

ESTUDIO DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD EN MORTEROS DE CAL AÉREA EN PASTA QUE EMPLEAN ADICIONES

Nicole M. López Villamil¹, Omar I. Molina Bas² y Pedro J. Tarafa Vélez³

¹Universidad de Puerto Rico, Mayagüez Campus
email: nicole.lopez@upr.edu

²Departamento de Ingeniería General, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, PO Box 9000 Mayagüez PR 00681-9000
email: omar.molina1@upr.edu

³Universidad de Puerto Rico, Mayagüez Campus
email: pedro.tarafa@upr.edu

RESUMEN

La cal es un material tradicional de construcción que proviene de la calcinación de piedra caliza y su uso se remonta a la antigüedad. Desde comienzos del siglo XX su uso ha ido disminuyendo debido al empleo masivo de materiales a base de cemento. Esta investigación tiene como objetivo utilizar adiciones minerales y fibras para mejorar las propiedades de la cal como conglomerante para ser utilizado en la construcción o restauración de edificaciones. Se propone como material alternativo para disminuir el uso de morteros con base de cemento Portland y su consecuente efecto en el medio ambiente. Se ensayaron ocho diferentes mezclas de cal aérea apagada en pasta para observar la porosidad y la resistencia de las mismas. Se utilizó un volumen constante de cal aérea y los siguientes aditivos: arena de río, ceniza volate Tipo F (ASTM C618), polvo de ladrillo y fibra de nailon. Para las mezclas se realizaron dos tipos de pruebas, la primera fue la absorción capilar, utilizando una versión adaptada en términos de tiempo de la ASTM C1585. El segundo ensayo fue para comprobar la resistencia a compresión utilizando una versión adaptada de la ASTM C109. Los resultados obtenidos reflejaron una mejoría en las propiedades mecánicas y la durabilidad de los morteros de la cal aérea en pasta que utilizaron las adiciones minerales y fibras. La investigación busca contribuir al conocimiento mediante el aumento de la comprensión sobre el uso de adiciones en cal aérea como una alternativa ecológica a los morteros de cemento Portland.

Palabras claves: cal, cal aérea en pasta, cenizas volantes, fibra de nailon, polvo de ladrillo.

STUDIES ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF AREAL LIME MORTARS USING ADMIXTURE

ABSTRACT

Lime is a traditional construction material that comes from the calcination of limestone (calcium oxide) and has been used for construction by ancient civilizations. Since the early Twentieth Century its use has been decreasing due to the massive use of cement-based materials. This research aims to use minerals and none minerals additions to improve the properties of lime as a binder to be used in the construction and restoration of buildings. This study proposed to use areal lime as an alternative material for mortars that use Portland cement and its consequent effect on the environment. Eight different mixtures were prepared with aerial lime paste to observe the resistance and porosity of the material. A constant volume of aerial lime paste and the following admixtures were used: river sand, fly ash Type F (ASTM C618), brick powder, and nylon fiber. Two types of tests were performed, the first was the capillary absorption test using an adapted version in terms of cure time of the ASTM C1585. The second test was performed to verify the compressive strength using an adapted version of ASTM C109. The results show significant improvement of the mechanical properties and durability of aerial lime paste with mineral and no mineral admixtures. The research seeks to contribute to the body of knowledge by increasing the understanding of the use of admixtures in aerial lime as an ecological alternative to Portland cement mortars.

Key words: lime, aerial lime paste, fly ash, nylon fiber, brick powder.

Nota Editorial: Recibido: noviembre 2019; Aceptado: abril 2020

1. INTRODUCCIÓN

La cal es el material proveniente de la piedra caliza y se ha utilizado durante años como material tradicional en grandes obras de construcción. A través de los siglos su uso ha pasado por muchos procesos de evolución, se

ha utilizado desde revestimiento de infraestructuras singulares como la Gran Muralla China hasta enlucidos de base para muchas pinturas de murales como lo son los frescos de la Capilla Sixtina. El Imperio Romano perfeccionó y popularizaron los procesos de fabricación de los morteros de cal, los cuales continuaron, con variantes, durante la edad media. La utilización de morteros de cal como material principal de construcción se pudo ver tan reciente como en el Siglo XIX, antes de la invención del cemento Pórtland [1].

La evolución de las mezclas de morteros de cal a las de morteros de cemento dio paso al reemplazo casi total de la cal en beneficio del cemento. Esto se debió principalmente a las características que presentaban los morteros de cementos Pórtland en comparación con los de cal, entre las que destacan son: la velocidad de curado, las altas prestaciones y la buena resistencia a los embates del entorno entre otras. Este reemplazo trajo consigo un enorme impacto ambiental ya que el Cemento Pórtland es uno de los materiales más contaminantes al medio ambiente, esto debido a las grandes emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que se liberan durante su producción, siendo responsables de cerca del 5% de las emisiones de los gases efecto invernadero a nivel global [2].

