

Estudio numérico de muros conformados por elementos disipadores de energía

Diego Mauricio Niño Mecón

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Civil

Director

Oscar Javier Begambre Carrillo

Doctor en Ingeniería Civil

Codirector

Jesús Antonio García Sánchez

Doctor en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2020

Dedicatoria

A mi familia

A mi padre, Fredy Niño

A mi madre, Sorangel Mecón

A mi hermana, Valentina Niño

El motivo por el cual y para el cual culmino esa meta.

Las palabras no logran expresar verdaderamente una emoción.

Diego Mauricio Niño Mecón

Agradecimientos

A mi director de proyecto Oscar Javier Begambre Carrillo y mi codirector de proyecto Jesús Antonio García Sánchez por la ayuda brindada, su seguimiento durante el proceso, por sus consejos, opiniones y enseñanza para lograr culminar esta investigación.

A la doctora Carolina por su colaboración y consejos realizados para el desarrollo de las simulaciones.

Al profesor Jesús Daniel Villalba Morales por sus consejos y opiniones para el planteamiento de este proyecto de investigación.

A los ingenieros civiles UIS, David Cotes y Luis Niño por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

A mi familia por el apoyo constante, compañía y razón de ser de esta formación académica.

Y a todos aquellos que de cierta manera fueron parte de este proceso.

CONTENIDO

Introducción	11
1. Objetivos	15
1.1 <i>Objetivo General</i>	15
1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	15
2. Marco teórico	16
2.1 <i>Metamateriales</i>	16
2.2 <i>Análisis modal</i>	16
2.3 <i>Análisis armónico</i>	17
2.4 <i>Método de la potencia media del ancho de banda</i>	18
2.5 <i>Bandas de parada</i>	19
3. Método.....	20
3.1 <i>Célula base</i>	21
3.2 <i>Configuraciones de la célula base</i>	23
3.3 <i>Muros de mampostería tradicional</i>	25
3.4 <i>Modelos de elementos finitos</i>	28
3.4.1 <i>Discretización de los modelos.</i>	31
3.5 <i>Amortiguación del sistema</i>	31
3.6 <i>Bandas de parada</i>	32
4. Resultados	33
5. Discusión.....	42
6. Conclusiones	45
Referencias Bibliográficas.....	47

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Propiedades de los materiales empleados</i>	20
Tabla 2 <i>Dimensiones ladrillo</i>	21
Tabla 3 <i>Propiedades de los elementos del muro</i>	27
Tabla 4 <i>Propiedades configuraciones de los muros</i>	27
Tabla 5 <i>Frecuencias naturales del tercer modo de vibración de las configuraciones del muro</i>	33
Tabla 6 <i>Desplazamientos de los muros en el plano</i>	34
Tabla 7 <i>Coefficientes de amortiguación y comparación con el primer muro de referencia</i>	35
Tabla 8 <i>Coefficientes de amortiguación y comparación con el segundo muro de referencia (ladrillos toletes)</i>	36
Tabla 9. <i>Frecuencias naturales y modos de vibración del primer muro de referencia</i> ...	39
Tabla 10. <i>Frecuencias naturales y modos de vibración del muro I con núcleo de 6cm.</i> ..	39

Lista de Figuras

Figura 1. Grafica explicación método de la potencia media del ancho de banda.....	19
Figura 2. Ladrillo base, recubrimiento y núcleo másico.....	22
Figura 3. Variación espesores (a) núcleo de 6 cm (b) núcleo de 4 cm (c) núcleo de 2 cm.	22
Figura 4. Configuración I.....	23
Figura 5. Configuración II.	24
Figura 6. Configuración III.....	24
Figura 7. Configuración X.....	25
Figura 8. Configuración +.....	25
Figura 9. Primer muro de referencia.....	26
Figura 10. Segundo muro de referencia ladrillos toletes.	26
Figura 11. Acelerograma sismo Umbria.....	29
Figura 12. Función de respuesta en frecuencia.....	31
Figura 13. Comparación FRF frecuencias de interés.....	37
Figura 14. Comparación FRF.	37
Figura 15. FRF de todas las configuraciones en las frecuencias de interés respectivas. .	38
Figura 16. Muro configuración I núcleo de 6cm y primer muro de referencia.	38
Figura 17. Función de respuesta en frecuencia muro I con núcleo de 6cm.	40
Figura 18. Angulo de fase muro I con núcleo de 6cm.....	40

Resumen

Título: Estudio numérico de muros de mampostería conformados por elementos disipadores de energía *

Autor: Diego Mauricio Niño Mecón **

Palabras Clave: disipación de energía, función de respuesta en frecuencia, metamateriales, muros de mampostería, elementos finitos.

Descripción: En este estudio numérico se propuso, se modeló y se realizaron simulaciones sobre un nuevo tipo de muro de mampostería con metamateriales, en donde los ladrillos fueron integrados con resonadores locales, los cuales consisten en núcleos metálicos con un recubrimiento elástico, el espesor de los núcleos metálicos se varió con el fin de observar su influencia en la respuesta de los sistemas y estas inclusiones fueron ubicadas en las perforaciones de los ladrillos. Se caracterizó el comportamiento dinámico de los muros usando el software comercial ANSYS a través de un análisis modal, un análisis armónico y el método de banda ancha de media potencia. Se usa como referencia muros de mampostería tradicional, cuya Función de respuesta en frecuencia –FRF- es comparada con la FRF del muro con resonadores locales, con esto se busca poder determinar si en las configuraciones consideradas aparecen las bandas de parada. Para los sistemas propuestos mediante el estudio realizado se halló que se aumentaron los desplazamientos sobre el plano del muro y los coeficientes de amortiguación correspondientes al tercer modo de vibración de los sistemas, todo respecto a las estructuras de referencia. Finalmente, no se evidenció la aparición de las bandas de parada dado que el comportamiento de los sistemas fue en general similar.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, Doctor en Ingeniería Civil. Codirector: Jesús Antonio García, Doctor en Ingeniería Civil.

Abstract

Title: Numerical study of masonry walls composed of energy dissipative elements*

Author: Diego Mauricio Niño Mecón**

Key Words: dissipative capacity, masonry wall, finite element, frequency response function, metamaterials.

Description: In this study, we proposed, modeled and simulated a different type of masonry wall with metamaterials, in which the bricks are integrated with local resonators, they consist of a heavy metal core and an elastic layer of coating, the thickness of the heavy metal core varied in order to observe the influence on the response of the systems and these inclusions were placed in the brick holes. We characterize the dynamic behavior of this wall using the commercial software ANSYS through a modal analysis, harmonic analysis and the half power bandwidth method. We use a common masonry wall as a reference structure, whose frequency response function –FRF– is compared with the FRF of the wall with local resonators, in order to determine whether the stop bands appear in the configurations considered. For the proposed systems by the performed study, we determined that the displacements over the plane of the wall increased and the damping ratios corresponding to the third mode of vibration of the systems were improved regarding to the reference structure. Finally, there was no stop band gaps, due to the reason the behavior of the systems was in general the same.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, Doctor en Ingeniería Civil. Codirector: Jesús Antonio García, Doctor en Ingeniería Civil.

Introducción

En la actualidad en el área de los materiales se han evidenciado significativos avances, particularmente en un novedoso campo denominado los metamateriales. Esta nueva forma de diseño de materiales puede permitir soluciones alternativas para diversos problemas en la ingeniería civil, lo que eventualmente permitirá generar innovación tecnológica aplicada.

Los metamateriales consisten en la distribución diseñada de la materia dentro de una célula base, tal que se puedan manipular y obtener propiedades físicas “personalizadas” que inclusive no estén fácilmente disponibles en la naturaleza. De acuerdo con Tremblay (2019), estos materiales suelen ganar sus propiedades de su estructura en lugar de su composición.

Estas estructuras diseñadas, son la combinación de elementos situados en patrones repetitivos, en donde la escala dependerá de la longitud de onda que se procure controlar. Para el régimen de onda que se diseña el metamaterial, este puede bloquear o absorber las ondas deseadas (Brûlé et al., 2020) y por medio de estas estructuras periódicas se puede lograr un filtro para cualquier tipo de onda (electromagnéticas, acústicas, elásticas) (Wang et al., 2006).

