

Evaluación de la Resistencia a Compresión y Expansión de Morteros de Cemento

Hidráulico con Reemplazo de Metacaolín por Cemento

Laura Villamizar Martínez y Jorge Eliécer Gómez Herrera

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero(a) Civil

Director

Ludwing Pérez Bustos

Magister en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mi familia, a mi padre, a mi madre, a mis hermanos, e incluso a mi sobrina, quien, a pesar de su corta edad, también ha sido un gran apoyo para mí durante todo este proceso de formación; a ellos que han sido y seguirán siendo ese motor que me impulsa cada día a seguir adelante sin importar las circunstancias, a ellos que siempre han creído en mí, aun cuando yo misma he dudado; a ellos a quienes simplemente les debo absolutamente todo lo que soy.

También agradezco a mi director de proyecto por su apoyo y su inmensa paciencia; a la familia que tuve el placer de elegir, es decir, mis amigos más cercanos, de quienes también recibí apoyo, pero sobre todo compañía, e hicieron de éste un lugar más ameno; y finalmente, a todos aquellos que de una u otra forma contribuyeron en este proceso que me convierte hoy en Ingeniera Civil.

Laura Villamizar Martínez

En este pequeño párrafo quiero dar mis más sentidas gracias primeramente a Dios que me tiene en este momento aquí con salud y muchas ganas de seguir, agradecer a todo aquel que creyó y me apoyo durante todo el proceso académico que recorrí, desde mi madre, mi padre, hermano y todos los miembros de mi familia, a mis amigos, compañeros y profesores que me ayudaron a crecer y absorber conocimiento durante el proceso y finalmente quiero dar gracias a la institución que facilito el préstamo de las instalaciones para el desarrollo del proyecto y a todo el personal de laboratorio de materiales, a mi director de proyecto y mi compañera de grupo que sin la ayuda de ellos no hubiera sido posible la terminación de este proyecto.

Jorge Eliécer Gómez Herrera

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1. Objetivo General	14
1.2. Objetivos Específicos.....	14
2. Antecedentes	15
2.1. Influencia de la Composición Mineralógica de los Caolines Sobre el Desempeño de Morteros Adicionados con MK	15
2.2. Caracterización de Morteros de Cemento Pórtland Substituido por Metacaolín de Baja Pureza.....	15
2.3. Propiedades y Durabilidad del Cemento con Adición de Metacaolín: Mortero y Hormigón	16
2.4. Desempeño de Morteros Adicionados con Metacaolín Frente a la Acción de Sulfatos.	17
3. Marco Teórico.....	18
3.1. Mortero	18
3.1.1. Tipos de mortero	18
3.1.1.1. Morteros calcáreos.	18
3.1.1.2. Morteros de yeso.....	19
3.1.1.3. Morteros de cal y cemento.	19
3.1.1.4. Mortero de cemento.	19
3.1.2. Usos del mortero	20
3.1.2.1. Mortero de pega.	20
3.1.2.2. Mortero de relleno.....	21

3.1.2.3. Mortero de recubrimiento.	21
3.1.3. Propiedades de los morteros en estado plástico	21
3.1.3.1. Manejabilidad.....	21
3.1.3.2. Retención de agua.	21
3.1.3.3. Velocidad de endurecimiento.....	22
3.1.4. Propiedades de los morteros en estado endurecido.....	22
3.1.4.1. Retracción.	22
3.1.4.2. Adherencia.	22
3.1.4.3. Resistencia.	23
3.1.4.4. Durabilidad.....	24
3.1.4.5. Apariencia.	24
3.2. Material Puzolánico	24
3.2.1. Tipos de puzolanas	25
3.2.1.1. Puzolanas naturales.....	25
3.2.1.2. Puzolanas artificiales.....	25
3.3. Metacaolín.....	25
3.3.1. Efecto puzolánico del metacaolín	26
4. Metodología	26
4.1. Caracterización de los Materiales	27
4.1.1. Agregado fino	27
4.1.1.1. ASTM C40: Método de prueba estándar para la determinación de impurezas orgánicas en agregados finos para concreto (NTC 127).....	27

