



DOI: <http://dx.doi.org/10.21501/21454086.2736>



Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional

Lámpsakos | No. 20 | pp. 22-28 | julio-diciembre | 2018 | ISSN: 2145-4086 | Medellín-Colombia

# Estudio Del Comportamiento de Muestras de Mortero Natural Sometidas a Esfuerzo de Compresión

*Performance of Natural Mortar Samples Subject to Compression Strength Tests*

**Julián Alberto Patiño Murillo, MsC**

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA  
Grupo GIGAT  
Medellín, Colombia  
[japatino@sena.edu.co](mailto:japatino@sena.edu.co)

**Yessenia Carolina Gutiérrez Sandoval**

Universidad Francisco de Paula Santander  
Cúcuta, Colombia  
[ingyeca@outlook.com](mailto:ingyeca@outlook.com)

**Jorge Iván Leal Santafé**

Universidad Francisco de Paula Santander  
Cúcuta, Colombia  
[jorgelealsantafe@gmail.com](mailto:jorgelealsantafe@gmail.com)

**John Jairo Castro Maldonado, MsC**

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA  
Grupo GIGAT  
Medellín, Colombia  
[jcastrom@sena.edu.co](mailto:jcastrom@sena.edu.co)

**Oswaldo Hurtado Figueroa**

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA  
Cúcuta, Colombia  
[ohurtado8@misena.edu.co](mailto:ohurtado8@misena.edu.co)

(Recibido el 20-03-2018, Aprobado el 11-05-2018, Publicado el 03-07-2018)

Estilo de Citación de Artículo:

J. A. Patiño, Y.C. Gutiérrez, J.I. Leal, J.J. Castro, O. Hurtado, "Estudio del comportamiento de muestras de mortero natural sometidas a esfuerzo de compresión", Lámpsakos, no. 20, pp 22-28, 2018  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21501/21454086.2736>

**Resumen:** La combinación de diversos materiales, ya sea por decisión tecnológica o casualidad, permitió la construcción y conservación de edificaciones antiguas que aún siguen en pie. Buscando replicar las características de estas construcciones, materiales como cal, puzolana, y yeso fueron seleccionados para elaborar un mortero natural y comparar sus propiedades físicas y resistencia a la compresión con las de un mortero tipo portland, con el fin, de establecer una línea base de comportamiento para aplicación en obras civiles. Se empleó una metodología de post prueba únicamente con diseño factorial experimental y grupo intacto. En todas las muestras se presentó sedimentación producida por la diferencia de tamaño de partículas y el fenómeno de exudación, ocasionando bajas resistencias en el material.

**Palabras clave:** Mortero; Propiedades Físicas; Propiedades Mecánicas; Resistencia; Compresión.

**Abstract:** The combination of materials by technology or mere chance allowed the construction and conservation of old buildings that to this day are still standing. Looking for the reproduction of this characteristics, materials such as lime, pozzolan, and gypsum were selected for elaboration of a natural mortar for comparison of the physical properties and compressive strength versus the Portland mortar. These studies are required to establish a baseline for generating applications in different civil works. The experimental methodology included post-test only analysis with factorial design and intact group. In all the evaluated samples, sedimentation occurred due to the difference in particle size and the exudation phenomenon, causing low resistance values.

**Keywords:** Mortar; Physical Properties; Mechanical Properties; Resistance; Compression.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales preocupaciones de la humanidad en la actualidad radica en el desarrollo de aplicaciones industriales que sean amigables con el medioambiente [1], [2]. Dentro de esta problemática, la investigación en el desarrollo de nuevos materiales ocupa un lugar preponderante [3], [4], máxime cuando se trata del análisis y desarrollo de insumos y métodos de disposición para residuos de construcción [5], [6], o en el aprovechamiento de desechos que afectan el ambiente para potenciar las características de los materiales de construcción [7]. A pesar de los diferentes estudios en estas áreas, todavía quedan algunas cuestiones pendientes por conocer acerca de los materiales que se suelen denominar como “tradicionales”, y que han sido utilizados desde tiempos inmemorables en el desarrollo de construcciones. Uno de estos elementos son los diferentes compuestos o mezclas de materiales utilizados para la unión de ladrillos, bloques o piedras que se ensamblan en el levantamiento de obras civiles, y que se conocen comúnmente como “morteros” [8]. Existen varios tipos de morteros reconocidos; por ejemplo, el mortero tipo portland es la “mezcla de un material aglutinante, un material de relleno fino, agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto” [9]. Por otro lado, el mortero natural se define como una mezcla homogénea conformada por materiales alternativos, cementante (cal), agregado (material cerámico molido - puzolana), aditivo (yeso) y agua [10].