Debido a las propiedades inusuales que se pueden obtener mediante el diseño de un metamaterial se abre la posibilidad de crear materiales avanzados con funcionalidades novedosas. Los metamateriales tienen aplicaciones ya consolidadas en diversos campos como tecnologías ópticas, acústicas, electromagnéticas, espaciales e inclusive en ingenierías

como la mecánica y de materiales. Sin embargo, algunas otras ingenierías, como la civil están apenas iniciando estudios, utilizando los metamateriales (Deymier, 2013; Gulyaev et al., 2008; Tong, 2018).

Entre las principales líneas de aplicación en ingeniería civil se tienen, i) los escudos sísmicos, que se enfocan en controlar la propagación de las ondas sísmicas (Du et al., 2017); ii) las metaestructuras sísmicas, se han integrados con la tecnología de los resonadores (Krödel et al., 2015); iii) en elementos de disipación de energía (Bacquet & Hussein, 2018); o en estructuras con resonadores internos para mitigar cargas dinámicas (Khan et al., 2018).

Específicamente, algunas investigaciones ya han consolidado los metamateriales en la ingeniería civil, una de esas es el denominado metaconcreto, en el cual se reemplazan los agregados gruesos del concreto por unas esferas compuestas de un núcleo de metal pesado recubiertas por un material blando. Este consiste en nuevo tipo de concreto para la disipación de ondas elásticas ante una excitación dinámica (Mitchell et al., 2014). Los estudios realizados por (Mitchell et al., 2015) indican que, el metaconcreto es capaz de mejorar el desempeño ante cargas dinámicas, en donde se evidencia que ante una mayor cantidad de agregados (metaconcreto) se da una mayor reducción en la transmisión de ondas elásticas, se produce resonancia en las frecuencias diseñadas, lo cual permite absorción de energía en un rango de frecuencias más amplio, (Mitchell et al., 2016) extienden el concepto del comportamiento de las inclusiones de metaconcreto ante la fractura frágil producida por una carga de choque. Los resultados de ese trabajo, indicaron que la energía mecánica es capturada por los agregados (metaconcreto), y la resonancia de estos hace que se presente

una masa efectiva negativa, de esta forma se reduce la transmisión de energía, el tamaño de la zona afectada por la fractura y el esfuerzo longitudinal en la losa de mortero.

En estudios posteriores, se ha podido observar que la reducción de los esfuerzos en el mortero está relacionada con el módulo de elasticidad del recubrimiento del agregado (E_c) y que las geometrías (radio del agregado y espesor del recubrimiento) son factores menos influyentes. Por lo cual, si el recubrimiento del agregado presente en el metac concreto es de 2 a 3 órdenes de menor magnitud en comparación con el núcleo másico, la energía no logra ser transmitida a los agregados resonantes (Kettenbeil & Ravichandran, 2018; Mitchell et al., 2014).

De esta idea del metac concreto surge la inquietud de adaptar una configuración para muro de ladrillos como elementos disipadores de energía. Los cuales se comportan como un sistema periódico de disipadores (masa-resorte) proyectado dentro de una estructura típica de la ingeniería civil.

Como se puede evidenciar, con el metac concreto, los materiales avanzados conformados por dos materiales con diferentes propiedades, se caracterizan porque uno de los materiales actúa como el transmisor de la onda y el otro logra la disipación de esta. En donde hay ciertos parámetros que influyen en la aparición de bandas de parada, los cuales pueden ser las relaciones de magnitudes entre cada propiedad característica del material, el volumen que ocupa el material disipador y la organización o distribución de los disipadores dentro del material dispersor de la onda (Llinares & Holgado, 1999). Finalmente, en el trabajo de (Zhu et al., 2014) se presentó una viga chiral con múltiples resonadores en donde se determina

cuantitativamente la cantidad de resonadores para activar la función de supresión en un ancho de banda amplio.

Para lo cual se realiza el modelado y estudio numérico de la capacidad de disipación de energía que puede tener un muro de mampostería conformado por ladrillos modificados para comportarse como elementos disipadores de energía (metamateriales para la disipación de energía) y poder caracterizar su comportamiento haciendo una comparación con la mampostería tradicional. Que en este proyecto se refiere al uso de ladrillos de arcilla huecos con juntas de mortero, y los muros propuestos. También fueron analizadas las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) para caracterizar e identificar la posible aparición de bandas de parada, las cuales son intervalos de frecuencias donde las excitaciones externas no se propagan.

Por consiguiente, en este proyecto de investigación se propuso unas bases para la integración de una célula de metamaterial de disipación dinámica, con una estructura clásica de la ingeniería civil, como lo es el ladrillo de mampostería. Se espera que esta propuesta pueda traer beneficios para nuestra región, debido a que esta se encuentra en una zona de alta sismicidad y su crecimiento ha dado paso a edificaciones altas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar un estudio numérico de un muro de ladrillos adaptados como elementos disipadores de energía.

1.2 Objetivos Específicos

- Proponer la geometría y material del elemento disipador de energía (ladrillo) para el acople y conformación de un muro.
- Determinar y modelar las configuraciones (disposición o distribución de los elementos disipadores, ladrillos modificados) del muro conformado por elementos disipadores de energía y un muro tradicional de mampostería.
- Comparar la capacidad de disipación de energía, las funciones de respuesta e identificar posibles bandas de parada, de un muro de mampostería y un muro conformado por elementos disipadores de energía ante una excitación dinámica.

2. Marco teórico

2.1 Metamateriales

Actualmente se ha dado paso a materiales los cuales pueden ser concebidos (científicamente) con propiedades mecánicas y acústicas las cuales son difíciles de encontrar en la naturaleza, estas propiedades se ven determinadas por la estructura del material en vez de su composición química (Barchiesi et al., 2019) para lo cual a estos metamateriales con propiedades mecánicas novedosas pueden ser diseñados, manipulando su estructura y materiales que lo componen, para controlar ciertos fenómenos presentes a ciertas escalas de longitud (Silberschmidt & Matveenko, 2015).

2.2 Análisis modal

En el análisis modal se solucionará el problema de los valores propios o eigenvalores, los cuales nos brindaran las frecuencias naturales y los modos de vibración del sistema. Para lo cual el sistema se considera sin amortiguamiento y en vibración libre. La ecuación diferencial que gobierna este sistema es:

$$[m]\ddot{x} + [k]x = 0 \quad (1)$$

Donde \ddot{x} representa el vector de aceleración y x el vector de desplazamiento. $[m]$ y $[k]$ representan la matriz de masa y matriz de rigidez de los sistemas respectivamente.

A partir de (1) se puede solucionar la ecuación característica del sistema, para hallar las frecuencias naturales

$$\det([k] - \omega^2[m]) = 0 \quad (2)$$

En cuanto a los modos de vibración para una frecuencia específica

$$[k] - \omega^2[m] u_i = 0 \quad (3)$$

En donde, ω_i corresponde a las frecuencias naturales y u_i a los modos de vibración del sistema (Chopra, 2014).

2.3 Análisis harmónico

Mediante este análisis se desea explorar la respuesta del sistema ante una excitación armónica, para lo cual se tiene una excitación armónica como:

$$p(t) = A_0 \text{Sen}(\omega t) \quad (4)$$

Donde A_0 es la amplitud inicial de la excitación y ω las frecuencias de excitación para esta carga harmónica que se le aplicara al sistema.

En este análisis se tiene en cuenta la amortiguación y la carga externa aplicada al sistema, donde para la ecuación de movimiento del sistema que se tiene que:

$$[m]\ddot{x} + [c]\dot{x} + [k]x = A_0 \text{Sen}(\omega t) \quad (5)$$

Donde \ddot{x} representa el vector de aceleración, \dot{x} el vector de velocidades y x el vector de desplazamiento. $[m]$, $[c]$ y $[k]$ representan la matriz de masa, matriz de amortiguación y matriz de rigidez de los sistemas respectivamente.

De (5) se puede tener la respuesta del estado estacionario, la cual es:

$$X = \frac{A_0}{k} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \text{Sen}(\omega t) \quad (6)$$

Donde A_0 es la amplitud inicial de la excitación, k la rigidez del sistema, ω las frecuencias de excitación y ω_n las frecuencias naturales del sistema (Jazar, 2013).

