

Artículo de Investigación

Comparación de resistencias a la compresión entre mampostería colonial mixta presente en edificaciones y fortificaciones de Cartagena, Colombia y muretes fabricados bajo criterios de construcción semejantes

Comparison of resistance to compression between mixed colonial masonry present in buildings and fortifications of Cartagena, Colombia, and experimental walls manufactured under similar construction criteria

Camargo Bocanegra A (1)*

(1) Universidad del Sinú Seccional Cartagena, Colombia

Artículo de investigación

Fecha de recepción: 26 de mayo

Fecha de aceptación: 11 de junio.

Para citar este artículo:

Camargo Bocanegra 2023 Comparación de resistencias a la compresión entre mampostería colonial mixta presente en edificaciones y fortificaciones de Cartagena, Colombia y muretes fabricados bajo criterios de construcción semejantes Revista Investigación & Sociedad Volumen 2 (1) 21-34.

*Autor de correspondencia: Andrés Camargo Bocanegra. Universidad del Sinú Seccional Cartagena. +573143370448 direccioncivil@unisinucartagena.edu.co



Resumen

Introducción: La construcción de las fortificaciones que defendieron a Cartagena de Indias durante largos periodos de su historia, tuvo éxito gracias a la selección de materiales con los que se ejecutaron, actividad en la cual siempre primó la calidad de estos, por encima de la dificultad de su obtención. **Métodos:** estudio que comparó las resistencias a la compresión que presentan hoy en día la mampostería colonial mixta que se conserva en algunos tramos de la contraescarpa de las murallas y edificaciones del centro histórico de la ciudad, con las generadas por muretes de mampostería contruidos a manera de réplica, bajo técnicas de construcción y materiales semejantes. El proyecto se desarrolló bajo una investigación de tipo mixto, con su respectiva exploración bibliográfica, al igual que las pruebas in situ y de laboratorio. **Resultados:** La resistencia arrojada por los materiales usados en la contraescarpa de las murallas presenta el valor más bajo, muy similar al grupo de muretes extraídos; siendo superados por el grupo de muretes contruidos con materiales nuevos y los que presentaron la mayor resistencia de todos, los contruidos con materiales antiguos rescatados. Como producto final, se determinó una resistencia a la compresión promedio para este tipo de mampostería colonial mixta igual a 0,79 MPa y un módulo de elasticidad correlacionado 790 MPa; el cual fue comparado con una mampostería similar expuesta dentro del código italiano **Conclusión:** Este estudio amplía la escasa bibliografía existente, sirviendo además como apoyo para modelaciones numéricas u otro tipo de investigación destinada a elementos con este tipo de mampostería antigua.

Palabras Claves: Contraescarpa, Muretes, Mampostería, Resistencia a la compresión, Ultrasonido.

Abstract

Introduction: The construction of the fortifications that defended Cartagena de Indias during long periods of its history, had its great success that was based on the selection of materials, an activity in which the quality of these always took precedence over the difficulty of obtaining them. **Methods:** a study that compared the compressive strength of today's mixed colonial masonry that is preserved in some sections of the counter-scarp of the walls and buildings in the historic centre of the city, with that generated by masonry walls built as a replica, using similar construction techniques and materials. The project was developed under a mixed type of research, with its respective bibliographic exploration, as well as in situ and laboratory tests. **Results:** The resistance shown by the counter-scarp of the walls presents the lowest value, very similar to the group of extracted walls; being



surpassed by the group of walls built with new materials and the ones that presented the highest resistance of all, those built with old rescued materials. As a final product, an average compressive strength for this type of mixed colonial masonry was determined to be 0.79 MPa and a correlated modulus of elasticity 790 MPa, which was compared with a similar masonry exposed within the Italian code. **Conclusion:** This study extends the scarce existing bibliography, serving also as support for numerical modelling or other types of research aimed at elements with this type of old masonry.