En este orden de ideas, puede decirse que, aunque el concreto natural utilizado para elaborar morteros naturales desde épocas de la antigua Roma renovó las técnicas de construcción en su momento [8]; en América Latina se han presentado, históricamente, variaciones y adaptaciones propias con aglomerantes tales como la cal y el yeso [11], motivadas en gran medida por la autoconstrucción en la vivienda popular [12], y con evidencias de estudios de durabilidad de morteros sostenibles en ambientes industriales [13]. En este contexto, es pertinente hoy día preguntarse si los materiales utilizados en su elaboración son adecuados para el desarrollo de un mortero natural cumpliendo con la normatividad colombiana, en cuanto a sus propiedades mecánicas, para entrar dentro de la clasificación de lo que se suele denominar como mortero. Las técnicas de construcción con materiales naturales, usadas en los grandes imperios y dejadas a un lado por las revoluciones industriales y la modernización, reaparecen en el siglo XXI como una incógnita de estudio y motivo de

renovado interés académico [12], [14], [15]. Además, se encuentran diferentes iniciativas en la exploración y enriquecimiento de los materiales utilizados para la construcción con diferentes elementos, tales como fibra de palma [10], parafina [14], o hasta los mismos residuos de construcción y demolición desde un enfoque más orientado a la conservación ambiental [5], [6].

El mortero natural es un material ampliamente estudiado pero que, de cierto modo, continúa siendo un enigma (debido al desconocimiento de su composición, formulación y resistencia); en investigaciones previas se formulan y muestran diferentes tipos de construcciones elaboradas a base de concreto tanto en Europa [15] como en América Latina [12]. En vista de lo anterior, surge un nuevo horizonte para la ingeniería civil en traslapar el conocimiento actual y las técnicas del pasado, generando dentro de su aporte un cimiento que respalde las nuevas técnicas y la re-creación de materiales que puedan llegar a ser incluidos en la industria de la construcción; por tanto, para su uso y clasificación se requiere analizar los resultados de los especímenes ensayados a compresión en el laboratorio.

Se han investigado previamente los efectos del curado en los ensayos de compresión y porosidad de morteros de concreto [30], o de cal hidráulica natural [31]. Además, se han estudiado las sensibilidades ante morteros con materiales en nano-fase [32], [33] y las propiedades mecánicas de morteros naturales a base de puzolana y cal [34] como el considerado en este trabajo. En este contexto, el propósito de este estudio es la comparación de las propiedades mecánicas entre el mortero portland y el mortero natural para la construcción civil, a fin de establecer la resistencia a compresión, la cual, se define como la máxima carga alcanzada por unidad de área durante el ensayo [16]; ahora bien, el valor de resistencia garantiza el uso que se le puede dar al material alternativo, teniendo en cuenta los factores que puedan o no lograr la viabilidad en la selección y obtención de cada elemento.

## 1 METODOLOGÍA

### 1.1 Materiales

La mayoría de los morteros tradicionales estudiados en la literatura fueron fabricados con cal no hidráulica y su hidraulicidad se debe a la adición de cerámica. Según Pavía y Caro [8], la evidencia del análisis petrográfico de material arqueológico sugiere que la hidraulicidad inducida por la adición

de la cerámica es parcialmente responsable de la buena calidad y el rendimiento del mortero natural; por tal razón, se utilizan la puzolana y cal viva como agregado pétreo y cementante respectivamente, como sustituto en comparación con el mortero tipo portland [9].