El objetivo principal de este proyecto de investigación es analizar el comportamiento mecánico y la durabilidad de morteros de cal aérea en pasta que emplean adiciones minerales. En la actualidad el mercado de la cal, específicamente la cal aérea en pasta en Puerto Rico se centra en la restauración de edificaciones históricas, terminaciones y aglomerante en conjunto con otros materiales. Este proyecto investiga la incorporación de otros materiales a mezclas previamente determinadas para crear un mortero que mejore las características físicas y las propiedades mecánicas de la cal aérea en pasta. Las adiciones utilizadas en el trabajo son arena, polvo de ladrillo, fibra de nailon y cenizas volantes y se crearon ocho (8) diferentes mezclas para ser analizadas. Se estudió el comportamiento mecánico mediante el ensayo de resistencia a compresión ASTM C109 [3] y la durabilidad se analizó mediante la prueba de absorción capilar ASTM C1585 [4]. La proporción de la mezcla a base de cal aérea sería de (1:3), pasta y arena, según sugerido por Marco Vitruvio Polión en su libro De arquitectura [5]. Esta dosificación de referencia fue utilizada para comparar las características obtenidas por las experimentales. La investigación busca aportar información sobre el comportamiento de las mezclas tradicionales de mortero de cal aérea al incorporar adiciones minerales y fibras.

Factores ambientales

La producción de cemento tiene un efecto negativo sobre el medio ambiente, pero gran parte de la industria y sus investigadores han tomado conciencia del problema y han aceptado el reto demostrando un mayor interés en la búsqueda de alternativas sostenibles, para respetar el medio ambiente. Una tercera parte de las emisiones que provienen de la manufactura de la cal se atribuyen a la quema de combustible para calentar los hornos, aunque el grueso de las emisiones proviene del material crudo [6]. Las emisiones de dióxido de carbono liberadas por el material son inevitables y constantes por lo que las mismas no pueden ser controladas al presente. El mayor impacto ambiental de la cal ocurre en el proceso de manufactura de la cal, en donde se estima que se genera un 68% de emisiones de dióxido de carbono.

En términos de la pasta endurecida, un factor importante para destacar es la permeabilidad del material, lo que permite la transpiración del vapor de agua y del dióxido de carbono de medioambiente. Esto tiene como resultado el continuo endurecimiento a largo plazo de la estructura y la combinación o fijación del CO₂. Además, su baja conductividad térmica permite ahorros energéticos, se estima que hasta un 30% en comparación con otros materiales base cemento [6]. Esto debido a que algunos cementos son más propensos a transmitir las temperaturas del exterior al interior de la estructura.

La cal es un material que se puede reciclar, es biodegradable y el proceso de carbonatación se da en la medida que tenga contacto con el dióxido de carbono de la atmósfera. La manufactura de cal produce 20% menos emisiones de dióxido de carbono que la producción de cemento a nivel global. Sin embargo, la cal tiene la capacidad de absorber dióxido de carbono, más rápidamente que el hormigón de cemento Pórtland, durante su carbonatación lo que es favorable al medioambiente [7]. Según la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (EPA, por siglas en inglés) en su reporte técnico sobre las emisiones de la industria de la cal, en los Estados Unidos se emiten cerca de 25 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono al año [8].

Tipos de cal

La cal es un conglomerante que se compone mayormente de óxido de calcio (CaO), hidróxido de calcio Ca(OH)₂, óxido de magnesio (MgO) y también contiene SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃. Según la normativa española [9-11] existen dos tipos de cal: la cal aérea y la cal hidráulica, la principal diferencia entre ellos es la configuración y sus componentes químicos. La cal aérea, objeto de este estudio, se puede clasificar en dos tipos: la cal aérea I que tiene un contenido mínimo de 90% de óxido de calcio, óxido de magnesio (CaO + MgO) y un máximo de 5% de CO₂. El segundo tipo es la cal aérea II, esta tiene un contenido mínimo de 60% de óxido de calcio, óxido de magnesio (CaO + MgO) y un máximo de 5% de CO₂.

La diferencia principal entre ambas cales es el fraguado y sus componentes químicos, el fraguado en la cal aérea ocurre por el contacto con el aire, mientras que el fraguado de la cal hidráulica ocurre con el contacto del agua. La obtención de la cal aérea, hidráulica o cementos es en función de la temperatura de cocción de la piedra caliza en el proceso de manufactura.

PROCESO DE LA CAL

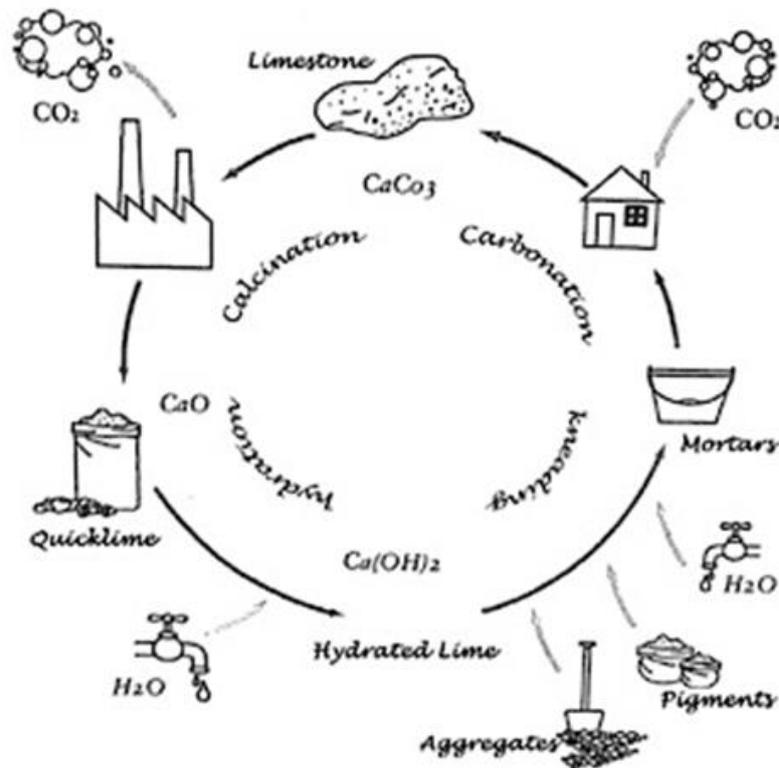


Figura 1: Ciclo de la cal [12]

EL primer proceso del ciclo de la cal es el de calcinación, también conocido como cocción, se describe en la ecuación número 1.