2.4 Método de la potencia media del ancho de banda

Este método nos permite conocer los coeficientes de amortiguación de un sistema y consiste en hallar la máxima amplitud de la respuesta, donde, la frecuencia natural del sistema corresponde a esta respuesta máxima, a partir de esta se hallan dos frecuencias más, estas nuevas frecuencias se obtienen de los dos puntos en donde la recta que genera la amplitud máxima dividida por la raíz cuadrada de dos interseca la curva (Olmos & Roesset, 2009) (Figura 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Con este ancho de banda hallado de las respectivas frecuencias se dividió entre dos veces la frecuencia natural de la máxima respuesta y se obtuvo al factor de amortiguación del sistema.

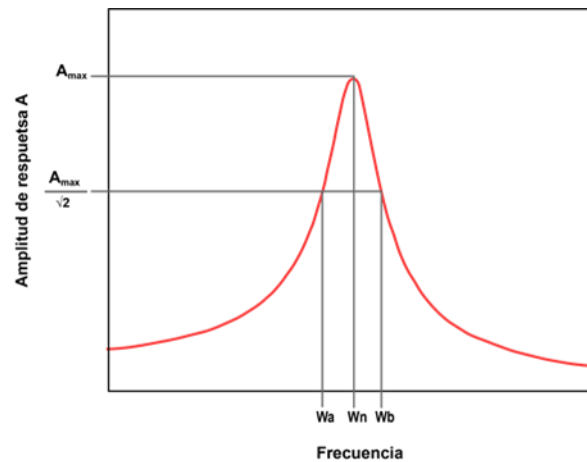


Figura 1. Grafica explicación método de la potencia media del ancho de banda.

Fuente: Half-power bandwidth approach, por Olmos & Roesset, 2009, Analytical evaluation of the accuracy of the half-power bandwidth method to estimate damping ratios in a structure.

$$\xi = \frac{\Delta\omega}{2\omega_n}, \quad (1)$$

$\Delta\omega$: Ancho de banda ($\omega_a - \omega_b$)

ω_n : Frecuencia natural del sistema

ξ : Coeficiente de amortiguación

2.5 Bandas de parada

Las bandas de parada son rangos de frecuencia donde la transmisión de las ondas elásticas o energía mecánica a través de estructuras periódicas no se produce (Fomenko et al., 2014). En donde la aparición de las bandas de parada completa no permite ninguna eigenfrecuencia para cualquier valor de frecuencia y ángulo de incidencia de la onda (Sigalas & Economou, 1995). Con base en estas bandas de parada, es posible reflejar señales acústicas o elásticas, mediante resonadores locales, en longitudes de onda muy por encima del tamaño característico de la estructura del material. Actualmente, se han realizado investigaciones de materiales los cuales presentan brechas de banda a baja frecuencia o también dispositivos para encubrimiento óptico y acústico (Krödel et al., 2015).

3. Método.

En este trabajo, se propuso integrar el uso de varios resonadores dentro del muro, buscando integrar el concepto de los metamateriales a estructuras clásicas de la ingeniería civil mediante las inclusiones propuestas (núcleo másico y su recubrimiento elástico).

Las propiedades de los materiales utilizados se encontraron basados en la literatura, (Alocer, 1996; Claisse, 2016; Magenes & Calvi, 1997; Mitchell et al., 2014; Osma & Hernández, 2014; P, 2013; Zhou et al., 2018), y en normas del área, (NTC 4205 INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2009) y (NSR 10 Nsr-10, 2010).

Los materiales empleados para los muros se definieron con propiedades elásticas isotrópicas. Los materiales usados se dividen en: el mortero de pega para las juntas, la arcilla cocida de los ladrillos, el caucho como material flexible del recubrimiento y el acero para el núcleo másico. Las propiedades de cada material se exponen en la Tabla 1.

Tabla 1.

Propiedades de los materiales empleados

	Arcilla cocida	Mortero	Caucho	Acero	Unidades
Densidad	2070	2500	900	7850	kg/m ³
Módulo de elasticidad	1,11E+09	3,00E+10	1,00E+07	2,00E+11	Pa
Coefficiente de Poisson	0,23	0,2	0,49	0,3	
Módulo de cortante	4,51E+08	1,25E+10	3,36E+06	7,69E+10	Pa
Módulo de compresibilidad	6,85E+08	1,67E+10	1,67E+08	1,67E+11	Pa
Coefficiente de amortiguación	5%	5%	15%	0	

El ladrillo seleccionado para conformar los muros es de un material cerámico, la arcilla cocida, el cual constó con un único orificio central. Estos ladrillos se clasifican como unidades de perforaciones horizontales o también llamados como ladrillo PH, y su uso para este proyecto se limita como mampostería no estructural. Este tipo de ladrillo elegido, generalmente es empleado para dar un acabado arquitectónico especial. Las medidas del ladrillo son las presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2

Dimensiones ladrillo

Altura	Ancho	Espesor	Espesor tabiques	Altura orificio	Ancho orificio	Unidad
18	18	7	1	8	8	[cm]

3.1 Célula base

Según lo reportado en la literatura, las células disipadoras comúnmente utilizadas en metamateriales, consisten en un núcleo másico recubierta de un material flexible (Brûlé et al., 2019; Goffaux & Sánchez-Dehesa, 2003; Hirsekorn, 2004; Marco et al., 2016; Mitchell et al., 2014; Sheng et al., 2003).

Específicamente, en este proyecto se utilizó el ladrillo con perforaciones, con una perforación central grande, como elemento rígido, un núcleo de acero como material másico – de sección cuadrada -, y la parte elástica de la inclusión, se compuso de un material flexible como el caucho (Figura 2).

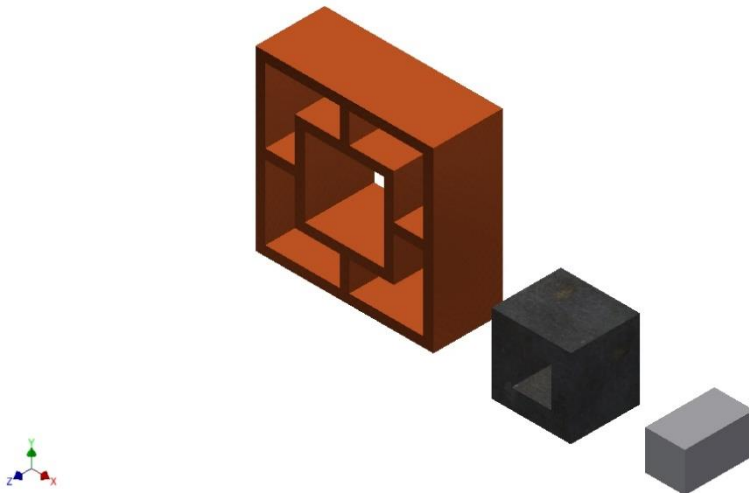


Figura 2. Ladrillo base, recubrimiento y núcleo másico.

Se quiso observar la influencia de la inclusión sobre el sistema, núcleo másico y su recubrimiento, por lo cual se mantuvo como geometría base el ladrillo, previamente escogido, y se varió el espesor de la capa de material flexible junto con el ancho del núcleo másico.

Para esto se definieron tres espesores del núcleo, y teniendo en cuenta que el ladrillo a emplear siempre fue el mismo, se tiene un espesor del recubrimiento diferente para cada uno. Los diferentes espesores elegidos para realizar el estudio fueron de 2 cm ,4 cm y 6 cm (Figura 3).

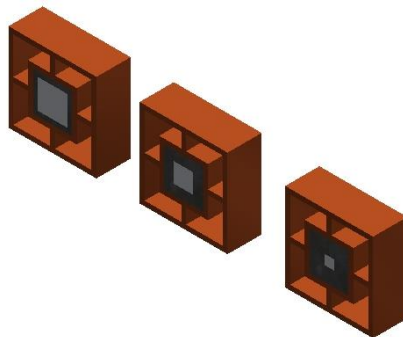


Figura 3. Variación espesores (a) núcleo de 6 cm (b) núcleo de 4 cm (c) núcleo de 2 cm.

3.2 Configuraciones de la célula base

Ya con la estructura que se planteó, se definieron las células base y su distribución para conformar el muro, estos fueron compuestos por el patrón repetitivo de las células base. Se propuso trabajar con seis configuraciones, en donde, la presencia o ausencia de las inclusiones fue el factor a modificar entre cada una de las configuraciones y células base propuestas. En tres de las configuraciones establecidas se definió la condición de estar compuestas por tres ladrillos en la célula base. Las dimensiones de los muros fueron de 189cm de alto por 180 cm de ancho.

