestra una celda de 4m x 4m compuesta de 3 materiales que elimina la energía de las ondas en bandas de frecuencias en el rango de 5 a 10 Hz. Posteriormente, la celda se usó para construir una metabarrera muy estrecha (Fig. 4b; zona sombreada; de 2 celdas de ancho) y permite eliminar ondas que provienen de cualquier dirección. El espectro de Fourier del movimiento registrado reveló que las ondas fueron eliminadas en la brecha de frecuencias estipulada (Fig. 4c). Se presentan en la Fig. 4d instantáneas de la propagación de onda a diferentes tiempos (el tiempo está en el eje vertical): las ondas con frecuencias indeseables se han detenido claramente al pasar la metabarrera.

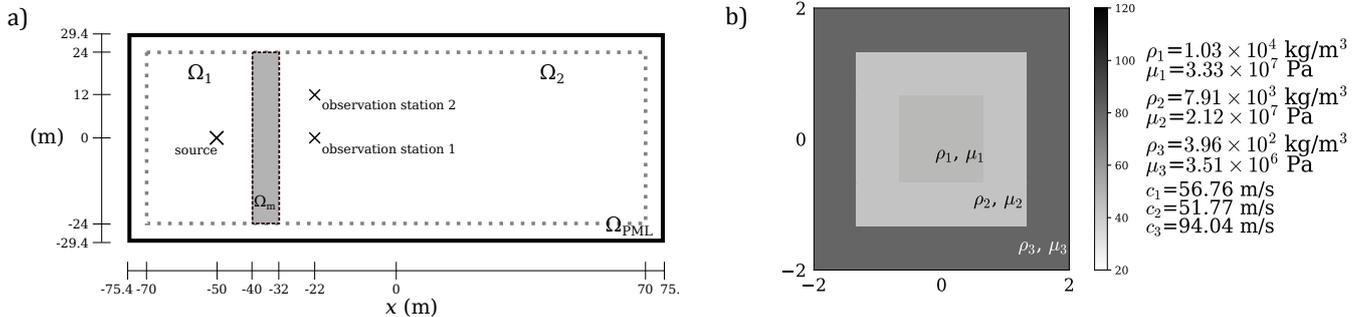


Figura 4 (a y b). Metabarrera 2D que consta de 2 (o 4) filas de celdas unitarias. Cada celda unitaria es de 4mx4m. La celda unitaria consta de 3 materiales, con velocidades de onda de corte entre 57-94 m/s. La banda de frecuencias eliminadas de la metabarrera está entre 5-10Hz

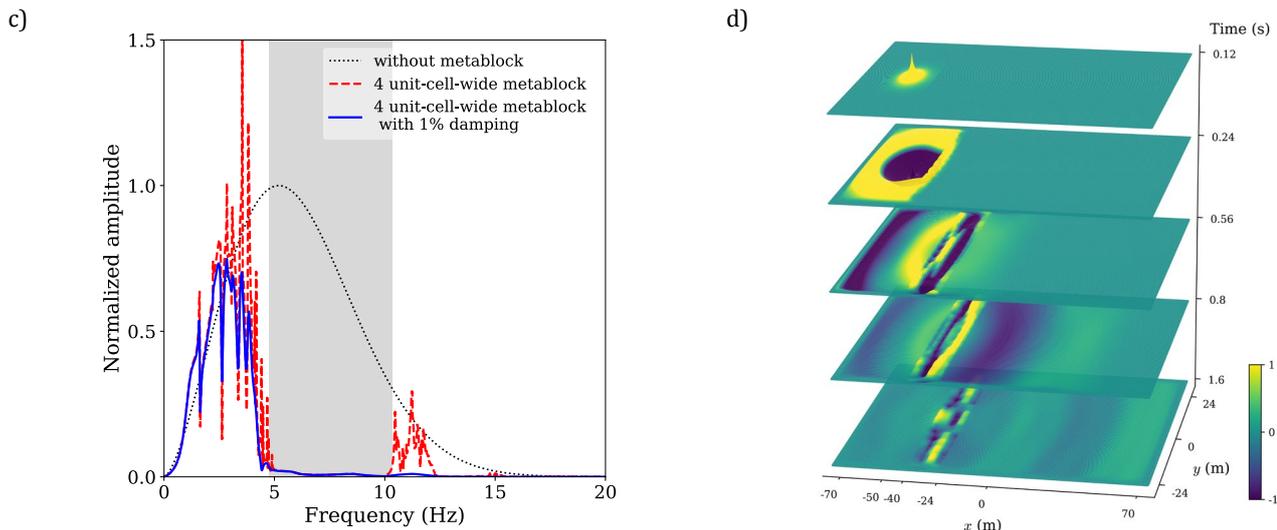


Figura 4 (c y d). Metabarrera 2D que consta de 2 (o 4) filas de celdas unitarias. Cada celda unitaria es de 4mx4m. La celda unitaria consta de 3 materiales, con velocidades de onda de corte entre 57-94 m/s. La banda de frecuencias eliminadas de la metabarrera está entre 5-10Hz