En este proceso se define la porosidad, la densidad y la reacción que tendrá con otros materiales. Por eso es importante tener conocimiento de los resultados obtenidos a exponer el material a altas temperaturas. Cuando la piedra caliza es tratada a temperaturas de 110°C pierde el agua higroscópica, luego entre 900°C a 1000°C se desprenden el dióxido de carbono y se obtiene óxido de calcio, lo que conocemos como cal aérea viva (roca). Pevio a los 1000°C, la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera es mínima en comparación con otros materiales base cemento. Al llegar a los 1200°C se obtiene óxido de calcio, cristal belita (2CaO SiO₂), que comercialmente se conoce como cal hidratada. Al superar los 1260°C se puede obtener el silicato tricálcico, cristal de alita, estos silicatos dependen de la cantidad de arcilla que pueda introducirse en la mezcla. La belita (silicato bicálcico) y la alita (silicato tricálcico) son los dos componentes principales del cemento Pórtland. Por lo cual, si la cal es expuesta a altas temperaturas, se pueden obtener componentes del cemento anhidro. En casos donde el control de calidad no es riguroso, a nivel comercial, se venden erróneamente productos rotulados como cal, a pesar de que fueron expuestos a altas temperaturas [12].

El segundo proceso del ciclo de la cal es el proceso de hidratación o el apagado de la cal. En la siguiente ecuación se muestra la composición química en el proceso de hidratación:



El apagado de la cal puede obtenerse por varios métodos, el primero es por fusión, el segundo por inmersión en agua y el tercero es por aspersión. En el caso de la fusión se utiliza una cantidad específica de agua que se amasa con la cal viva hasta obtener la pasta, este método es el que se utilizó para realizar este trabajo. La pasta

obtenida debe dejarse reposar por un mínimo de seis meses, pero su estado óptimo es usualmente luego de un año y se conserva en un estado blando mientras no entre en contacto con el dióxido de carbono, en donde comienza su proceso de endurecimiento (carbonatación) [12]. El segundo el apagado por inmersión, donde se sumerge en agua por un periodo determinado, usualmente minutos, este tipo de apagado tiene como resultado cal en polvo. La tercera opción es el apagado por aspersión, donde a la cal viva, dispuesta en capas de poco espesor, se le riega agua y esta se reduce a polvo.

2. METODOLOGÍA

En Puerto Rico muchas de las cales aéreas utilizadas en proyectos de construcción o restauración son apagadas en sitio. Existen compañías que las venden con propósitos de conservación, restauración o bioconstrucción. La cal apagada utilizada en este proyecto estuvo un periodo de un año en el proceso de apagado y fue provista por la compañía Master Paint Inc. en Guayanilla, Puerto Rico. Las adiciones empleadas en las muestras de cal aérea en pasta fueron añadidas para mejorar las propiedades de los morteros, algunas de estas adiciones fueron examinadas y catalogadas en los laboratorios de la compañía Master Paint, Inc. En las mismas se utilizaron arena de río, cenizas volantes Tipo F según el ASTM C618 [13], polvo de ladrillo (material arcilloso) y fibra de nailon. La arena, el polvo de ladrillo y la fibra de nailon fueron provistas por la compañía Master Paint Inc., mientras que las cenizas volantes utilizadas fueron provistas por la compañía San Juan Cement.

La fibra de nailon o micro fibras de nailon (fibra sintética) utilizada tenían un diámetro que variaba entre 0,2 mm y 0,5 mm con longitudes de 12 mm aproximadamente. Se utilizaron tres distintas dosificaciones según el peso total de la mezcla y estas se emplean con el fin de reducir la segregación de la mezcla y evitar fisuras a corto y largo plazo. En cuanto al polvo de ladrillo utilizado proviene de la pulverización de cerámicas de ladrillo y para el estudio la granulometría del mismo pasaba por el tamiz número cuatro, según descrito en el ASTM C136 [14]. Del mismo modo, para la prueba de granulometría de la arena se utilizó el ASTM C136.

La dosificación de la mezcla control sigue las recomendaciones de Vitruvio, estas emplean una dosificación volumétrica, donde por cada unidad de cal se añaden tres unidades de arena (1:3). A la mezcla se le añade agua potable, la proporción de agua y pasta utilizada es la misma todas las mezclas, el agua se agrega para aportar docilidad (trabajabilidad) a las mezclas. La proporción de 1:3 se empleó para el mortero de control o de referencia, que luego se modificó al incorporar las adiciones.

En este proyecto se determinaron ocho diferentes mezclas experimentales, las muestras fueron trabajadas en moldes cúbicos estandarizados de metal y sus dimensiones son 2 pulgadas de alto, 2 pulgadas de ancho y 2 pulgadas de profundidad (ASTM C109). En la Tabla 1 se muestran las dosificaciones de las adiciones empleadas en las mezclas de morteros estudiadas. Estas dosificaciones son expresadas en volúmenes y la fibra de nailon es representada en % de utilización.