Para la primera configuración de la célula base se tuvo que, todos los ladrillos llevaron la inclusión definida previamente (Figura 4).

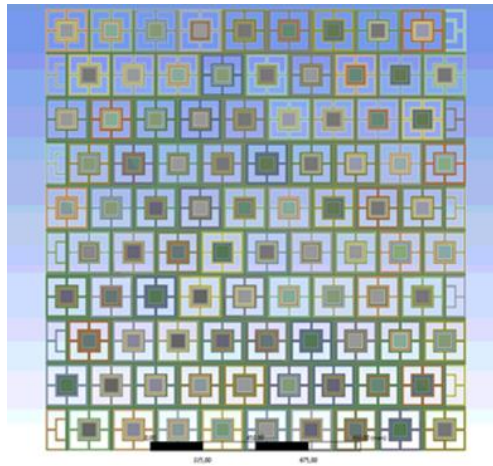


Figura 4. Configuración I.

La configuración II se compuso de dos ladrillos sin inclusión y uno con inclusión (Figura 5).

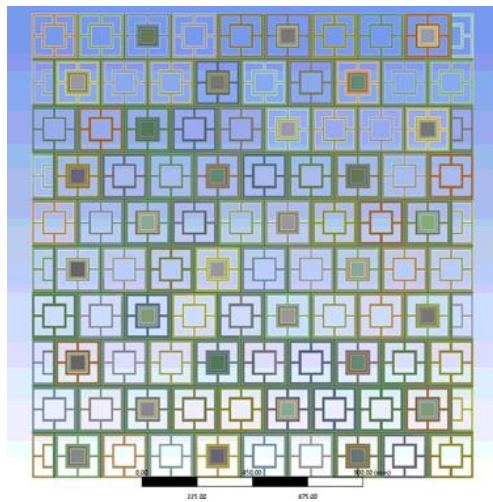


Figura 5. Configuración II.

En la tercera configuración tuvo un solo ladrillo sin la inclusión y los otros dos con inclusión (Figura 6).

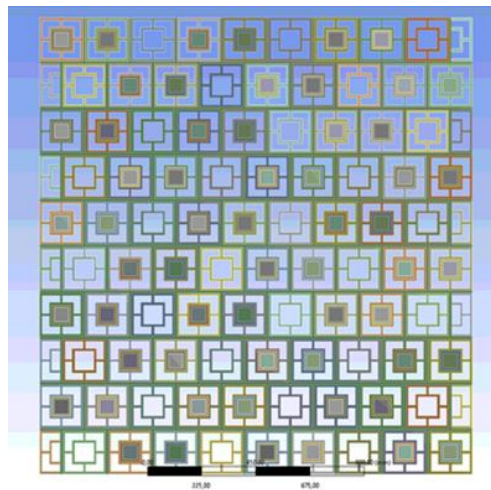


Figura 6. Configuración III.

La cuarta y quinta configuración tuvo un enfoque más global generando una figura geométrica a lo largo del muro (Figura 7 y Figura 8).

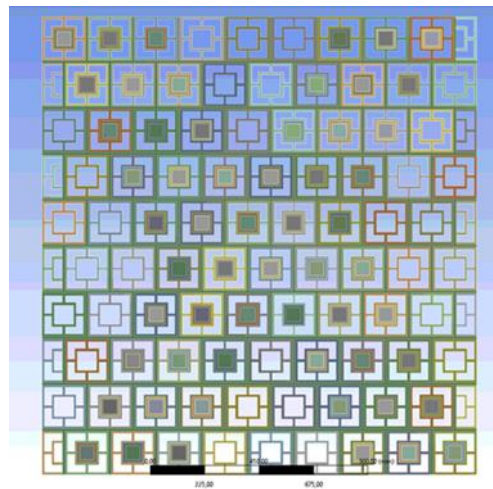


Figura 7. Configuración X.

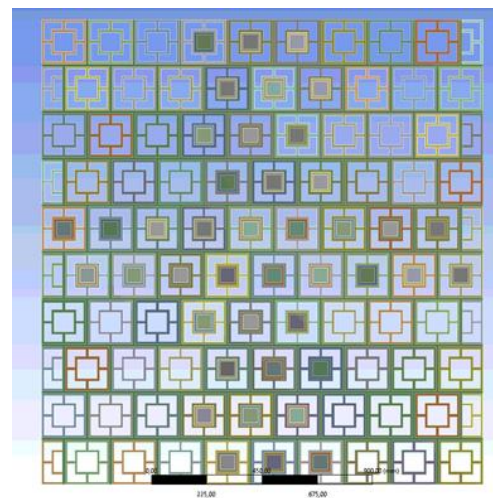


Figura 8. Configuración +.

3.3 Muros de mampostería tradicional

Para el primer muro de referencia, que tuvo los ladrillos definidos en la Tabla 2, la colocación de estos fue a estampa, por lo cual el ancho del muro es igual a la anchura del ladrillo (7 cm). Las dimensiones de los muros analizados fueron de 189 cm de alto por 180 cm de ancho (Figura 9), en donde se estableció el ancho del mortero de pega de 1 cm en todas las brechas del muro.

Por último, se definió un segundo muro de ladrillos toletes (Figura 10), y así se obtuvo otra estructura base de referencia, con la cual se realizó una comparación. Las dimensiones de este se definieron de la siguiente forma: de 6 cm de alto, 25 cm de largo y 12 cm de ancho. Estos ladrillos fueron macizos y se colocaron en aparejo a soga para la construcción del muro. Las dimensiones del muro fueron de 1.81 m en su base y de 1.88 m de altura, también se estableció el ancho del mortero de pega de 1 cm en todas las brechas del muro.

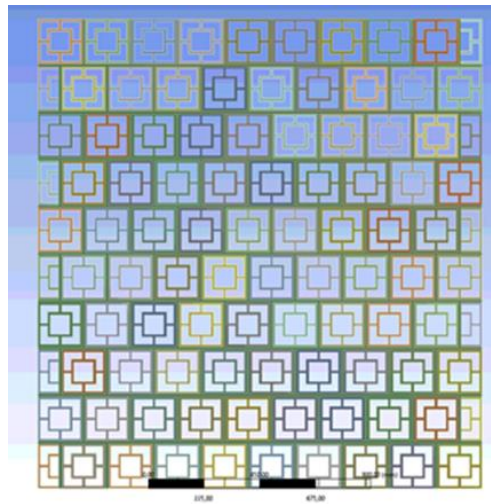


Figura 9. Primer muro de referencia.

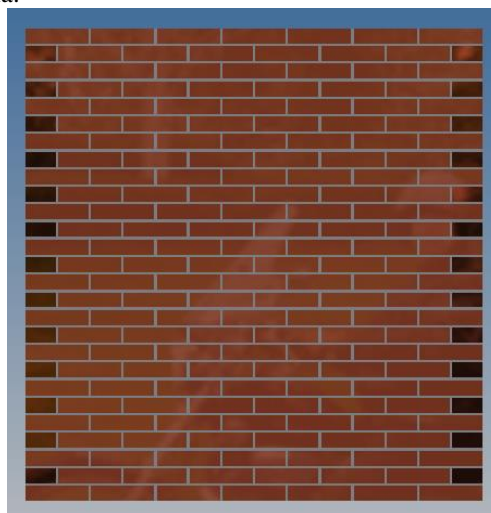


Figura 10. Segundo muro de referencia ladrillos toletes.

Se realizó la comparación de las características de cada modelo en cuanto lo referido a peso y volumen de cada elemento que compone la inclusión y el ladrillo con perforaciones horizontales, esto se expone en la Tabla 3.

Tabla 3

Propiedades de los elementos del muro

Núcleo	Material	Volumen [mm ³]	Peso [kg]
	Ladrillo	8,12E+05	1,6808
2 cm	Acero	2,80E+04	0,2198
	Caucho	4,20E+05	0,378
4 cm	Acero	1,12E+05	0,8792
	Caucho	3,36E+05	0,3024
6 cm	Acero	2,52E+05	1,9782
	Caucho	1,96E+05	0,1764

También se realizó una comparación del peso y volumen de todas las configuraciones propuestas, estos resultados se exponen en la Tabla 4.