Las fuentes de cal varían su composición físico-química debido a su ubicación de formación y, por ende, no se pueden generalizar sus propiedades. Tradicionalmente, las piedras de cemento que proporcionaron la alimentación de materia prima para la producción de cemento, llamados magras, vinieron de diferentes formaciones geológicas de muchas regiones europeas [15]. Esta misma fuente menciona que la naturaleza de las magras determina en gran medida la calidad de una determinada variedad de cemento, produciendo diferentes propiedades y colores del material. Respecto al yeso, se considera como un material de aditivo en la mezcla del mortero, debido a su fraguado rápido al adicionar agua, el cual fue evidenciado mediante prueba piloto efectuada en Capitanejo-Santander. Y el agua como material común entre ambas clases de mortero, asumiendo el rol de hidratante de las partículas y base para reacción química.

Para la elaboración del mortero natural, se utilizaron materiales disponibles en Colombia, y más específicamente en el departamento de Santander. Para efectos de la experimentación, se reemplazó el agregado pétreo por agregado artificial denominado puzolana, recuperada del desecho de material cerámico de construcciones en San José de Cúcuta – Norte de Santander; se utiliza cal viva como el cementante tomada de Málaga – Santander y el yeso como aditivo proveniente de Capitanejo – Santander.

## 1.2 Método

Inicialmente se establecen las propiedades físicas necesarias de los materiales para la elaboración de la mezcla, incluyendo cálculos de densidad de absorción del agregado fino [17], granulometría de los mismos [18], [19] y relación agua – cemento [20], [21] de los cementantes.

Se prepara el mortero natural mezclando agua, cal, puzolana y yeso, en proporciones establecidas según el diseño factorial experimental  $k_2$  [22], se mezcla el mortero mecánicamente de acuerdo con el procedimiento de mezclado establecido en la norma técnica colombiana *NTC 3546* [23] con diferentes contenidos de agua para variar la fluidez; esta última se determina con 25 golpes de la mesa

de flujo [20], [24], se mezcla el material y se moldean los cubos de 50x50x50 mm [25], [26]. Se obtienen en total 16 muestras de mortero natural. Una vez el mortero fragua, se expone a un curado parcialmente al aire, en consecuencia y a partir de un estudio piloto establecido en la Norma Técnica Colombiana *NTC 1377* para la - elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio [27], se deduce que el ambiente de curado normalizado para mortero tipo portland no es recomendable para la mezcla; se ensaya y se registra la resistencia a esfuerzo a compresión, aplicando carga en las caras del espécimen que estuvo en contacto con la superficie del molde [26].

Además, se hace necesario mencionar que en el proceso de estandarización de la materia prima se usaron una serie de equipos y herramientas, en este sentido, para la demanda de la granulometría se usó la siguiente serie de tamices: No 4, No 8, No 16, No 30, No 50, No 100 y No 200, todos certificados bajo la norma *NTC 32 – ASTM E 11/09*. Para el secado de muestras y cálculos de porcentajes de humedad, se usa un horno eléctrico digital con circulación forzada de aire, capacidad de 200 L y referencia *PG 1903*; para el cálculo de densidades de los agregados se implementa un picnómetro con capacidad de 500 ml con referencia *PG 4*. Igualmente, en el registro del peso se usó una balanza electrónica digital construida en acero estructural, con plataforma en acero inoxidable, con capacidad de 20 kg, referencia *B20*; para peso liviano se usó una balanza electrónica liquidadora de la marca Trúmax, con una capacidad máxima y mínima de 1500 g y 2g respectivamente, con un error de medición de 0,5g y desviación de 0,1g; se usó un cono en material de bronce para prueba de la muestra húmeda; y para el cálculo de la fluidez se usó la mesa de flujo manual, con plataforma circular de 255 mm de diámetro en fundición de bronce, con referencia *PC 40*. Los especímenes se funden en moldes metálicos desmoldables con 50 mm de lado para cada cubo en conjuntos de tres; finalmente se sometieron a diferentes cargas de compresión usando la Máquina Multiusos automática Digital de la empresa Pinzuar LTDA.