Tabla 1: Dosificaciones de mezclas utilizadas

Número de mezcla	Cal área en pasta (Tipo N)	Dosis experimentales (en volumen) (Proporción de la mezcla control 1:3)			
		Arena	Ceniza volante	Polvo de ladrillo	Fibra de nilón
1	1	3	-	-	-
2	1	2	1	-	-
3	1	1	2	-	-
4	1	1	1	1	-
5	1	1	1	1	0,1% (0,00118 lb)
6	1	1	2	-	0,1% (0,00145 lb)
7	1	-	2	-	0,1% (0,00118 lb)
8	1	1	-	2	-

Ensayos realizados

La primera prueba realizada fue el estudio de resistencia a compresión siguiendo el proceso descrito por la norma ASTM C109, utilizando morteros en moldes de ocho pulgadas cúbicas. Dado que la resistencia de la cal en pasta es significativamente inferior a las que se suele obtener con los morteros de cemento tipo Pórtland, los tiempos de curado fueron superiores a los recomendados por el estándar ya que las muestras permanecieron 14 días adicionales en los moldes para poder tener muestras que estuvieran endurecidas. Las pruebas de resistencia a compresión se realizaron a los 42, 66 y 104 días de amasado. Para calcular la resistencia se utilizó la siguiente ecuación:

$$p = \frac{f}{a} \quad (3)$$

Los resultados se obtuvieron en términos de fuerza (lbs) y se calculó la presión ejercida en libras por pulgadas cuadradas (psi, por sus siglas en inglés). Todos los ensayos se realizaron en los laboratorios de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez.

La segunda prueba realizada fue la de velocidad absorción capilar para medir la estructura porosa del material y se utilizó el ASTM C1585. Este método de prueba se utiliza para determinar la tasa de absorción de agua, midiendo el aumento en la masa de una muestra como resultado de la absorción de agua en función del tiempo cuando solo una superficie de la muestra está expuesta a agua, ASTM C1585. Para esta prueba se fabricaron cubos de 8 pulgadas cúbicas. Para esta prueba se necesitó un proceso de pre-condicionamiento donde a la edad de 14 días fueron desmoldadas las muestras y permanecieron en el proceso de curado hasta los 42 días. Luego fueron secadas en el horno de materiales por 3 días y colocadas en contenedores plásticos sellados por un periodo de 15 días. Después de este periodo se aplicaron dos capas de un elastómero comercial Masterflex (Pinturas Master©) en cuatro de las seis superficies, la cara superior y su opuesta se dejaron expuestas. A los 61 días de amasado la cara superior fue cubierta con un lamina plástica y su contra parte fue expuesta al agua por nueve días consecutivos.

La absorción, I , se calcula, como el cambio en la masa dividido por el producto del área de la sección transversal de la muestra y la densidad del agua. A los efectos de esta prueba, se descuida la dependencia de la densidad del agua en cuanto a la temperatura y se utiliza un valor de $0,001 \text{ g/mm}^3$. Las unidades de, I , son mm (ASTM C1585). Se utilizó la siguiente ecuación para obtener la razón de absorción capilar:

$$I = \frac{m_t}{a \times d} \quad (4)$$

La razón de absorción se obtiene al graficar la absorción, I versus la raíz cuadrada del tiempo, t . Donde la absorción inicial emplea los datos obtenidos durante las primeras 6 horas del ensayo y la absorción secundaria a partir de ese momento y hasta finalizar el ensayo. A continuación, se presenta el diagrama esquemático utilizado para la prueba de absorción capilar el mismo es una modificación del ASTM C1585, ya que se utiliza una muestra cúbica en reemplazo de la cilíndrica.

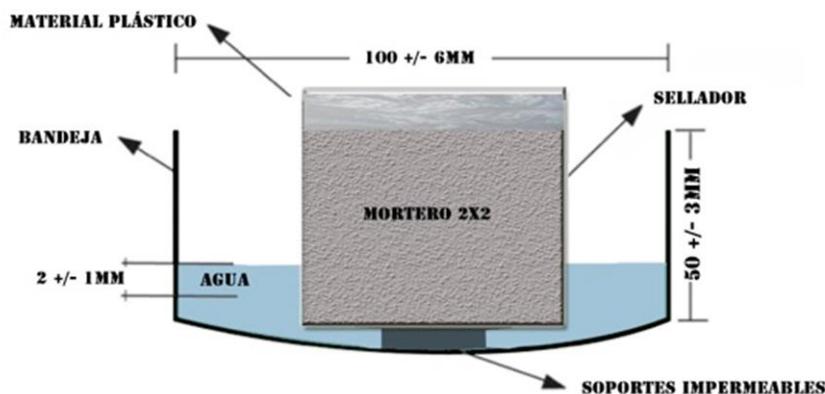


Figura 2: Diagrama de ensayo modificado de absorción capilar

3. RESULTADOS

Resistencia a compresión

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en la campaña experimental en términos de su resistencia a compresión. La Figura 3 muestra los resultados del ensayo de resistencias a compresión para cada mortero estudiado, con distinta dosificación y tipo de adición, según especificados en la Tabla 1. Los morteros experimentales fueron preparados con una dosificación de pasta y agua igual a la dosificación del mortero de referencia (1:3). Los valores presentados corresponden a las resistencias de todas las probetas ensayadas. Las líneas de ajuste que se observan son unas logarítmicas e incluyen los coeficientes de determinación (R^2), además, se muestran las barras de error del 5% para cada uno de los datos presentados.