Keywords: *Counterscarp, Experimental walls, Masonry, Compression resistance, Ultrasound.*

Introducción

Ubicada al norte de Colombia, la ciudad de Cartagena de Indias resguarda en su amurallado centro histórico un legado de fortificaciones concebidas con base a la mejor ingeniería militar europea de la época, siendo estas obras uno de los únicos testigos vivientes del proceso completo de conquista y colonización española que duró poco más de tres siglos. Razón por la que permanece inscrito en la lista de patrimonio mundial de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura – UNESCO (1), como reconocimiento a su gran importancia histórica y cultural. Como factura de las secuelas del tiempo, en la actualidad se hace evidente el deterioro creciente por el cual atraviesan monumentos como las murallas y edificaciones del centro histórico de la ciudad, justificación por la cual el ejercicio de la conservación en estos no debe descansar. Ante estas actividades de restauración no se tiene la certeza de que los procedimientos se estén aplicados de manera correcta, por lo tanto, no se garantiza la continuidad de las propiedades físicas y mecánicas de alta calidad con que fueron diseñadas y elaboradas estas estructuras antiguas; alterando así la funcionalidad armónica, compatibilidad y distribución de esfuerzos a los que están sometidos hoy en día. En la actualidad los “daños por efecto de cascoteo” en la contraescarpa de las murallas, tienen su origen en el proceso de intervención, donde se rellenan con argamasa y retales de material mixto (sin tener en cuenta ningún tipo de proporciones) los espacios creados por las caries o pérdida total de la estructura pétreo, creando una falsa apariencia de textura llamada cascoteo, que no soporta ningún trabajo mecánico a los que están siendo sometidas estas estructuras antiguas (2).



ensayos NDT dada la imposibilidad de la extracción de muestras en este elemento (3). También se halló la resistencia a la compresión en muretes de MCM elaborados a manera de réplica siguiendo los patrones de construcción observados en muros originales, mediante ensayos destructivos y no destructivos. Después de obtener los resultados, se pudo evaluar si los materiales utilizados actualmente en las intervenciones realizadas al patrimonio generan una resistencia a la compresión similar respecto a las empleadas en el periodo colonial.

Métodos

Tipo de estudio

Estudio comparativo entre las resistencias a la compresión de la mampostería colonial mixta, presente en las edificaciones y fortificaciones de la ciudad, por medio de una investigación cualitativa y cuantitativa de sus características físicas y mecánicas, a través de ensayos destructivos y no destructivos.

Recolección de información

Se realizó una revisión bibliográfica de las investigaciones y estudios efectuados sobre los aspectos constructivos antiguos (sistemas de construcción, características y origen de materiales) aplicados en las edificaciones coloniales y fortificaciones del centro histórico de Cartagena. Esta revisión se complementó con consultas a profesionales e investigadores del tema. Se llevó a cabo además un recorrido por el centro histórico con el propósito de ubicar los lugares donde se presenta el tipo de mampostería de interés, con el fin de establecer el número de puntos adecuados o sitios estratégicos sobre la contraescarpa de las murallas para la aplicación de las pruebas no destructivas.

Extracción de muretes originales

Para la obtención de los muretes en la edificación colonial ubicada en el centro histórico de la ciudad, primero se realizó la identificación del tipo de mampostería presente en la casa para constatar que se tratara del mismo material estudiado. Para llevar a cabo la extracción de una fracción de este material se hizo necesario la sustracción de grandes bloques, para así poder garantizar por exceso los volúmenes deseados de cada muestra. (Ver Ilustración 2).



Ilustración 2. Mampostería colonial mixta a estudiar.