## 2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.1 Diseño de mortero portland.

El grupo intacto o control, se diseñó a partir de la metodología sugerida en [9] para el diseño de morteros con cemento tipo Portland, para un objetivo de resistencia a la compresión de 17.2 MPa. Para la elaboración de un metro cúbico de mortero, se utiliza como agregado una cantidad de 1234 kg

de arena de trituración obtenida por medio de implosión, junto con 478 kg de cemento de uso general y 361 litros de agua potable.

## 2.2 Diseño de mortero natural.

De acuerdo al procedimiento descrito en la primera parte de la sección 2.2, se determinaron las propiedades físicas de los agregados necesarios para la elaboración del mortero natural, arrojando las características descritas en la tabla 1, los valores de contenido de humedad relacionados en la tabla 2.

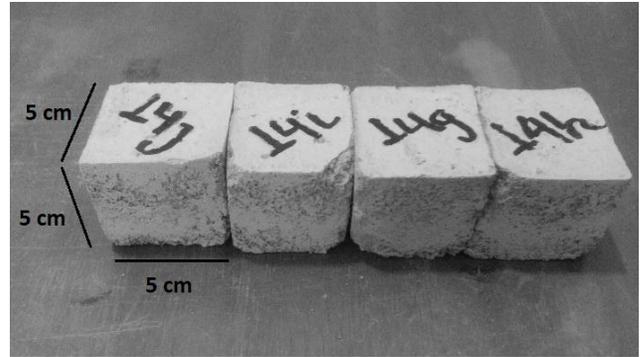
**TABLA 1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AGREGADOS**

Laboratorio	Unidad	Puzolana	Arena
Módulo finura	-	2.94	2.02
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	2.60	2.22
Densidad aparente (base saturada y superficialmente seca)	g/cm <sup>3</sup>	2.63	2.36
Densidad nominal	g/cm <sup>3</sup>	2.67	2.56
Masa unitaria suelta	g/cm <sup>3</sup>	1.52	2.15
Masa unitaria compacta	g/cm <sup>3</sup>	1.76	2.38

**TABLA 2. CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS MATERIALES**

Material	Humedad (%)
Arena	0.41
Puzolana	0.87
Yeso	9.11
Cal apagada	0.99
Cal viva	0.80
Cemento	1.20

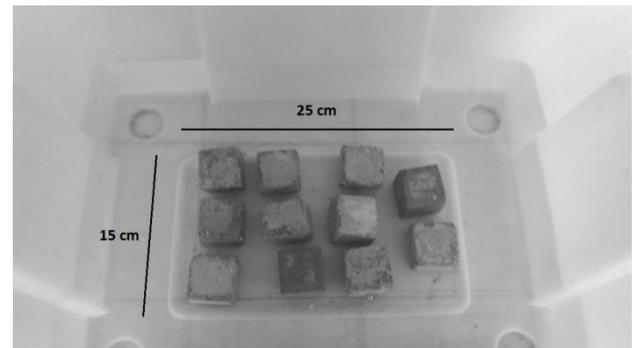
El diseño factorial, como estructura de investigación, es la combinación de dos o más diseños simples, en el cual se manipulan dos o más variables independientes en un mismo experimento. Para este estudio se determinaron las siguientes variables: yeso, puzolana, cal y agua, con los niveles mínimo y máximo entre (0-35g), (480-550g), (80-100g) y (160-190g) respectivamente. La figura 1 corresponde al resultado del diseño experimental factorial conformado por un 23.81% de agua, 11.66% de cal viva, 60.15% de puzolana, y 4,39% de yeso, en peso para producir 1 m<sup>3</sup>, registrando que la muestra falló sin ser sometida a esfuerzos de compresión.