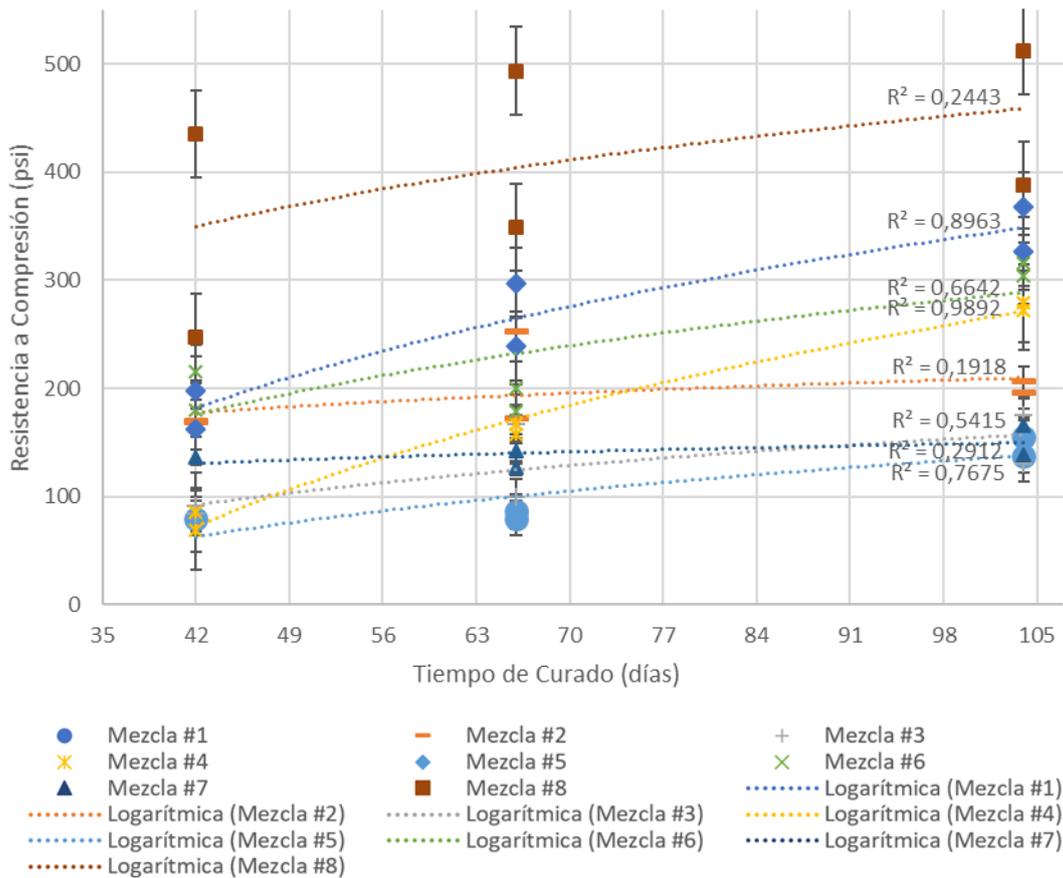


Figura 2: Gráfica de resistencia a compresión de los morteros evaluados para los diferentes tiempos de curados

Al estudiar la resistencia a compresión y su evolución a través del tiempo en los morteros de cal aérea, se observó una tendencia en la que los morteros fabricados con la denominada mezcla 1 (control) obtienen los resultados más bajos de resistencia a todas las edades estudiadas. Por lo cual, todas las mezclas experimentales obtienen mayores resistencias a compresión, siendo la mezcla 8 la de mayor resistencia, donde presentó un incremento de 327% a los 42 días de ensayo en comparación con la mezcla 1 (control) y de 208% a los 104 días en comparación con la misma mezcla. Además, destaca que las mezclas 4 y 5 presentan el mayor diferencial positivo, aumento de resistencia, a través del tiempo.

Las mezclas que emplearon polvo de ladrillo obtuvieron altas resistencias a compresión en el largo plazo (104 días) en comparación con la mezcla control y otras adiciones empleadas. La mezcla número ocho, la cual utiliza dos unidades de arcilla, presenta los mejores resultados a todas las edades estudiadas. Asimismo, la mezcla (8) muestra un aumento en promedio, a todas las edades estudiadas, de 314% en comparación con la mezcla control (1). Por otro lado, la mezcla número cuatro obtiene los resultados más bajos de las mezclas que incluyen polvo de ladrillo, pero es válido indicar que el incremento entre el resultado inicial y el final es tres veces superior. Esta mezcla (4) muestra un aumento en promedio a todas las edades estudiadas de 60% en comparación con la mezcla control (1). Por otro lado, destaca que la mezcla número cinco obtiene los segundos mejores resultados de la prueba. Las mezclas que emplearon polvo de ladrillo, a los 104 días, mostraron un aumento promedio, a todas las edades estudiadas, de 162% en comparación con la mezcla control (1). El uso de polvo de ladrillo mostró tener resultados positivos en términos de la resistencia a compresión.