Fuente: Fotografía del autor

Elaboración de muretes de mampostería colonial mixta

1:2:4, de argamasa, piedra coralina o pómez, y pedazos de ladrillo respectivamente (4). Los materiales se escogieron con base a las consultas previas de documentos investigativos y entrevistas a restauradores profesionales, con el fin de obtener los que presentan las mejores propiedades en la actualidad a la hora de efectuar intervenciones en el patrimonio. Para preparar la argamasa en proporciones 1:2 de cal y arena respectivamente, se escogió la cal hidratada NARÉ, debido a que esta presentó los mejores resultados de resistencia a la compresión en el trabajo de grado titulado “Estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados en la restauración de edificaciones de tipología colonial y republicano en la ciudad de Cartagena” (5). Para la preparación del material se fragmentaron los ladrillos, roca caliza y pómez a un tamaño que facilitara la manejabilidad. Se construyeron formaletas de madera en forma de cajón de 0.20 m de ancho, 0.30 m de largo y 0.30 m de ancho, para garantizar la geometría rectangular requerida en los muretes para su posterior ensayo a compresión. Posteriormente, se mezclaron los agregados gruesos con la argamasa previamente preparada bajo las proporciones referidas con anterioridad. Se vertió esta mezcla en las formaletas con el fin de obtener 3 muretes fabricados con materiales de canteras actuales. El mismo procedimiento se realizó en la elaboración de tres muretes con fracciones de ladrillos, roca pómez y calizas antiguas rescatadas del material antiguo en el momento de la extracción de las muestras en la edificación colonial.



Ensayo no destructivo en muretes

Antes de ser destruidos, los 9 muretes fueron sometidos a pruebas de ultrasonido, 61 días después de haber sido elaborados, garantizado un correcto tiempo de fraguado, con el fin de determinar el tiempo que se demoraba una onda en atravesar este material, y por consiguiente conocer su velocidad para posteriormente correlacionarla con los resultados de los ensayos destructivos. Los muretes fueron clasificados y etiquetados como se puede apreciar en la Tabla 1. Para este procedimiento se utilizó el equipo de marca PROCEQ y modelo PUNDIT PL-200.

Tabla 1. Clasificación de muretes

Grupo	Muestra	Descripción
1	1	Muretes fabricados con materiales de canteras actuales.
	2	
	3	
2	1	Muretes fabricados con materiales antiguos rescatados.
	2	
	3	
3	1	Muretes originales extraídos de la casa colonial.
	2	
	3	

Ensayo destructivo en muretes

Los muretes fueron medidos previamente y ensayados a la compresión, siguiendo las recomendaciones descritas en el título D de la NSR-10 (6).

Ensayo no destructivo en murallas

Por último, se utilizaron las velocidades de onda obtenidas en la prueba de ultrasonido en los muretes y las resistencias resultantes de los ensayos destructivos para obtener una correlación para este tipo de material y así conocer la resistencia a la compresión en sitios donde es prohibido por la ley la extracción de muestras, en los cuales solamente se efectuaron múltiples lecturas (Ilustración 3).

Técnicas de análisis de resultados

Todos los resultados obtenidos fueron organizados y posteriormente tabulados y graficados para facilitar su comprensión y entendimiento. Luego fueron comparadas las resistencias de los muretes extraídos con los fabricados con materiales actuales, del mismo modo con los hechos de materiales antiguos y con las resistencias obtenidas por medio de las correlaciones de velocidades de ondas en la contraescarpa de las murallas. Se determinó un módulo de elasticidad característico



para este tipo de mampostería y posteriormente estas características mecánicas fueron comparadas con un tipo similar establecida en la norma italiana.

Ilustración 3. Ensayo de ultrasonido en la contraescarpa de las murallas



Fuente: Fotografía del autor

Resultados

Siguiendo la metodología descrita, se obtuvieron resultados a partir de los ensayos destructivos y no destructivos realizados sobre los muretes extraídos, los fabricados con materiales antiguos, actuales y la contraescarpa de la muralla. Estos resultados y su respectivo análisis se presentan a continuación.

Ensayos a los muretes

Se realizó el ensayo de ultrasonido antes de ejecutar los ensayos destructivos, tomando para cada muestra más de 5 lecturas de los valores de velocidad de onda, los cuales posteriormente fueron promediados para determinar un valor característico por grupo. Después de haber realizado este procedimiento, se ejecutaron las 9 pruebas destructivas programadas, y se determinó la resistencia a la comprensión de cada uno de los muretes.