**Fig. 1.** Muestra - Grupo experimental XIV en el laboratorio de la empresa Concretos y morteros.

## 2.3 Curado de mortero natural.

A partir de la investigación temática previa, se registró que el curado óptimo para el mortero natural debe practicarse parcialmente al aire; es decir, se inició el proceso de inmersión a los dos días, en periodo cortos, máximo de 10 minutos, y se continuó el proceso aumentando el tiempo de inmersión durante el periodo de curado, aunque por el momento no se dispone de un protocolo o norma técnica establecido para el desempeño de la muestra bajo inmersión total. En la figura 2 se observan algunas de las muestras de mortero natural sumergidas en su totalidad bajo periodos controlados de tiempo, en un medio de curado con agua potable.



**Fig. 2.** Curado de grupo experimental y control en el laboratorio de la empresa de Concretos y Morteros.

## 2.4 Ensayo a esfuerzos de compresión.

El ensayo de los especímenes a compresión se efectuó por medio de una Máquina Multiusos automática Digital- de la empresa Pinzuar LTDA; la tabla 3 presenta la variación de la resistencia máxima para cada una de las 16 mezclas propuestas, obteniendo el valor promedio a partir de mediciones tomadas después de 28 días de curado de las muestras. En la figura 3, se observa la prueba de ensayo a esfuerzo de compresión, donde los resultados se registraron electrónicamente en el

equipo. La magnitud de la fuerza y la deformación se registró en Kilonewton (KN), y en milímetros (mm) respectivamente, y luego se obtuvo la curva del comportamiento y su punto de rotura.

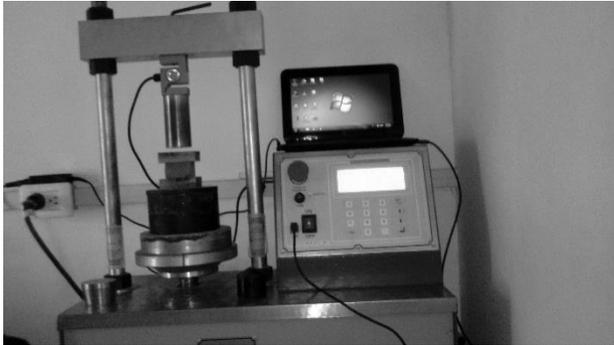


Fig. 3. Ensayo a esfuerzo de compresión de los especímenes en la máquina multiusos

## 2.5 Discusión.

A partir de diferentes mezclas de agua, cal, puzolana y yeso, se prepararon alternativas viables desde el punto de vista estructural y económico para la elaboración de mortero natural, aunque el factor más importante para esta investigación fue la variación de la resistencia.

TABLA 3. RESISTENCIA MÁXIMA A COMPRESIÓN DE GRUPO CONTROL Y EXPERIMENTAL EN 28 DÍAS DE CURADO

Grupo	Resistencia Máxima Promedio (Mpa)		
Grupo de Control	16.38	±	0.81
D. Experimental No. I	1.31	±	0.07
D. Experimental No. II	0.00	±	0.00
D. Experimental No. III	1.44	±	0.07
D. Experimental No. IV	0.00	±	0.00
D. Experimental No. V	1.28	±	0.07
D. Experimental No. VI	0.00	±	0.00
D. Experimental No. VII	1.80	±	0.08
D. Experimental No. VIII	0.00	±	0.00
D. Experimental No. IX	0.67	±	0.27
D. Experimental No. X	0.00	±	0.00
D. Experimental No. XI	0.77	±	0.05
D. Experimental No. XII	0.00	±	0.00
D. Experimental No. XIII	0.77	±	0.04
D. Experimental No. XIV	0.00	±	0.00
D. Experimental No. XV	1.50	±	0.08
D. Experimental No. XVI	0.00	±	0.00

El comportamiento de la mezcla de agua y material calcáreo inicialmente se presenta en un estado de fluidez seca (según porcentaje de fluidez en [8]); sin embargo, durante el proceso de mezclado la cal tiende a liberar el agua absorbida permitiendo la hidratación de las partículas de cal restantes que no

llegaron a hidratarse, lo cual genera una pasta manejable y uniforme, a pesar de la adición de los otros elementos (Puzolana y Yeso) que conforman el mortero natural.