4.1.1.2. ASTM C136: Método de prueba estándar para el análisis de tamiz de agregados finos y gruesos (NTC 77).....	28
4.1.1.3. ASTM C128: Método de prueba estándar para densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado fino (NTC 237).	28
4.1.1.4. ASTM C29: Método de prueba estándar para determinar la densidad aparente (peso unitario) y los vacíos en el agregado (NTC 92).....	29
4.1.2. Cemento y metacaolín.....	29
4.1.2.1. ASTM C188 - Método de prueba estándar para la densidad del cemento hidráulico (NTC 221).	29
4.1.2.2. ASTM C187 - Método de prueba estándar para la cantidad de agua requerida para la consistencia normal de la pasta de cemento hidráulica (NTC 110).....	30
4.1.2.3. ASTM C191 - Métodos de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico con aguja Vicat (NTC 118).....	30
4.2. Diseño de Mezclas de Mortero	31
4.2.1. Mortero con 0% de metacaolín	39
4.2.2. Mortero con 20% de metacaolín	40
4.2.3. Mortero con 25% de metacaolín	40
4.2.4. Mortero con 30% de metacaolín	40
4.3. Tamaño de muestra	41
4.3.1. Tamaño muestral para la estimación de una media	41
4.3.2. Teorema del límite central	41
4.3.3. Cálculo del tamaño muestral.....	41
4.3.3.1. Tamaño muestral ajustado a posibles pérdidas.	42

5. Resultados	43
5.1. ASTM C109 - Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulicos (NTC 220).....	43
5.2. ASTM C1038 - Método de prueba estándar para la expansión de barras de mortero de cemento hidráulico almacenadas en agua (NTC 4927)	45
6. Análisis Estadístico	48
6.1. Gráfica de probabilidad.....	48
6.2. Teorema de Chebyshev	51
6.2.1. Regla empírica	51
6.3. Gráfica de caja.....	55
7. Conclusiones y Recomendaciones	57
Referencias Bibliográficas	60

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Análisis por tamizado del agregado fino.	28
Tabla 2. Datos obtenidos en la caracterización de los materiales.	31
Tabla 3. Fluidéz recomendada para morteros.	32
Tabla 4. Resistencia a la compresión a los 28 días.	32
Tabla 5. Resistencia promedio requerida.	33
Tabla 6. Cantidad inicial de material para el mortero con 0% de metacaolín.	35
Tabla 7. Cantidad final de material para el mortero con 0% de metacaolín.	36
Tabla 8. Cantidad de material para el mortero con 20% de metacaolín.	37
Tabla 9. Cantidad de material para el mortero con 25% de metacaolín.	37
Tabla 10. Cantidad de material para el mortero con 30% de metacaolín.	37
Tabla 11. Relación A/C para la cual se cumple el porcentaje de fluidéz seleccionado.	38
Tabla 12. Cantidad de material en función de la cantidad de cemento corregida para el mortero con 0% de metacaolín.	39
Tabla 13. Cantidad de material corregidas para el mortero con 0% de metacaolín.	39
Tabla 14. Cantidad de material para el mortero con 0% de metacaolín.	39
Tabla 15. Cantidad de material para el mortero con 20% de metacaolín.	40
Tabla 16. Cantidad de material para el mortero con 25% de metacaolín.	40
Tabla 17. Cantidad de material para el mortero con 30% de metacaolín.	40
Tabla 18. Resistencia a la compresión a los 28 días del mortero con 0% de metacaolín.	43
Tabla 19. Resistencia a la compresión a los 28 días del mortero con 20% de metacaolín.	44
Tabla 20. Resistencia a la compresión a los 28 días del mortero con 25% de metacaolín.	44

Tabla 21. Resistencia a la compresión a los 28 días del mortero con 30% de metacaolín. ..	45
Tabla 22. Expansión del mortero con 0% de metacaolín.....	45
Tabla 23. Expansión del mortero con 20% de metacaolín.....	46
Tabla 24. Expansión del mortero con 25% de metacaolín.....	47
Tabla 25. Expansión del mortero con 30% de metacaolín.....	47
Tabla 26. Resistencia a compresión y expansión promedio.	48
Tabla 27. Porcentaje de datos de resistencia a la compresión dentro del rango dado.	52
Tabla 28. Porcentaje de datos de expansión dentro del rango dado.	52