Tabla 2 Resultados pruebas a la compresión desarrollada

Grupo	Área	Carga	R. Exp	R. Corr.	Observación	
	Cm ²	Kgf	Mpa			
1	1	400	1884	0,47	0,41	Muretes fabricados con materiales obtenidos de canteras actuales.
	2	361	1664	0,46	0,40	
	3	272	1700	0,63	0,54	
	Promedio		0,52	0,45		
2	4	342	3328	0,97	0,83	Muretes fabricados con materiales antiguos rescatados.
	5	342	4637	1,35	1,16	
	6	324	4857	1,49	1,28	
	Promedio		1,27	1,09		
3	7	306	1346	0,44	0,38	Muretes originales extraídos de la casa colonial.
	8	306	3108	1,01	0,87	
	9	324	17804	5,49		
	Promedio		0,73	0,62		

Fuente: Elaborado por el autor

La muestra 3 perteneciente al grupo 3, arrojó un valor de resistencia bastante elevado, debido a que estaba compuesta casi en su totalidad por una roca tipo pómez, razón por la cual se tomó la decisión de no incluirla en los resultados finales ya que su composición y relación volumétrica no obedecía a la establecida para la mampostería colonial mixta en evaluación. El resto de los valores obtenidos, fueron afectados por un factor de esbeltez de 0,86 que obedece a lo establecido por la NSR-10. Posteriormente fue obtenido un valor medio para cada grupo, el cual sirvió para determinar el valor real de resistencia a la compresión por ensayos destructivos (Tabla 2). Los valores de resistencia no afectados por este factor de corrección fueron utilizados juntos con las velocidades promedio halladas por el método de ultrasonido para realizar la calibración de este material. Verificando antes que las velocidades de ondas P arrojadas, estuvieran dentro del rango establecido para mamposterías antiguas; entre 350 y 2500 m/s (3). El mayor valor de velocidad de onda fue obtenido en el grupo 2 y este estuvo en el orden de los 1010 m/s. Estos valores fueron tabulados (Tabla 3) y posteriormente graficados (Gráfica 1 Curva para calibración del material) para determinar la línea de tendencia que correlacionaría la velocidad de onda con la resistencia a la compresión.

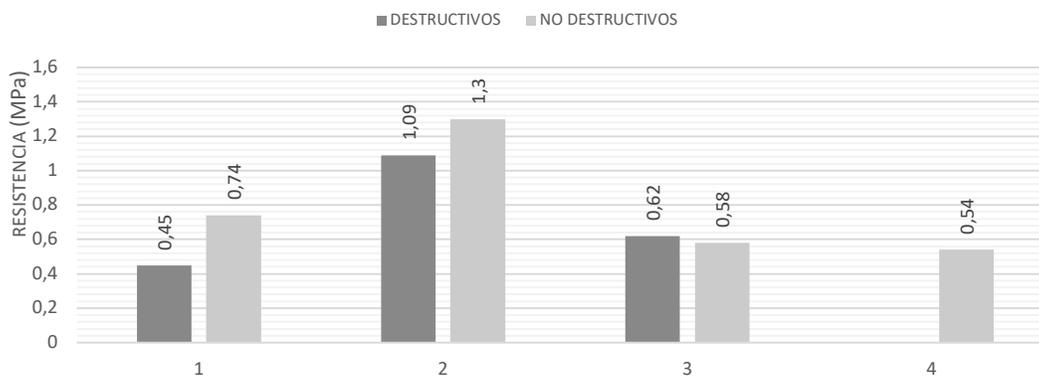


determinada en la calibración del material, arrojando un valor de 564 m/s, con el cual se determinó que la resistencia a la compresión aproximada es de 0,54 MPa.

Comparación de resultados

Ya teniendo los valores de resistencia a la compresión de los grupos de muretes por medio de ensayos destructivos y no destructivos, al igual que la resistencia a la compresión de los muros pertenecientes a la contraescarpa de la muralla por ensayos no destructivos, se proceden a ser comparados y verificar cuál de estos 4 grupos presenta la mayor capacidad portante. (Gráfica 2).