Cabe resaltar que para este caso en particular se empleó únicamente el primer muro de referencia, el cual tuvo la misma geometría de ladrillo con perforaciones horizontales y no se hizo la comparación con el muro de ladrillo macizo.

Tabla 4

Propiedades configuraciones de los muros

	Volumen [mm ³]	Peso [Kg]
Primer muro de referencia		
	9,94E+07	215,58
Núcleo 2 cm		
I	1,40E+08	269,38
II	1,13E+08	233,51
III	1,26E+08	251,44
X	1,25E+08	250,25
+	1,18E+08	240,68

Núcleo 4 cm		
I	1,40E+08	324,26
II	1,13E+08	251,02
III	1,26E+08	286,47
X	1,25E+08	284,11
+	1,18E+08	265,2
Núcleo 6cm		
I	1,40E+08	409,49
II	1,13E+08	280,21
III	1,26E+08	344,85
X	1,25E+08	340,54
+	1,18E+08	305,68

3.4 Modelos de elementos finitos

En el planteamiento para el modelado de los muros se tienen las posibilidades de realizar un micro-modelado detallado, micro-modelado simplificado o un macro-modelado, según plantea Lourenço [26].

Así que la construcción del sistema se realizó considerando la distribución real de la geometría en la célula del metamaterial, las unidades de células base y el mortero no tuvieron ningún tipo de simplificación, aunque para el modelamiento del muro si se consideró con simplificaciones.

Los elementos de contacto (unión ladrillo-mortero) fueron considerados perfectos (*bonded*), sin ningún tipo de deslizamiento, por lo que esta no fue analizada y los modelos fueron tomados como una sola pieza para su análisis, de tal forma fue posible ahorrar tiempo y costo computacional.

La caracterización dinámica de los muros fue realizada de forma lineal, por lo tanto, no fueron considerados los modos de falla de la estructura ni los comportamientos no lineales del material y la geometría de cada configuración de los muros se realizó mediante el software comercial Autodesk Inventor®.

Todos los sistemas establecidos (diferentes configuraciones) se consideraron anclados en su base, apoyo fijo, y fueron sometidos a una excitación dinámica, en donde el tipo de entrada (amplitud) para el análisis armónico, fue una aceleración de base aplicada en el plano, la cual se definió hallando la aceleración máxima de un sismo perteneciente a un estudio de microzonificación sísmica de Bucaramanga (Rodríguez, 2019) (Figura 11).

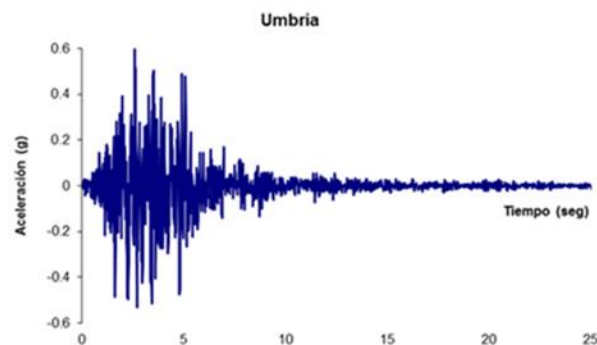


Figura 11. Acelerograma sismo Umbria

Fuente: Acelerograma de diseño de Umbria corregido, filtrado y escalado, por Rodríguez, 2019, Efecto de amortiguadores viscosos no lineales sobre edificaciones residenciales con irregularidad en planta y/o altura.

Mediante el análisis modal se identificaron las características dinámicas del sistema, por lo que se solucionó el problema de los valores propios o eigenvalores, con los cuales se determinaron las frecuencias naturales y los modos de vibración del sistema.

Inicialmente para el análisis modal se determinó que el sistema vibró libremente, se asumió que los desplazamientos variaron armónicamente con el tiempo, y sin amortiguamiento por lo que no se hallaron los valores de las constantes de la amortiguación proporcional a la masa y amortiguación proporcional a la rigidez.

Por medio de este análisis modal se encontró que con los primeros 12 modos se obtenía una contribución significativa en la respuesta dinámica de los sistemas y que también se logró captar el modo de vibración de flexión en el plano, el cual era nuestro objetivo principal.

Con estas frecuencias naturales y los modos de vibración se determinó cual modo es el correspondiente a una respuesta sobre el plano del muro y la frecuencia natural de este modo fue la de principal interés para este trabajo, para la cual se realizó el análisis de este trabajo de investigación y se hallaron los valores de los coeficientes de amortiguación.

También se realizó un análisis armónico, para conocer la respuesta del sistema en el estado estacionario, en este análisis se definió la amplitud inicial de la excitación y se estableció que las frecuencias de excitación ω variaron desde 0 hasta 65 Hz. Este ancho de banda de frecuencias se definió de esta forma debido a que se cubrían todas las frecuencias de vibración de los primeros 12 modos de vibración del sistema los cuales eran de nuestro interés.

Con base en el análisis armónico se pudo obtener la FRF- frecuencia de respuesta (Figura 12) la cual es la solución del estado estacionario de la ecuación de movimiento en cada frecuencia, cuando el sistema es excitado armónicamente, para el análisis de la respuesta en frecuencia se busca la amplitud de las oscilaciones del estado estacionario como función de la frecuencia de excitación (Jazar, 2013, Chapter 3) y al obtener la respuesta en frecuencia del sistema se pueden hallar las frecuencias naturales y coeficiente de amortiguamiento del sistema (Chopra, 2014, Chapter 3.4.2). Finalmente, con las FRF halladas se pudo estimar los coeficientes de amortiguación de los sistemas y se estudió la posible aparición de las bandas de parada.

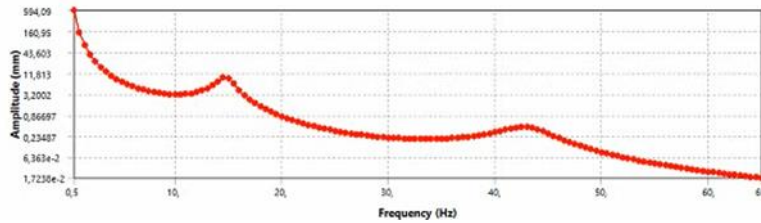


Figura 12. Función de respuesta en frecuencia

3.4.1 Discretización de los modelos. El refinamiento de la malla, que se requiere sea uniforme, bien estructurada, simétrica y de alta calidad, se planteó para controlar el parámetro geométrico de la calidad del elemento, el cual se estableció que se debe tener una calidad promedio de los elementos superior a 0,8, según la métrica del programa, esta métrica se basa en la relación entre el volumen y la longitud del borde del elemento, en donde 1 es un cubo perfecto.

Dado que la geometría es regular se logró cumplir esta condición mediante un tamaño por defecto del elemento de 15mm en todos los modelos. Los elementos se definieron como solid186, el cual es un elemento hexaedral, tiene 20 nodos y es de orden cuadrático, por lo cual cuenta con nodos en el medio del elemento, lo anterior permite una mayor precisión en la interpolación de los resultados obtenidos en el interior de los elementos.

3.5 Amortiguación del sistema

La amortiguación es un factor importante en una estructura, presente generalmente en una forma viscosa lineal (Papagiannopoulos & Hatzigeorgiou, 2011) pero esta no puede ser estimada desde el diseño de la estructura, por lo cual se deben realizar estudios posteriores para determinar los coeficientes de amortiguación del dicho sistema (Chopra, 2014, Chapter 3.4). Se emplearon

las FRFs obtenidas anteriormente y con el método de la potencia media del ancho de banda se determinaron los coeficientes de amortiguación.

3.6 Bandas de parada

Para esta investigación uno de los objetivos fue identificar si se produjeron las brechas de bandas o bandas de parada, para ciertos rangos de frecuencia con el fin de lograr la atenuación de las ondas que llegan al sistema. Con base en estas bandas de parada, es posible reflejar señales acústicas o elásticas, mediante resonadores locales, en longitudes de onda muy por encima del tamaño característico de la estructura del material (Krödel et al., 2015). Por lo que se estudió la aparición de las bandas de parada en las diferentes configuraciones con sus diferentes inclusiones por medio de las FRF.

4. Resultados

Con la metodología definida se procedió a construir los modelos y realizar la simulación de cada uno de los sistemas propuestos. Por lo que se realizó la caracterización dinámica de los sistemas.

Con el análisis modal realizado se pudo hallar las frecuencias naturales de los sistemas para las formas modales correspondientes a la flexión en el plano, expuestas en la Tabla 5.