Las mezclas que emplearon fibra de nailon obtuvieron mejores resultados de resistencias a compresión, en el corto plazo, que la mezcla control. Destaca que obtuvieron una resistencia inicial más alta que el control, ya que todas las mezclas mostraron resistencias que superan los 125 psi a los 42 días. La mezcla número 5, la cual contiene arcilla, presenta los resultados más altos en el largo plazo (104 días) en este grupo que empleó fibra de nailon. Además, muestra un aumento promedio a todas las edades estudiadas de 162% en comparación con la mezcla control (1). La mezcla número 7, la cual contiene dos unidades de cenizas volantes, obtiene los resultados más bajos en comparación al resto de las mezclas que componen este grupo (fibra de nailon). Sin embargo, vale la pena destacar que obtiene mayor resistencia que la mezcla control, pero, su incremento en resistencia es

inferior a los incrementos que presentan las mezclas identificadas con los números cinco y seis, que también emplean fibra de nailon. Por otro lado, la mezcla número 6 obtiene los segundos mejores resultados, a los 104 días, en este grupo y los terceros mejores en comparación con el resto de las mezclas estudiadas. Esta mezcla (6) muestra un aumento en promedio a todas las edades estudiadas de 129% en comparación con la mezcla control (1). El uso de la fibra de nailon mostró tener mejor resultados que la mezcla control y se destacan los resultados en el corto plazo.

Entre las mezclas que contienen cenizas volantes se observa que la mezcla número 5, la cual contiene todas las adiciones empleadas, presenta los mejores resultados del grupo de mezclas que emplea ceniza volante a lo largo de los 104 días. La mezcla número 4 obtiene un resultado cercano al control, pobre, a corto plazo (42 días). Sin embargo, muestra un aumento en resistencia a lo largo de los 104 que sobrepasa en resistencia a la mezcla 2. La mezcla número 2 presenta alta resistencia inicial, pero no desarrolla resistencia a través del tiempo. El uso de un volumen de ceniza volante mostró tener mejor resultados que la mezcla control.

Por último, entre los morteros que emplean dos volúmenes de ceniza volante la mezcla número 6 presentó los mejores resultados de este grupo a todas las edades estudiadas. Además, obtiene un promedio de aumento de resistencia del 45% en relación con la mezcla control (1). La mezcla número 3 obtiene un resultado bajo en el corto plazo (42 días) en comparación al resto de las mezclas que componen este grupo, que emplea dos unidades de ceniza. Asimismo, la mezcla 3 muestra un aumento del 9% a los 42 días en referencia a la mezcla control (1). Por su parte, la mezcla número 7 no muestra un desarrollo resistencia a lo largo del tiempo, obteniendo resultados similares a la mezcla control a los 104 días con un aumento del 4% en comparación a la misma.

Al comparar la mezcla 2 que contiene un volumen de ceniza volante con la mezcla 3 que contiene dos volúmenes de ceniza volante, encontramos que tanto a corto como a largo plazo el uso de dosis bajas de cenizas volantes aumenta la resistencia de la mezcla. La mezcla 2 presenta un aumento promedio de 61% en comparación con la mezcla 3. Ambas mezclas obtienen mejores resultados que la mezcla control, aunque el uso de dos volúmenes de ceniza volante muestra resultados cercanos a los obtenidos por la mezcla control con una mejoría del 25%.

Al contrastarlas mezcla 3 con la 6 y la mezcla control. Donde, la mezcla 3 contiene dos volúmenes de cenizas volantes y la mezcla 6 también contiene dos volúmenes de ceniza volante, más 0,1% de fibra de nailon. Las mezclas que utilizan fibra de nailon obtienen un aumento mayor al inicio de la prueba que las muestras que no tienen fibra. A los 42 días la mezcla 6 obtuvo una resistencia mayor que la tres en un 126%. Del mismo modo, presentó un aumento promedio del 90% a lo largo de los 104 días.

Por último, se comparó la mezcla 4 y la 5. La mezcla 4 contiene un volumen de cada adición al igual que la mezcla 5, pero la mezcla 5 contiene 0,1% de fibra de nailon y la cuatro no emplea fibras. Las mezclas que utilizan fibra de nailon obtienen mejores resultados iniciales que las muestras que no emplean fibra. Aunque ambas ganan resistencia de forma consistente a través del tiempo, el uso de la fibra provee una resistencia inicial que representa un 134% en los primeros 42 días. A lo largo de la prueba la muestra 5 presentó un aumento promedio de 75% en comparación con la mezcla 4.

Absorción capilar

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la prueba de absorción capilar. Durante el primer día se midió la cantidad inicial de agua absorbida en las primeras seis horas. En los días restantes la medida del agua retenida se pesó cada 24 horas por los restantes nueve días. El resultado acumulativo de las pruebas se presenta en la gráfica que se presenta a continuación. La Figura 4 muestra resultados del ensayo de velocidad de absorción capilar para cada mortero estudiado, con distinta dosificación y tipo de adición. Los morteros experimentales fueron preparados con una dosificación de pasta y agua igual a la dosificación del mortero de referencia (1:3). Los valores presentados corresponden a la razón de absorción capilar de las probetas ensayadas y se presenta una gráfica de absorción, I , en mm frente a la raíz cuadrada de tiempo en $s^{1/2}$ según indicado el ASTM C1585.