Gráfica 2. Resultados resistencias a la compresión



Fuente: Elaborado por el autor

Se puede apreciar en primera instancia que las resistencias no difieren en gran medida, y el pequeño porcentaje que hace que las resistencias por pruebas destructivas sean menores, es el factor de esbeltez que ha de ser aplicado por norma. Sin embargo, es importante afirmar que en términos generales se obtuvieron valores de resistencias a la compresión muy bajas, y esto se atribuye a que la argamasa fue el componente que determinó todas las fallas, perdiendo su forma y por ende generando una carencia de cohesión que provocaba el desprendimiento de todos los agregados. Por otra parte, comparando directamente los resultados por el método no destructivo, se identifica que los muretes fabricados con materiales antiguos presentan la mayor resistencia, llegando casi a ser el doble, del valor de su antecesor, que son los muretes fabricados con materiales nuevos. Esto permitiría inferir que; los materiales antiguos han de ser de mejor calidad, evidenciándose en el aporte a la resistencia global del elemento, existiendo una relación directa entre la calidad de los agregados y la resistencia a la compresión de este tipo de material. Con respecto a los muretes extraídos pertenecientes al Grupo 3, se determina que su resistencia es muy similar a la de los muros de mampostería colonial mixta



hallados en la contraescarpa de la muralla; 0,58 y 0,54 MPa respectivamente, lo cual permite afirmar su similitud en su composición y proceso constructivo. Estos valores relativamente bajos de los dos últimos grupos de muretes se relacionan con la disgregación ya mencionada de la argamasa, que es la encargada de mantener la cohesión entre todas sus partes, ya que al ser muestras extraídas de un elemento que se encontraba directamente expuesto a la intemperie, y al ser lecturas de velocidades tomadas a puntos de contraescarpa que enfrentan procesos erosivos por factores ambientales, presentan casi que total ausencia de este material.

Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad

Con el fin de determinar unas propiedades mecánicas generalizadas para este tipo de material, se determina un promedio de las resistencias a la compresión por el método no destructivo de los tres grupos de muretes y la contraescarpa de la muralla, el cual arroja un valor de 0,79 MPa. Con este valor se procede a realizar una correlación para determinar el módulo de elasticidad por medio de la expresión $E = \alpha \cdot f_c$ donde α tiene un rango de variación de 200 a 1000 (7). Habiendo escogido en este caso el máximo, debido al bajo valor de la resistencia a la compresión e incertidumbre por la irregularidad del material ($E = 1000 \cdot f_c$). Se obtuvo entonces que $E = 790 \text{ MPa}$, el cual al ser comparado con una mampostería similar dentro del código italiano como lo es la “*Muratura in pietrame disordinata*” se encuentra dentro del rango, 690 y 1050 MPa (8). Cosa que no sucede con los valores de resistencia a la compresión ya que para este mismo tipo de mampostería se encuentran fuera del rango establecido que oscila entre 1,0 y 1,8 MPa, atribuyéndose esto a ya lo anteriormente dicho de la disminución de resistencias a razón de la mala calidad o carencia total de la argamasa de cal.

Discusión

Los hallazgos del presente estudio son los primeros encontrados en una Los hallazgos del presente estudio son los primeros encontrados en una investigación de este tipo que compara la resistencia a la compresión entre mampostería colonial mixta presente en edificaciones y fortificaciones de Cartagena, Colombia y muretes fabricados bajo criterios de construcción semejantes. La actual literatura ha desarrollado estudios que comparan otro tipo de materiales. Es por esto, que la realización de un estudio de este tipo toma importante relevancia en la literatura científica dado que al basarnos en el análisis de resultados obtenido después de desarrollado el estudio, se logra evidenciar que al comparar la resistencia a la compresión arrojada por los muretes realizados bajo técnicas de construcción semejantes y los encontrados en fortificaciones y edificaciones de la ciudad, se obtuvo que los muretes construidos arrojaron una resistencia superior a la



mampostería encontrada, atribuyendo esto a que a diferencia de los extraídos de la casa colonial y los ensayados en las fortificaciones, al realizar el proceso de construcción nuevamente se crea completamente una nueva argamasa, aportando a la cohesión de todos los elementos dentro del conjunto.