Finalmente, la investigación propuesta aspira a proporcionar la base para el primer diseño sistemático de metabarreras sísmicas basadas en arreglos periódicos de resonadores. Esperamos proponer diseños de resonadores específicos para reducir las solicitaciones sísmicas en escenarios realistas. En la protección contra sismos buscamos poner atención de manera integral en el medio circundante y en la estructura. Esto representa un cambio de paradigma significativo. |

## Referencias

Colombi, 2016. Resonant metalenses for flexural waves in plates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(5):EL423-EL428.

Colombi; D. Colquitt; P. Roux; S. Guenneau y R. V. Craster, 2016. A seismic metamaterial: The resonant metawedge. *Scientific Reports*, 6:27717.

D. J. Colquitt; A. Colombi.; R. V. Craster; P. Roux y S. R. L. Guenneau, 2017. Seismic metasurfaces: Subwavelength resonators and Rayleigh wave interaction. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 99:379-393.

Fathi, L. F. Kallivokas y B. Poursartip, 2015. Full-waveform inversion in three-dimensional PML-truncated elastic media. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 296:39-72, 2015.

H. Goh y L. F. Kallivokas. Group velocity-driven inverse metamaterial design, *Journal of Engineering Mechanics*, 2019 (in review).

H. Goh y L. F. Kallivokas. Inverse metamaterial design for controlling band gaps in scalar wave problems. *Wave Motion* (accepted), 2019.

L. F. Kallivokas; A. Fathi; S. Kucukcoban; K. H. Stokøe; J. Bielak y O. Ghattas. Site characterization using full waveform inversion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 47:62-82, 2013.

J. W. Kang y L. F. Kallivokas. The inverse medium problem in heterogeneous PML-truncated domains using scalar probing waves. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(1):265-283, 2011.

S. Krödel; N. Thomé y C. Daraio. Wide band-gap seismic metastructures. *Extreme Mechanics Letters*, 4:111-117, 2015.

S. Kucukcoban; H. Goh y L. F. Kallivokas. On the full-waveform inversion of Lamé parameters in semi-infinite solids in plane strain. *International Journal of Solids and Structures*, 2019.

M. Miniaci; A. Krushynska; F. Bosia y N. M. Pugno. Large scale mechanical metamaterials as seismic shields. *New Journal of Physics*, 18(8):083041, 2016.

Palermo; S. Krödel; A. Marzani y C. Daraio. Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves. *Scientific Reports*, 6:39356, 2016.

H. Bao; J. Bielak; O. Ghattas; L. F. Kallivokas; D. R. O'Hallaron; J. R. Shewchuk y J. Xu. Large-scale simulation of elastic wave propagation in heterogeneous media on parallel computers, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 152 (1-2), 85-102, 1998.

J. Avilés y F. J. Sánchez-Sesma. Piles as barriers for elastic waves. *J of the Geotechnical Engineering Division, ASCE Vol 109*, No 9, pp 1133-1146, Sept 1983.

F. J. Sánchez-Sesma; U. Iturrarán-Viveros y M. Perton. "Some properties of Green's functions for diffuse field interpretation", *Mathematical Methods in the Applied Sciences* 40 (9), 3348-3354. (2017) (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/mma.3947.

- J. Avilés y F. J. Sánchez-Sesma. Foundation isolation from vibrations using piles as barriers, *Journal of Eng Mechanics, ASCE*, Vol 114, No 11 pp 1854-1870, nov 1988.
- J. Avilés y F. J. Sánchez-Sesma. Atenuación de ondas elásticas con barreras de pilotes, *Revista Int de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol 4, No 2, pp 215-228, 1988.
- H. Kawase; F. J. Sánchez-Sesma y S. Matsushima. The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Inversions Based on Diffuse-Field Theory for Plane Waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, No. 5, pp. 2001-2014, 2011, doi: 10.1785/0120100263.
- M. Perton y F. J. Sanchez-Sesma. The indirect boundary element method to simulate elastic wave propagation in a 2-D piecewise

homogeneous domain, *Geophys Journal International* 202, 1760–1769 (2015) doi: 10.1093/gji/ggv241, GJI Seismology,

J. Morales-Valdéz; L. Alvarez-Icaza y F. J. Sánchez-Sesma. Shear building stiffness estimation by wave traveling time analysis, *Struct Control Health Monit*, 2017. <https://doi.org/10.002/stc.2045>.