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Metodología de desarrollo del proyecto.....	27
Figura 2. Contenido de impurezas orgánicas en el agregado fino.....	27
Figura 3. Resistencia a la compresión vs Relación agua/cemento.....	33
Figura 4. Resistencia a la compresión VS Contenido de cemento.	34
Figura 5. Gráfica de probabilidad para resistencia a la compresión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacolín.	49
Figura 6. Gráfica de probabilidad para expansión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacolín.....	50
Figura 7. Representación gráfica del teorema de Chebyshev.	51
Figura 8. Representación gráfica de la regla empírica del teorema de Chebyshev.	52
Figura 9. Gráfica de campana para resistencia a la compresión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacolín.	53
Figura 10. Gráfica de campana para expansión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacolín.....	54
Figura 11. Gráfica de caja para resistencia a la compresión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacolín.....	55
Figura 12. Gráfica de caja para expansión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacolín.....	56

Resumen

Título: Evaluación de la Resistencia a Compresión y Expansión de Morteros de Cemento Hidráulico con Reemplazo de Metacaolín por Cemento *

Autores: Laura Villamizar Martínez y Jorge Eliécer Gómez Herrera **

Palabras clave: mortero, material puzolánico, metacaolín, propiedades físico-mecánicas, compresión, expansión.

Descripción:

En el presente documento se describe el procedimiento que se llevó a cabo para la evaluación de la resistencia a la compresión y expansión de morteros de cemento hidráulico modificados con metacaolín, dicha modificación fue hecha con el fin de buscar mejoras en sus propiedades físico-mecánicas, que aumenten su calidad y eficiencia y a su vez conlleven a una reducción de costos de materiales y disminuyan la contaminación ambiental que se pueda producir por la elaboración del cemento Pórtland, ya que éste se está utilizando en menor proporción.

Se evaluó un mortero de referencia, el cual corresponde a un mortero convencional, sin modificaciones, y morteros con 20%, 25% y 30% de reemplazo del material cementante por metacaolín. Las muestras fueron valoradas teniendo en cuenta las especificaciones de la ASTM (American Society for Testing and Materials) y posteriormente, se realizó un análisis de los resultados obtenidos, comparando los morteros modificados con metacaolín con respecto al mortero convencional.

Se observó una disminución de la resistencia a la compresión y de la expansión de los especímenes modificados en comparación con el mortero de referencia, siendo el ensayo de expansión un resultado favorable, a diferencia del ensayo de resistencia a la compresión, del cual se esperaba un aumento de la misma.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería civil. Director: Ludwing Pérez Bustos. Magister en Ingeniero Civil.

Abstract

Title: Evaluation of the Resistance to Compression and Expansion of Hydraulic Cement Mortars with Replacement of Metakaolin by Cement*

Authors: Laura Villamizar Martinez and Jorge Eliecer Gomez Herrera**

Key Words: mortar, pozzolanic material, metakaolin, physical-mechanical properties, compression, expansion.

Description:

This document describes the procedure that was carried out for the evaluation of the resistance to compression and expansion of hydraulic cement mortars modified with metakaolin, this modification was made in order to seek improvements in its physical-mechanical properties, that increase its quality and efficiency and in turn lead to a reduction in material costs and reduce environmental pollution that may be produced by the production of Portland cement, since it is being used in a smaller proportion.

A reference mortar was evaluated, which corresponds to a conventional mortar, without modifications, and mortars with 20%, 25% and 30% replacement of the cementing material by metakaolin. The samples were evaluated taking into account the specifications of the ASTM (American Society for Testing and Materials) and subsequently, an analysis of the results obtained was carried out, comparing the mortars modified with metakaolin with respect to the conventional mortar.

A decrease in the compressive strength and expansion of the modified specimens was observed in comparison with the reference mortar, with the expansion test being a favorable result, unlike the compressive strength test, from which a better result was expected. increase of it.

* Degree Work

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Ludwing Perez Bustos. Master in Civil Engineering.

Introducción

La evolución de los materiales de construcción ha venido en auge en estos últimos años, tomando gran importancia en aplicaciones estructurales, en el mejoramiento ambiental y en muchos otros ámbitos de la sociedad actual, esta evolución busca mejorar las propiedades de los materiales para aumentar su calidad y eficiencia y al mismo tiempo reducir la contaminación que se pueda producir, como por ejemplo la emisión de gases en la elaboración del concreto y de sus elementos como el cemento (Llago Acero & Calvo Herrera, 2009).