Así mismo, al comparar la resistencia a la compresión de la mampostería colonial mixta presente en la contraescarpa de las murallas de Cartagena de Indias, y los muretes extraídos de la casa colonial en el centro histórico, se obtuvo que no existe una diferencia notable ya que los valores obtenidos por medio de la correlación velocidad de onda - resistencia, fueron de $0,54 \text{ MPa}$ y $0,58 \text{ MPa}$, respectivamente. Esto permite inferir que en su proceso de construcción se emplearon tanto materiales como técnicas muy similares. Se identificaron los materiales que componen la mampostería colonial mixta, y se permitió emitir un concepto acerca de la relación que tiene la calidad individual de estos con su comportamiento en conjunto, al igual que la diferenciación de estos a través de su época de fabricación. Siendo los materiales antiguos los que aportaron mayor resistencia al momento de ser comparados con los que se emplean actualmente en las intervenciones al patrimonio. Afirmando además que el material que condicionó la falla de todos los muros fue la argamasa, por la mala calidad de esta o la presencia casi nula de la misma.

Se verificó la veracidad del método ultrasónico después de haber realizado la debida calibración para este tipo de material, ya que los resultados entre los ensayos destructivos y no destructivos no tuvieron una variación significativa. Sin embargo, la diferencia de estos, además de atribuirse a los factores de corrección aplicados por norma para las pruebas de compresión, se encuentran relacionados con la anisotropía del material, infiriéndose que, para elementos más grandes diferentes a muretes, la diferencia entre los métodos puede hacerse más notable.

Como resultado final se determinó una resistencia a la compresión promedio y un módulo de elasticidad correlacionado para este tipo de mampostería, el cual posteriormente fue comparado con una muratura similar expuesta en el código italiano, obteniendo que la resistencia a la compresión de $0,79 \text{ MPa}$ se encuentra fuera del rango y el módulo de elasticidad de 790 MPa si se encuentra dentro de los límites establecidos.

Conclusiones

El presente es el primer estudio desarrollado en Cartagena de Indias que realiza este tipo de comparación. Este se convierte en un importante documento de referencia para la comparación de estudios desarrollados por otros investigadores,



así como para la revisión de parámetros de comparación de los materiales analizados.

Fuente de financiación: Ninguna.

Conflicto de intereses: Ninguno por declarar

Referencias

1. Centre UWH. UNESCO World Heritage Centre. Centro del Patrimonio Mundial -. Disponible en: <https://whc.unesco.org/es/list/285>
2. Rocha J. Estudio de patologías y capacidad de cargas del cordón amurallado de Cartagena de Indias. Cartagena. 2003.
3. Ramos L LP. Inspection and Diagnosis: In situ NDT and MDT for masonry structures. Guimaraes, Portugal. 2017.
4. Herrera Díaz A (2009). Estudios y diseños técnicos para la restauración del lienzo de murallas entre el monumento de la India Catalina y el Museo de la Marina. Cartagena de Indias. Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE) y Ministerio de Cultura.
5. Aguirre Castellar LF, Arrieta Torres AA. Estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados en la restauración de edificaciones de tipología colonial y republicana en la ciudad de Cartagena. 2015; Disponible en: <https://hdl.handle.net/11227/1379>
6. Ministerio de Ambiente. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10. Bogotá: Asociación colombiana de Ingeniería Sísmica. 2010.
7. Tomazevic M. Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings | Series on Innovation in Structures and Construction (1999) Disponible en: <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/p055>. <https://doi.org/10.1142/p055>
8. NTC I. Norma técnica para las construcciones. 2008.