La cal es un material que absorbe agua en gran medida y en condición de inmersión tiende a desplazarse y asentarse alrededor del mortero presentando segregación, lo cual ocasiona un deterioro total; de la misma forma, a pesar de que los morteros de cemento tradicional tienen indudables ventajas y son materiales más compatibles para ser utilizados para el trabajo de reparación, algunos inconvenientes siguen siendo, en su mayor parte, debidos a la alta capacidad de absorción de agua [28]. En este sentido, puede decirse que la elaboración de este tipo de morteros requiere de un ambiente controlado de curado.

En la totalidad de las muestras del grupo experimental, se presenta sedimentación producida por la diferencia de tamaño de partículas y el fenómeno de exudación, generando mayor número de vacíos en la composición del material, ocasionando bajas resistencias. Hay que mencionar, además, que se ha reportado en la literatura que factores como la capilaridad, la porosidad y la resistencia de los materiales de reparación [28] pueden ser controlados por una cuidadosa manipulación de la relación de agua a cemento de la mezcla [29]. Los resultados obtenidos permanecen en línea con estos hallazgos, y ratifican que es deseable obtener una mezcla con mayores adiciones de cal y una relación controlada para reducir el fenómeno de la alta capilaridad.

Se evidencia que en los grupos identificados con números pares (II, IV, VI, VIII, X, XII, XIV y XVI) resistencia alcanzada es de  $0.00 \pm 0.00$  MPa. Estos grupos tienen como particularidad la presencia de yeso en diferentes cantidades dentro de su composición. En este caso, puede decir que las muestras con yeso fallan el ensayo de compresión debido al fenómeno de disgregación del material, generando tracciones internas que el mortero no puede resistir. Para los experimentos realizados, se considera como un agente negativo el alto porcentaje de humedad en el periodo de transporte o almacenamiento del yeso; este factor también influyó para que en los grupos experimentales con contenidos de dicho material se registraran nulas resistencias.

### 3 CONCLUSIONES

Para el mortero natural, puede decirse que, como material estructural para transmisión de cargas se obtienen muy bajas resistencias, debido a causas como su distribución granulométrica y posibles falencias en las proporciones de los materiales. Cabe anotar que el mortero portland de referencia presentaba unas características que en algunos casos no eran comparables con las muestras de mortero natural; se recomienda ampliar el espectro de comparación para mezclas tipo portland con diferentes relaciones de componentes. Además, se evidencia la necesidad de controlar la relación entre agua y cemento, para obtener una mezcla que permita una menor relación de vacíos.

Se evidencia que todas las muestras con presencia de yeso presentaron fallas en el material previamente a su ensayo a compresión, en esta situación, se generan tracciones internas que el mortero no puede resistir como posible causa de tal comportamiento. Se recomienda mantener estables las variables externas y ambientales, procurando evitar la alteración de los materiales al ser extraídos u obtenidos; especialmente en el proceso de transporte y almacenamiento, pues la absorción de altas humedades genera un efecto negativo en el mortero, como pasó con el de yeso.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen las contribuciones del “Grupo de Investigación en Desarrollo Tecnológico e Innovación – GINDET, (SENA)”, por el acompañamiento en la búsqueda de materiales más eficientes y naturales para la construcción civil. Agradecen Al “Semillero de Investigación de Bioconstrucción – SIBIO, (SENA)”, por el acompañamiento en la búsqueda de materiales más eficientes y naturales para la construcción civil. Se reconoce también el acompañamiento metodológico del proceso de la investigación por parte “Grupo de Investigación en Gerencia y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología – GIGAT, (SENA)” y el Tecnoparque Nodo Medellín. Por último, se agradece a las empresas: “PerfolIngeniería” y “PINZUAR LTDA”, por el préstamo de laboratorios y equipos para los ensayos a la compresión; “Concretos y Morteros”, por el préstamo de laboratorios y equipos para el análisis de las diferentes muestras; y “Concretos y Triturados Zulia – CTZ”, por el préstamo de laboratorios y equipos para el análisis de las diferentes muestras.