Al estudiar la velocidad de absorción capilar en los morteros de cal aérea, se observó una tendencia en la que los morteros fabricados con la mezcla 2 muestran la menor absorción de todas las mezclas estudiadas en términos de velocidad de absorción inicial (primeras seis horas). Por otro lado, la mezcla 6 muestra la menor absorción de todas las mezclas estudiadas en términos de velocidad de absorción secundaria (entre las 6 horas iniciales y el último día de ensayo). Por su parte, la mezcla número siete obtiene los resultados más elevados, de todas las mezclas estudiadas, tanto para velocidad absorción inicial como para secundaria. En orden, la mezcla número 7 obtuvo la mayor absorción, seguida de cerca por la mezcla control (1) y en una tercera posición encontramos a la mezcla número 3.

Entre las mezclas que emplearon polvo de ladrillo y la mezcla número 1, la de control muestra mayor absorción que las mezclas estudiadas en este grupo. La mezcla 4 presenta la mayor absorción de las muestras que emplearon polvo de ladrillo, pero su velocidad de absorción inicial y secundaria es -5% en comparación a la absorción de la mezcla control (1).

Por otro lado, en el grupo de las mezclas que emplearon fibra de nailon, la mezcla número 7 muestra mayor absorción, obteniendo una velocidad de absorción similar a la mezcla control, mostrando una mejoría promedio de 3% a lo largo de toda la prueba. La mezcla seis obtuvo pendientes similares a la mezcla 7 y a la mezcla control (1) en términos de absorción inicial, pero obtiene resultados menores en absorción secundaria en comparación con ambas.

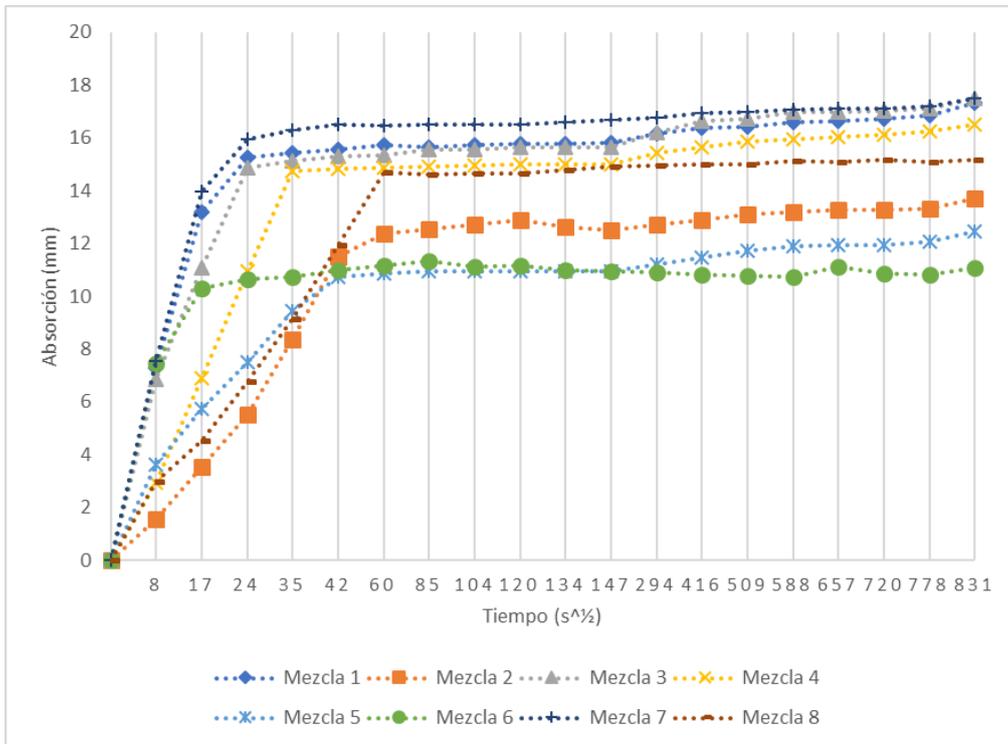


Figura 3: Gráfica absorción capilar: velocidad de absorción en función al tiempo

Entre las mezclas que emplean una unidad de cenizas volantes, la mezcla número uno (control) muestra mayor absorción que todas las mezclas que componen este grupo. La mezcla número cuatro presenta el segundo mayor resultado y presenta una diferencia en promedio de -5% en comparación a la mezcla control (1). La mezcla número 2 obtiene los resultados más bajos en este grupo en términos de absorción inicial para luego aumentar en la absorción secundaria un 9% en comparación con la mezcla 5. Por otro lado, las mezclas que emplea dos unidades de ceniza volante obtuvieron pendientes de absorción inicial muy similares entre si y parejos a la mezcla control (1).

Al igual que en la prueba de resistencia a compresión se realizaron comparaciones entre la mezcla 2 que contiene un volumen de ceniza volante con la mezcla 3 que contiene dos volúmenes de ceniza volante. En la prueba de absorción capilar la mezcla 3 mostró resultados de mayor absorción capilar que la mezcla dos, con un aumento en absorción capilar del 21%. La mezcla 3 y la mezcla control (1) obtuvieron valores similares, la mezcla 3 mejoró 1% en la absorción secundaria con referencia a la mezcla control.

Del mismo modo, se contrastaron los resultados de la mezcla 3 con los de la mezcla 6. La mezcla 3 contiene dos volúmenes de cenizas volantes mientras la mezcla 6 contiene dos volúmenes de ceniza volante y 0,1% de fibra de nailon. La mezcla 6 obtiene el resultado menor, tanto en absorción inicial como secundaria. La mezcla 3 muestra resultados más altos en comparación con la mezcla 6, con un aumento promedio en absorción de un 33%. Esta comparación sugiere que la porosidad de las mezclas no se ve afectada por la utilización de dosis altas de cenizas volantes. No obstante, se observa que el uso de fibra de nailon podría estar alterando la absorción capilar de las mezclas.