Tabla 5

Frecuencias naturales del tercer modo de vibración de las configuraciones del muro

Configuración del muro	Frecuencia [Hz]
Primer muro de referencia	
	15,27
Núcleo 2 cm	
I	14,48
II	14,86
III	14,56
X	14,60
+	14,76
Núcleo 4 cm	
I	13,18
II	14,54
III	13,94
X	13,92
+	14,01
Núcleo 6cm	
I	12,09
II	13,86
III	12,94
X	12,87
+	13,15

En la Tabla 6 se exponen los desplazamientos de los sistemas, sobre el eje X o en el plano del muro, para efectos de la comparación que se realizó con el primer muro de referencia y todas las configuraciones de los muros.

Tabla 6

Desplazamientos de los muros en el plano

Desplazamiento	
Primer muro de referencia	
	8,7809
Núcleo 2 cm	
I	9,20
II	8,99
III	9,06
X	9,08
+	9,09
Núcleo 4 cm	
I	10,62
II	9,32
III	9,73
X	9,95
+	10,27
Núcleo 6cm	
I	12,75
II	10,24
III	11,28
X	11,74
+	11,60

En la Tabla 7 se exponen los valores hallados de los coeficientes de amortiguación y la comparación con el primer muro de referencia. En donde se asumió que la estructura de referencia (Figura 9) indica los cambios que se presentan con el sistema de mampostería propuesto en este trabajo.

Tabla 7
Coefficientes de amortiguación y comparación con el primer muro de referencia

	Coefficientes de amortiguación (%)	Variación coeficientes de amortiguación
Primer muro de referencia		
	5,19	
Núcleo 2 cm		
I	5,65	8,74%
II	5,37	3,47%
III	5,57	7,31%
X	5,52	6,36%
+	5,40	3,98%
Núcleo 4 cm		
I	5,79	11,43%
II	5,43	4,53%
III	5,65	8,89%
X	5,55	6,95%
+	5,31	2,29%
Núcleo 6cm		
I	5,69	9,52%
II	5,42	4,33%
III	5,62	8,29%
X	5,49	5,81%
+	5,35	3,12%

En la Tabla 8 se exponen los coeficientes de amortiguación y su comparación frente al segundo muro de referencia (Figura 10).

Tabla 8

Coeficientes de amortiguación y comparación con el segundo muro de referencia (ladrillos toletes)

	Coeficientes de amortiguación (%)	Variación coeficientes de amortiguación
Primer muro de referencia		
	5,41	
Núcleo 2 cm		
I	5,65	4,28%
II	5,37	0,77%
III	5,57	2,91%
X	5,52	2,00%
+	5,40	0,28%
Núcleo 4 cm		
I	5,79	6,87%
II	5,43	0,25%
III	5,65	4,43%
X	5,55	2,57%
+	5,31	1,90%
Núcleo 6cm		
I	5,69	5,03%
II	5,42	0,05%
III	5,62	3,85%
X	5,49	1,48%
+	5,35	1,10%

También se compararon las FRF del muro de referencia y el muro I con un núcleo de 4cm sobre las frecuencias de interés (Figura 13).

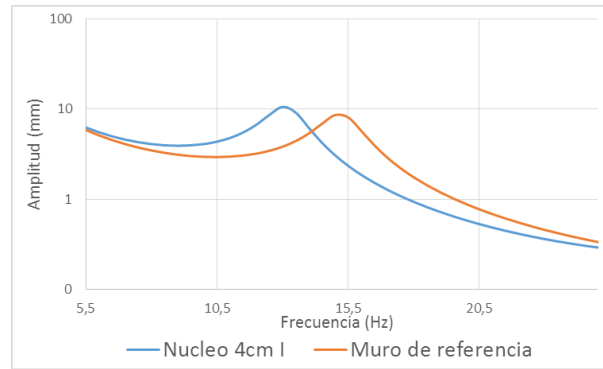


Figura 13. Comparación FRF frecuencias de interés.

Para el estudio de las bandas de parada se graficaron todas las FRF de los sistemas y se compararon sus resultados (Figura 14).

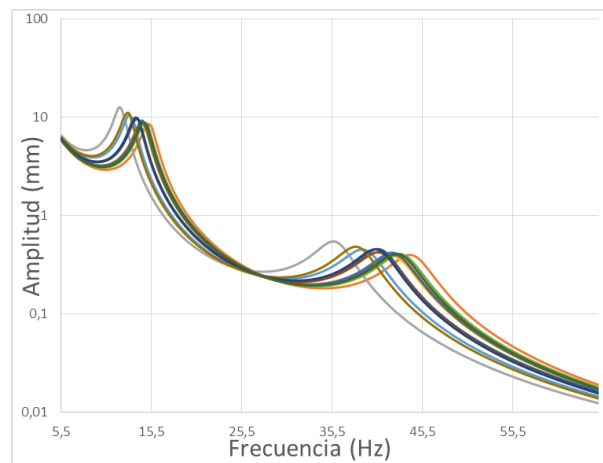


Figura 14. Comparación FRF.

Se profundizó en el caso del estudio de la respuesta de los muros en las frecuencias de interés, para lo cual se realizó una comparación gráfica más detallada de todos los sistemas (Figura 15).

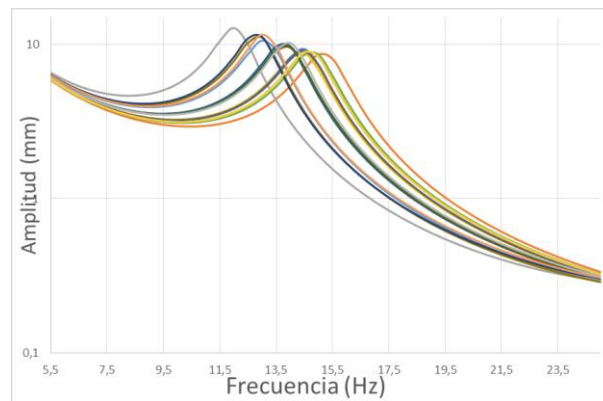


Figura 15. FRF de todas las configuraciones en las frecuencias de interés respectivas.

Para la profundización en la metodología utilizada, se planteó a continuación un ejemplo que pueda servir como guía. La configuración con la cual se trabajó es la del muro de referencia y el muro I (célula base con las inclusiones en todos los ladrillos) con un espesor del núcleo de 6 cm y módulo de elasticidad del recubrimiento de 10 MPa (Figura 16).

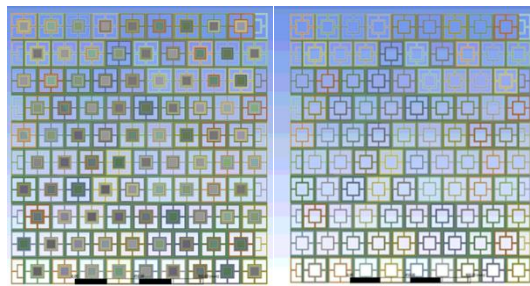


Figura 16. Muro configuración I núcleo de 6cm y primer muro de referencia.

Inicialmente se realizó el análisis modal, para conocer las frecuencias y los modos de vibración del sistema. Para esto se hallaron los primeros doce modos, presentados en la (Tabla 9 y Tabla 10), y como el interés es únicamente de la respuesta en el plano del muro, la frecuencia natural correspondiente es de 15.27 Hz y 12.09 Hz respectivamente, las cuales fueron del 3er modo de vibración de flexión en el plano.

Tabla 9.

Frecuencias naturales y modos de vibración del primer muro de referencia.

Modo	Frecuencia [Hz]	Modo de vibración
1	2,19	Flexión fuera del plano
2	3,65	Torsional
3	12,94	Flexión en el plano
4	13,57	Torsional
5	15,33	Torsional
6	23,54	Torsional
7	30,81	Torsional
8	36,87	Flexión fuera del plano
9	37,80	Torsional
10	38,48	Flexión en el plano
11	48,32	Torsional
12	56,68	Compresión

Tabla 10.

Frecuencias naturales y modos de vibración del muro I con núcleo de 6cm.