### REFERENCIAS

- [1] S. Ruiz, J. Patino, A. Marquez, y J. Espinosa, «Optimal design for an electrical hybrid microgrid in Colombia under fuel price variation», *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 7, n.o 24, pp. 1535-1545, 2017. URL: <http://ijrer.com/index.php/ijrer/article/view/6128/pdf>
- [2] J. J. Castro-Maldonado, J. A. Patiño-Murillo, A. E. Florian-Villa, y O. E. Guadrón-Guerrero, «Application of computer vision and low-cost artificial intelligence for the identification of phytopathogenic factors in the agro-industry sector», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1126, p. 012022, nov. 2018 DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1126/1/012022>
- [3] J. J. Castro-Maldonado, H. J. Dulcé-Moreno, y E. D. V-Niño, «Nitrogen implantation into steel wire coated with zinc used as reinforcement in power transmission conductors», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 466, n.o 1, p. 012005, 2013. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/466/1/012005>
- [4] D. F. Zambrano et al., «Thermal properties and phase stability of Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) coating deposited by Air Plasma Spray onto a Ni-base superalloy», *Ceram. Int.*, vol. 44, n.o 4, pp. 3625-3635, mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.109>
- [5] E. Mejía, J. Giraldo, y L. Martínez, «Residuos de construcción y demolición Revisión sobre su composición, impactos y gestión», *Rev. CINTEX*, vol. 18, pp. 105–130, 2013. URL: <http://pascualbravo.edu.co:5056/cintexpb/index.php/cintex/article/view/52>
- [6] L. Barrios-Ziolo, J. Robayo-Gómez, S. Prieto-Cadauid, y S. Cardona-Gallo, «Biorremediación de suelos contaminados con aceites usados de motor», *Rev. CINTEX*, vol. 20, n.o 1, pp. 69–96, 2015. URL: <http://pascualbravo.edu.co:5056/cintexpb/index.php/cintex/article/view/31>
- [7] A. Barragán-Alturo, N. G. Durán-Siachoque, K. A. Figueroa-Gonzalez, y M. X. Rovayo-Novoa, «Ecobloque Estructural para Vivienda de Interés Rural: Un Aporte Para las Comunidades en el Alto Magdalena – Colombia», *Lámpsakos*, vol. 1, n.o 17, pp. 29–39, 2017. URL: [www.funlam.edu.co/revistas/index.php/lampsakos/article/view/2214/1933](http://www.funlam.edu.co/revistas/index.php/lampsakos/article/view/2214/1933)
- [8] S. Pavía y S. Caro, «An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material», *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, n.o 8, pp. 1807-1811, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.003>
- [9] D. Sanchez de Guzman, *TECNOLOGIA DEL CONCRETO Y DEL MORTERO*. Pontificia Universidad Javeriana, 2001.
- [10] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, y A. Boudenne, «Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building», *Energy Build.*, vol. 81, pp. 98-104, oct. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.032>