El último grupo de mezclas comparadas, está compuesto por la mezcla 4, la mezcla 5 y la mezcla control. La mezcla 4 contiene un volumen de cada adición, al igual que la mezcla 5, pero la mezcla 5 contiene 0,1% de fibra de nailon. La mezcla 4 obtuvo una mayor absorción inicial y mostró un aumento promedio de capacidad de absorción con respecto a la mezcla 5 de un 26%. La fibra aparenta estar alterando, a la baja, la absorción capilar de la mezcla 5 en comparación con la mezcla 4 y la mezcla control (1).

4. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

El objetivo principal de este proyecto de investigación pretendía indagar sobre la incorporación de adiciones minerales y fibras, disponibles en el mercado local, a mezclas de mortero de cal aérea en pasta. Aportando datos técnicos sobre las propiedades de los morteros estudiados en búsqueda de un mejor producto en término de sus propiedades mecánicas y su durabilidad. De los resultados observados podemos concluir que la incorporación de polvo de ladrillo beneficia las propiedades mecánicas, resistencia a compresión, de los morteros de cal aérea a todas las edades estudiadas. Sin embargo, el polvo de ladrillo tiende a ralentizar la velocidad inicial de absorción al agua de los morteros.

Igualmente, el uso de fibra de nailon mostró valores de resistencia a compresión inicial superiores al compararlos con los obtenidos por la mezcla de referencia. También se desprende que la incorporación de cenizas volantes puede beneficiar las propiedades mecánicas, de resistencia a compresión de los morteros de cal aérea en pasta, a todas las edades estudiadas. Destaca, que el uso de dosis bajas, una unidad, presenta mejores resultados que al emplear dos unidades de cenizas. Por otro lado, los morteros que presentaron una mayor velocidad de absorción inicial al agua coinciden con los morteros que presentaron resistencias a compresión más bajas.

En conclusión, podemos afirmar que las adiciones empleadas, en las dosis adecuadas, pueden mejorar la resistencia a compresión y la vida útil de los morteros de cal. Además, podemos concluir que es viable la utilización de dosis moderadas de cenizas volantes, un residuo industrial, en las mezclas. En cuanto a la velocidad de absorción capilar, podemos inferir que el polvo de ladrillo y las cenizas volantes modifican la mencionada propiedad física de los morteros, pero no parece ser un factor que menoscabe el desarrollo de resistencia a través de tiempo.

5. RECONOCIMIENTOS

Los investigadores desean reconocer a las entidades e individuos que contribuyeron a la realización de este proyecto de investigación. Un agradecimiento a la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, a la compañía Master Paint Inc. y Essroc (San Juan Cement) por contribuir con los materiales utilizados para esta investigación. Por último, un agradecimiento muy especial al Sr. José Bastián, al Dr. Antonio González Quevedo y finalmente al Servicio de Parques Nacionales, Oficina de Puerto Rico, por permitirnos utilizar sus instalaciones en el Polvorín y asesorarnos en todo lo relacionado a la industria de la cal aérea y al empleo de la misma.

6. REFERENCIAS

- [1] Gárate Rojas, Ignacio. *Artes de la Cal, 2da Edición*. Madrid: Editorial Munilla-Lería, 2002.
- [2] Huntzinger, Deborah N., Eatmon, Thomas D. "A life-cycle assessment of Portland Cement Manufacturing: Comparing the Traditional Process with Alternative Technologies", *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, no. 7, 668-675, 2009.
- [3] ASTM C109 / C109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), Obtenido de www.astm.org, 2016.
- [4] ASTM C1585-13, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. Obtenido de www.astm.org, 2013.
- [5] Arredondo Y Verdú, Francisco. "Yesos y Cales". *Madrid: Revista Obras Públicas E.T.S. Ingenieros de Caminos*, 1991
- [6] ECOFYS. "A Competitive and Efficient Lime Industry, Cornerstone for a Sustainable Europe". EuLA: European Lime Association (www.eula.eu), 2014.
- [7] LILI. (s.f.). Environmental and health benefits of lime. Obtenido de Low-impact Living Initiative: www.lowimpact.org
- [8] Office of Air and Radiation U.S. Environmental Protection Agency. Technical Support Document for the Lime Manufacturing Sector: Proposed Rule for Mandatory Reporting of Greenhouse Gases. Retrieved from United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/>, 2009
- [9] UNE-EN 459-1:2011. Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. Obtenido de Asociación Española de Normalización y Certificación, 2011.
- [10] UNE-EN 459-2:2011. Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de Ensayo. Obtenido de Asociación Española de Normalización y Certificación, 2011.
- [11] UNE-EN 459-3:2011. Cales para la construcción. Parte 3: Evaluación de conformidad. Obtenido de Asociación Española de Normalización y Certificación, 2011.

- [12] ARGANO, Sónia, GUIXERAS, Montserrat. (2009). Cal Aérea en Pasta, apuntes para su buen uso. Barcelona: Joystuc.
- [13] ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Obtenido de www.astm.org, 2014
- [14] ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Obtenido de www.astm.org, 2014.