Modo	Frecuencia [Hz]	Modo de vibración
1	2,05	Flexión fuera del plano
2	3,40	Torsional
3	12,09	Flexión en el plano
4	12,69	Torsional
5	14,36	Torsional
6	21,94	Torsional
7	28,84	Torsional
8	34,59	Flexión fuera del plano
9	35,47	Torsional
10	35,98	Flexión en el plano
11	45,52	Torsional
12	52,88	Compresión

Se realizó el análisis armónico y se aplicó una fuerza armónica $p(t) = 5854,71[mm/s^2] \text{Sen}(\omega t)$ donde las frecuencias de excitación ω variaron entre 0-65 [Hz], y la finalidad de este fue el de hallar la función de respuesta en frecuencia, con la cual se pudo validar las frecuencias naturales del análisis modal.

Con la función de respuesta en frecuencia (Figura 17), se logró observar las frecuencias de resonancia del sistema y se graficó también el comportamiento de la fase en el rango de frecuencias definido (Figura 18).



Figura 17. Función de respuesta en frecuencia muro I con núcleo de 6cm.

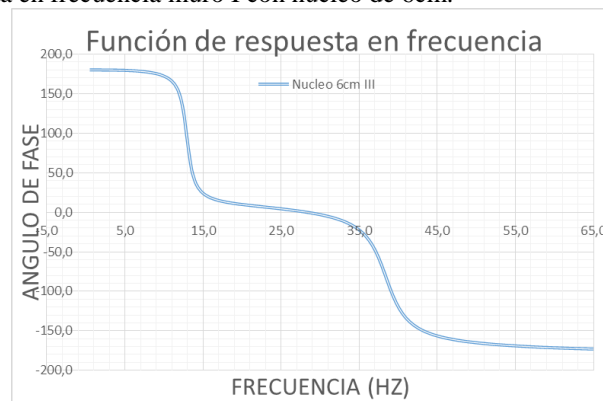


Figura 18. Ángulo de fase muro I con núcleo de 6cm.

Con el método de la potencia media del ancho de banda para el muro I con núcleo de 6cm, se determinó el coeficiente de amortiguación del muro de la frecuencia natural de 12.09 Hz, que se basó en la respuesta en amplitud (desplazamientos, mm) del sistema.

$$\xi = \frac{\Delta\omega}{2\omega_n}, \quad (1)$$

$$\omega_n = 12.09 \text{ [Hz]}$$

$$A_{max} = 9,016$$

$$\frac{A_{max}}{\sqrt{2}} = 9,016 * 0,707$$

$$\frac{A_{max}}{\sqrt{2}} = 6,37$$

$$\omega_a = 11,24$$

$$\omega_b = 12,62$$

$$\Delta\omega = 1,38$$

$$\xi = \frac{1,38}{2 * 12,09}$$

$$\xi = 0,057$$

Para el muro de referencia el coeficiente de amortiguación fue de:

$$\xi = 0,0541$$

5. Discusión

Los sistemas propuestos sobre el eje de interés, eje X que coincide con el plano del muro, si producen un cambio favorable sobre la respuesta del sistema en comparación con el muro de referencia, donde las configuraciones con mayor presencia de inclusiones son las que generan un mayor incremento y se puede observar que el ancho de la inclusión tiene gran importancia en la mejora que se produce.

Se puede observar que las frecuencias naturales de los sistemas se mantienen todas en un rango estrecho para las formas modales de flexión en el plano según lo expuesto en la Tabla 5. De lo cual se encuentra que el comportamiento de los sistemas no varía mucho y sus modos de vibración son similares en su comportamiento (flexión, torsión) a los del 1er muro de referencia.

En la Tabla 6 se evidencia que los sistemas con un mayor número de inclusiones, y los que llevan la inclusión con un núcleo másico más ancho, son las que mayores desplazamientos presentan en comparación con el resto de los núcleos. La amplificación de desplazamientos en el sistema puede deberse a que la respuesta de las inclusiones está en fase con la del muro.

La Tabla 7 y la Tabla 8 permiten profundizar en la comparación y muestran un resultado más claro de la mejoría en los coeficientes de amortiguación del sistema, en donde los mayores incrementos están por el orden del 8%, 9% y 11% respecto al primer muro de referencia, y se logra observar que ante las configuraciones que se componen con un mayor número de inclusiones (núcleos másicos) son las que presentan una mejor respuesta, donde la configuración I es la que más incremento presenta en todos los diferentes espesores.

Se evidencia que no hay una atenuación significativa de los sistemas en todo el rango de frecuencias estudiado (Figura 14). Para todas las inclusiones se presenta un comportamiento similar sin importar si se aumenta el ancho o no, por lo cual no se da la aparición de las bandas de parada. Y sobre las frecuencias de interés se mantiene este comportamiento (Figura 15) puesto que su variación se da en un ancho de banda relativamente pequeño (4Hz). Finalmente en el ejemplo de estudio se confirmó que en la frecuencia natural se da la respuesta máxima del sistema cuando el ángulo de fase pasa por los 90 grados (Figura 17 y Figura 18)

La configuración I con la inclusión del núcleo másico de 4cm es la que mayor incremento presenta, esto puede deberse a que la inclusión logra absorber mejor la energía que entra al sistema y el correspondiente espesor del recubrimiento (2cm) es el más adecuado para lograr transmitir la energía al núcleo másico para disipar esta.

Cabe resaltar que no se realiza la comparación de frecuencias naturales para el muro de ladrillos toletes dado que la frecuencia de interés de este se halla en valores muy lejanos (cerca de los 46 Hz) a los estudiados en los muros con las inclusiones y el muro de referencia. Por otro lado, se realizó una comparación entre los coeficientes de amortiguación de este y los muros con las inclusiones para el modo de vibración de flexión en el plano.

Para futuros proyectos y ante las características que se presentan en los metamateriales se busca encaminar este proyecto a la integración progresiva de la temática a los sistemas de control sísmicos, se plantea la propuesta de muro de ladrillos adaptados como elementos disipadores de energía, los cuales podrían ejercer la función de elementos arquitectónicos empleados en las edificaciones y manteniendo en un nivel muy bajo el nivel de intervención en la estructura, como

resultado se aprovecharía mejor el espacio útil, y de la misma forma se da una respuesta funcional ante la estética y utilidad de la edificación. Estos futuros estudios se podrían concentrar en realizar una validación experimental de los modelos desarrollados, la interacción del muro y la estructura, el diseño de los muro para frecuencias deseadas o que la respuesta de las inclusiones esté fuera de fase con la del sistema.

6. Conclusiones

Aplicando el concepto de metamateriales resonantes, se propuso y se estudió un nuevo tipo de muro. Se plantearon 3 diferentes espesores del núcleo másico y su recubrimiento, estos materiales son de fácil acceso y relativamente económicos, por otra parte se definió una geometría base de un ladrillo comercialmente disponible y se construyeron los muros con diferentes configuraciones a partir de una célula base compuesta por tres ladrillos con sus respectivas inclusiones, cuando se variaba la presencia o ausencia de esta inclusión en alguna posición de la célula base, se generaba una configuración distinta.

Mediante un estudio numérico se realizó una completa caracterización dinámica de los muros construyendo los modelos propuestos con los resonadores incluidos mediante el software comercial Autodesk Inventor® se construyó la geometría y los análisis se realizaron por medio de ANSYS [36].

De estos análisis se puede evidenciar que, se presentan mayores desplazamientos en los sistemas con las inclusiones más ancha, esto en comparación del muro de referencia, y las frecuencias naturales de los sistemas se mantenían relativamente cerca respecto al muro de referencia establecido y para el modo de vibración de interés, de flexión en el plano.

Los coeficientes de amortiguación de los sistemas se vieron influenciados por tener una mayor cantidad de inclusiones que por el espesor del núcleo y el recubrimiento, aunque la variación de los coeficientes de amortiguación no es muy alta, si se produjo un incremento considerable en

estos coeficientes. También, se analizó la posible aparición de las bandas de parada, las cuales podrían prevenir la propagación de las vibraciones y mejorar la capacidad disipativa de la estructura propuesta, pero no se observó la ocurrencia de estas por medio de las FRF, ya que en la comparación gráfica realizada a partir de estas, la curva de la respuesta en desplazamientos se comportó para todos los sistemas muy similar y no hay cambios positivos o negativos significativos.