El cambio climático y las expansiones urbanas que se vienen experimentando en las ciudades tienen una estrecha relación con los numerosos problemas ambientales, como variaciones de temperatura, el efecto de isla de calor urbana, entre otras afectaciones, los científicos atribuyen las variaciones de temperatura al “efecto invernadero” que es la concentración de ciertos gases (vapor de agua, dióxido de carbono, metano, entre otros en mayor o menor medida) en la atmósfera que bloquean el calor y no permiten que escape, y el efecto de isla de calor a la modificación de la cobertura del suelo, es decir, la transformación de la superficie con materiales impermeables como el asfalto y el concreto (Bailey & Callery, n.d.; Villanueva-Solis et al., 2013).

Es conveniente remarcar que la industria del cemento es una gran aportante de estos gases que proviene de la calcinación de la piedra caliza y/o esquistos, siendo éstas unas de las materias primas en la fabricación del cemento. La industria del cemento está contribuyendo en un 7% en las emisiones de dióxido de carbono del mundo (Llano Guerrero, 2017; Vatopoulos & Tzimas, 2012; Zhao et al., 2015).

De las desventajas del cemento Pórtland, en términos ambientales y de estabilidad, nace la necesidad de estudiar y emplear cementos que por constitución propia en estado puro o por adiciones adecuadas sobre él, creen estabilidad y durabilidad, manteniendo, y mejorando las buenas cualidades del cemento Pórtland, y ahí es donde surgen los cementos férricos, cementos de escoria, cementos aluminosos, entre otros (Soria Santamaría, 1963).

En estos grupos mencionados anteriormente aparecen los cementos puzolánicos, donde se es posible el uso de las puzolanas naturales ya sean de origen sedimentario o volcánico. Este tipo de materiales han sido ampliamente empleados como sustitutos del cemento Pórtland en muchas aplicaciones debido a que se adaptan fácilmente a la producción del cemento, y en algunos casos pueden mejorar la resistencia y la durabilidad del hormigón. En años recientes se le ha tomado un interés al metacaolín con el mismo fin; últimamente muchos publican sus monografías con este material viendo sus efectos en morteros y hormigones (Abbas et al., 2010; Burgos Galindo et al., 2015).

Con base en todo lo referido anteriormente, este proyecto de investigación busca incursionar en el campo del metacaolín, utilizándolo como reemplazo parcial del material cementante en morteros de cemento hidráulico, con el fin de analizar la influencia que éste tiene sobre dichos morteros y las propiedades que pueda aportar a los mismos; teniendo en cuenta que ha habido estudios similares en los que se obtuvieron resultados positivos, los cuales se usaron como base para la presente investigación.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar la resistencia a compresión y expansión de morteros de cemento hidráulico con reemplazo de metacaolín por cemento.

1.2. Objetivos Específicos

Determinar la resistencia a la compresión de los morteros de cemento hidráulico con porcentajes de reemplazo de 20%, 25% y 30% de cemento por metacaolín y del mortero de referencia.

Evaluar la expansión de barras de mortero sumergidas en agua con cal hidratada de alto contenido de calcio.

Comparar los resultados obtenidos de los ensayos del mortero convencional con los de los morteros modificados con metacaolín.

2. Antecedentes

En estudios anteriores ha quedado demostrado que la sustitución parcial del cemento Pórtland por metacaolín en morteros conlleva a mejoras significativas en sus propiedades. A continuación, se presentan algunos artículos que lo confirman.

2.1. Influencia de la Composición Mineralógica de los Caolines Sobre el Desempeño de Morteros Adicionados con MK

Resumen: El objetivo primordial de este trabajo fue la producción de metacaolín para uso como adición puzolánica en morteros y concretos de cemento Pórtland. El artículo está enfocado en evaluar el desempeño de dos tipos de metacaolín, cuya materia prima difiere en su composición mineralógica (48 y 97% de caolinita). Se evaluaron las propiedades de absorción capilar y la permeabilidad a cloruros en morteros adicionados con el 10 y 20% de MK con respecto a la cantidad de cemento. Los resultados indicaron un mejor comportamiento para las mezclas adicionadas con MK obtenido a partir del caolín de mayor pureza. Sin embargo, la diferencia entre las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas con el 20% de adición de los dos tipos de MK evaluados fue mínima, lo cual indica la posibilidad de utilización de caolines de menor pureza para producir este tipo de puzolanas (Torres Agredo & Mejía de Gutiérrez, 2007).