- [11] A. Cedeño Valdiviezo, «Aglomerantes, morteros y aplanados adecuados para proteger el medioambiente», *Rev. Arquít. Bogotá*, vol. 13, n.o 1, pp. 106–117, 2011. URL: [https://editorial.ucatolica.edu.co/ojsucatolica/revistas\\_ucatolica/index.php/RevArq/article/view/774](https://editorial.ucatolica.edu.co/ojsucatolica/revistas_ucatolica/index.php/RevArq/article/view/774)
- [12] J. Salas Serrano, A. Ferrero, y P. Lucas Alonso, «Utilización de componentes neutros de construcción en Latinoamérica», *Rev. INVI*, vol. 27, n.o 76, pp. 147-175, nov. 2012 DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-83582012000300005>
- [13] J. M. Mendoza-Rangel, J. M. Flores-Jarquín, E. U. De Los Santos, y P. Garcés, «Durabilidad de morteros de reparación sustentables expuestos a ambiente industrial», *Rev. ALCONPAT*, vol. 6, pp. 41-51, 2016. URL: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-68352016000100041&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352016000100041&nrm=iso)
- [14] H. Cañola y C. Echavarría, «Bloques de concreto con emulsión de parafina», *Lámpsakos*, vol. 1, n.o 17, pp. 14–19, 2017. URL: <http://www.funlam.edu.co/revistas/index.php/lampsakos/article/view/2346/1931>
- [15] C. Gurtner, G. Hilbert, D. Hughes, R. Kozłowski, y J. Weber, *Manual on best practice in the application of Roman cements. Roman cement, past and present. Conservation theory and practice. Version 2 November 2012. EU Project 226898 FP7-ENV-2008-1 ROCARE–Roman cement for architectural restoration to new high standards. 2012. 2012.* URL: [http://www.rocure.eu/page/imgt/file/rocure-manual\\_low-res%20\(2b\).pdf](http://www.rocure.eu/page/imgt/file/rocure-manual_low-res%20(2b).pdf)
- [16] F. Hoyos-Gómez, J. D. Betancur-Gómez, D. Osorio-Patiño, y J. G. Ardila-Marín, «Construcción de curvas de factor de concentración de esfuerzos por medio de simulaciones», *Rev. CINTEX*, vol. 21, n.o 1, pp. 35–43, 2017. URL: <http://www.pascualbravo.edu.co:5056/cintexpb/index.php/cintex/article/download/8/8/>
- [17] ICONTEC, Norma técnica colombiana NTC 237 - Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. 1995.
- [18] ICONTEC, Norma técnica colombiana NTC 174 - Especificaciones de los agregados para concreto. 2000.
- [19] ICONTEC, Norma técnica colombiana NTC 2240 - Agregados usados en morteros de mampostería. 2003.
- [20] ICONTEC, Norma técnica colombiana NTC 5784 - Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico. 2010.
- [21] ICONTEC, Norma técnica colombiana NTC 110 - Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico. 2013.
- [22] D. C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, 2.a ed. Limusa Wiley, 2005.
- [23] ICONTEC, Norma técnica colombiana NTC 3546 - Métodos de ensayo para determinar la evaluación en laboratorio y en obra, de morteros para unidades de mampostería simple y reforzada. 2003.
- [24] ICONTEC, Norma técnica colombiana NTC 111 - Especificaciones para la mesa de flujo usada en ensayos de cemento hidráulico. 1997.
- [25] ICONTEC, Norma técnica colombiana NTC 3356 - Mortero premezclado para mampostería. 2000.
- [26] ICONTEC, Norma técnica colombiana NTC 220 - Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm ó 2 pulgadas de lado. 2012.
- [27] ICONTEC, Norma técnica colombiana NTC 1377 - Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio. 2010.
- [28] A. Klisińska-Kopacz y R. Tišlova, «Effect of hydrophobization treatment on the hydration of repair Roman cement mortars», *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 735-740, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.002>
- [29] A. Klisińska-Kopacz, R. Tišlova, G. Adamski, y R. Kozłowski, «Pore structure of historic and repair Roman cement mortars to establish their compatibility», *J. Cult. Herit.*, vol. 11, n.o 4, pp. 404-410, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2010.03.002>
- [30] A. A. Ramezani-pour y V. M. Malhotra, «Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 17, n.o 2, pp. 125-133, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00005-W](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00005-W)
- [31] J. Lanás, J. L. P. Bernal, M. A. Bello, y J. I. A. Galindo, «Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars», *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, n.o 12, pp. 2191-2201, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.005>
- [32] H. Li, H. Xiao, y J. Ou, «A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials», *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, n.o 3, pp. 435-438, 2004 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.025>
- [33] Z. Li, H. Wang, S. He, Y. Lu, y M. Wang, «Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite», *Mater. Lett.*, vol. 60, n.o 3, pp. 356-359, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.08.061>
- [34] M. Ghrici, S. Kenai, y M. Said-Mansour, «Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, n.o 7, pp. 542-549, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009>