La alternativa propuesta en este estudio se presenta como una posible solución funcional ante la necesidad de aumentar la protección de las estructuras civiles. También presenta una solución arquitectónica al integrar estos sistemas a la estructura para aprovechar mejor el espacio útil y emplearlos estéticamente, manteniendo la intervención en la estructura. Para las zonas de alta sismicidad como la nuestra podía generar impactos positivos sobre la región, la cual está inmersa en la construcción de edificaciones de gran altura, ya que se deja abierta la posibilidad a continuar con estudios sobre el tema.

Referencias Bibliográficas

- Alocer. (1996). *Calculated response of confined masonry structures (Flores and Alcocer, 1996).pdf*.
- Bacquet, C. L., & Hussein, M. I. (2018). *Dissipation engineering in metamaterials by localized structural dynamics*. 12 sep. 2018, 1–22. <http://arxiv.org/abs/1809.04509>
- Barchiesi, E., Spagnuolo, M., & Placidi, L. (2019). Mechanical metamaterials: a state of the art. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 24(1), 212–234. <https://doi.org/10.1177/1081286517735695>
- Brûlé, S., Enoch, S., & Guenneau, S. (2019). Role of nanophotonics in the birth of seismic megastructures. *Nanophotonics*, 8(10), 1591–1605. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0106>
- Brûlé, S., Enoch, S., & Guenneau, S. (2020). Emergence of seismic metamaterials: Current state and future perspectives. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, 384(1), 126034. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2019.126034>
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras cuarta edición* (4th ed.). Pearson education.
- Claisse, P. A. (2016). Steel 30. *Civil Engineering Materials*, 321–337. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100275-9/00030-9>
- Deymier, P. A. (2013). *Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31232-8_5
- Du, Q., Zeng, Y., Huang, G., & Yang, H. (2017). Elastic metamaterial-based seismic shield for both Lamb and surface waves. *AIP Advances*, 7(7). <https://doi.org/10.1063/1.4996716>
- Fomenko, S. I., Golub, M. V., Zhang, C., Bui, T. Q., & Wang, Y. S. (2014). In-plane elastic wave

propagation and band-gaps in layered functionally graded phononic crystals. *International Journal of Solids and Structures*, 51(13), 2491–2503.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.03.017>

Goffaux, C., & Sánchez-Dehesa, J. (2003). Two-dimensional phononic crystals studied using a variational method: Application to lattices of locally resonant materials. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 67(14), 1–10.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.144301>

Gulyaev, Y. V., Lagar'kov, A. N., & Nikitov, S. A. (2008). Metamaterials: Basic research and potential applications. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 78(3), 268–278.
<https://doi.org/10.1134/s1019331608030143>

Hirse Korn, M. (2004). Small-size sonic crystals with strong attenuation bands in the audible frequency range. *Applied Physics Letters*, 84(17), 3364–3366.
<https://doi.org/10.1063/1.1723688>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. (2009). NTC 4205 Unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillos y bloques cerámicos. *Norma Técnica Colombiana 4205*, (571), 11.
<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3353/pdfview/viewer.aspx?locale=es-ES&Q=BE4EFF948703B0FB35CDBD6FF8F576https://tienda.icontec.org/gp-unidades-de-mamposteria-de-arcilla-cocida-ladrillos-y-bloques-ceramicos-parte-2-mamposteria-no-estructural-ntc4205-2-2>

Jazar, R. N. (2013). Advanced vibrations: A modern approach. In *Advanced Vibrations: A Modern Approach* (Vol. 9781461441). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4160-1>

- Kettenbeil, C., & Ravichandran, G. (2018). Experimental investigation of the dynamic behavior of metaconcrete. *International Journal of Impact Engineering*, *111*(October 2016), 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.09.017>
- Khan, M. H., Li, B., & Tan, K. T. (2018). Impact load wave transmission in elastic metamaterials. *International Journal of Impact Engineering*, *118*(September 2017), 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.04.004>
- Krödel, S., Thomé, N., & Daraio, C. (2015). Wide band-gap seismic metastructures. *Extreme Mechanics Letters*, *4*, 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2015.05.004>
- Llinares, J., & Holgado, M. (1999). Rayleigh-wave attenuation by a semi-infinite two-dimensional elastic-band-gap crystal. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, *59*(19), 12169–12172. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.12169>
- Lourenço, P. B. (1996). Computational strategies for masonry structures. In *PhD Thesis* (Vol. 70, Issue 08). [https://doi.org/ISBN 90-407-1221-2](https://doi.org/ISBN%2090-407-1221-2)
- Magenes, G., & Calvi, G. M. (1997). In-plane seismic response of brick masonry walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, *26*(11), 1091–1112. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199711\)26:11<1091::AID-EQE693>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199711)26:11<1091::AID-EQE693>3.0.CO;2-6)
- Marco, M., Anastasiia, K., Federico, B., & Nicola, M. P. (2016). Large scale mechanical metamaterials as seismic shields. *New Journal of Physics*, *18*(8), 83041. <http://stacks.iop.org/1367-2630/18/i=8/a=083041>
- Mitchell, S. J., Pandolfi, A., & Ortiz, M. (2014). Metaconcrete: Designed aggregates to enhance dynamic performance. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, *65*(1), 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2014.01.003>

- Mitchell, S. J., Pandolfi, A., & Ortiz, M. (2015). Investigation of elastic wave transmission in a metaconcrete slab. *Mechanics of Materials*, 91(P1), 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.08.004>
- Mitchell, S. J., Pandolfi, A., & Ortiz, M. (2016). Effect of Brittle Fracture in a Metaconcrete Slab under Shock Loading. *Journal of Engineering Mechanics*, 142(4), 04016010. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0001034](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001034)
- Nsr-10. (2010). NSR-10 Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. *Nsr-10, Título A*, 186.
- Olmos, B. A., & Roesset, J. M. (2009). Analytical evaluation of the accuracy of the half-power bandwidth method to estimate damping ratios in a structure. *Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure - Proceedings of the 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII 2009, July, 2–9*.
- Osma, B. D., & Hernández, G. A. (2014). *Evaluacion del modulo de elasticidad de la mamposteria utilizada en bucaramanga mediante ensayos de muretes*. Universidad Industrial de Santander.
- P, N. S. (2013). Properties of Brick Masonry for FE modeling. *American Journal of Engineering Research*, 1, 2320–2847. www.ajer.org
- Papagiannopoulos, G. A., & Hatzigeorgiou, G. D. (2011). On the use of the half-power bandwidth method to estimate damping in building structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), 1075–1079. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.02.007>
- Rodríguez, A. (2019). *EFFECTO DE AMORTIGUADORES VISCOSOS NO LINEALES SOBRE EDIFICACIONES RESIDENCIALES CON IRREGULARIDAD EN PLANTA Y/O ALTURA* (Vol. 23, Issue 3) [Universidad Industrial de Santander].

<https://doi.org/10.5281/zenodo.1477753>

Sheng, P., Zhang, X. X., Liu, Z., & Chan, C. T. (2003). Locally resonant sonic materials. *Physica B: Condensed Matter*, 338(1–4), 201–205. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(03\)00487-3](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(03)00487-3)

Sigalas, M. M., & Economou, E. N. (1995). Comment on acoustic band structure of periodic elastic composites. *Physical Review Letters*, 75(19), 3580. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.3580>

Silberschmidt, V. V., & Matveenko, V. P. (2015). Mechanics of Advanced Materials Analysis of Properties and Performance Preface. In *Mechanics of Advanced Materials: Analysis of Properties and Performance*.

Tong, X. C. (2018). Nonlinear metamaterials and metadevices. *Springer Series in Materials Science*, 262, 173–200. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66044-8_9

Tremblay, E. J. (2019). *Metamaterials: Classes, properties and applications* (pp. 1–19). Nova Science Publishers, Inc.

Wang, G., Wen, X., Wen, J., & Liu, Y. (2006). Quasi-one-dimensional periodic structure with locally resonant band gap. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 73(1), 167–170. <https://doi.org/10.1115/1.2061947>

Zhou, Y., Shi, F., Ozbulut, O. E., Xu, H., & Zi, D. (2018). Experimental characterization and analytical modeling of a large-capacity high-damping rubber damper. In *Structural Control and Health Monitoring* (Vol. 25, Issue 6). <https://doi.org/10.1002/stc.2183>

Zhu, R., Liu, X. N., Hu, G. K., Sun, C. T., & Huang, G. L. (2014). A chiral elastic metamaterial beam for broadband vibration suppression. *Journal of Sound and Vibration*, 333(10), 2759–2773. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.01.009>