2.2. Caracterización de Morteros de Cemento Pórtland Sustituido por Metacaolín de Baja Pureza

Resumen: Esta investigación busca caracterizar el efecto del nivel de sustitución de metacaolín (MK) por cemento Pórtland (CP) en niveles de 0, 10, 20, 30, 40 y 50%; se dio seguimiento a la resistencia a la compresión a 1, 3, 7, 14, 28 y 90 días. El uso de 10-30% de

MK fue favorable. Los morteros base CP puro registraron 8 y 38 MPa a 1 y 90 días, respectivamente; mientras que aquellos con reemplazo de 10-30% del CP mostraron mejores resistencias de alrededor de 10 y 52 MPa a 1 y 90 días de curado. Por otro lado, la sustitución de CP por 40 y 50% de metacaolín resultó en bajas resistencias tempranas, con 1-3 MPa a 1 día de curado; sin embargo, la resistencia creció rápidamente y después de 90 días, los morteros alcanzaron 49 y 40 MPa para 40 y 50% MK, respectivamente. El MK mostró fuerte actividad puzolánica a pesar de su baja pureza, se observó el consumo de hidróxido de calcio por análisis térmico y microscopía electrónica de barrido. Esta última técnica mostró que después de 90 días las microestructuras de todos los morteros fueron densas acorde a las propiedades mecánicas registradas (Escalante García et al., 2011).

2.3. Propiedades y Durabilidad del Cemento con Adición de Metacaolín: Mortero y Hormigón

Resumen: En este trabajo se estudia el efecto del metacaolín sobre las prestaciones del hormigón. Las probetas curadas a 360 y 90 días se sometieron a ensayos de resistencia a compresión y de tracción indirecta respectivamente. Se hizo un seguimiento de la resistencia a la compresión de los materiales ante el ataque de sales (soluciones de cloruro y de sulfato-cloruro) y, se midió la penetración de cloruros y la capacidad de los hormigones de inmovilizar estos iones. Los resultados se compararon con los obtenidos con hormigones elaborados con cemento Pórtland ordinario (OPC) y, con cemento de calor de hidratación moderado (tipo II). El MK resultó influir muy positivamente en la resistencia del hormigón a 28 días debido a la mejora de la microestructura del cemento hidratado. La sustitución de cemento por metacaolín aumentó la resistencia del hormigón al ataque de cloruros. El hormigón con metacaolín demostró ser más duradero en entornos de sulfato-cloruro que los

hormigones elaborados con OPC o con cemento de tipo II. Los perfiles de concentración de cloruros a distintas profundidades y la diferencia entre los contenidos de cloruro libre y total, mostraron claramente que el cemento con metacaolín reducía la penetración de cloruros en el hormigón y, aumentaba su capacidad para combinar con iones cloruro. La conclusión general fue que podía fabricarse material puzolánico utilizable, mediante la activación térmica del caolín local (Abbas et al., 2010).

2.4. Desempeño de Morteros Adicionados con Metacaolín Frente a la Acción de Sulfatos

Resumen: El presente artículo reporta los resultados de la evaluación del desempeño de morteros adicionados con un metacaolín (MK) de origen colombiano, al ser sometidos a la acción de sulfatos. Se elaboraron morteros de cemento adicionados con MK en proporciones de 0, 10, 20, 35 y 50% con respecto a la cantidad de cemento. El cemento utilizado contenía 11% de aluminato tricálcico. Después del tiempo de curado inicial, los especímenes fueron colocados en una solución de sulfato de sodio al 5% por un periodo de 280 días. El ataque de los sulfatos fue evaluado midiendo la expansión de los morteros, la pérdida de resistencia y mediante observación visual. Adicionalmente se realizó un estudio en pastas de cemento con y sin adición de MK por medio de la técnica de difracción de rayos X, con el fin de determinar los productos formados debido al ataque de sulfatos. El estudio mostró que la resistencia del cemento con contenidos altos de AC3 es superior en presencia de MK y que este efecto es más notorio al incrementar la proporción de MK en el mortero. Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se recomienda la incorporación de porcentajes superiores al 20% MK para obtener buena resistencia a sulfatos (Torres Agredo et al., 2008).

3. Marco Teórico

3.1. Mortero

En el sentido general de la palabra, el mortero puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento Pórtland y/o otros cementantes), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto y es ampliamente utilizado para pegar piezas de mampostería en la construcción de muros, o para recubrirlos, en cuyo caso se le conoce como pañete, repello o revoque (Sánchez de Guzmán, 2001).

3.1.1. Tipos de mortero

Atendiendo a su endurecimiento se pueden distinguir dos tipos de morteros: Los aéreos que son aquellos que endurecen al aire al perder agua por secado y fraguan lentamente por un proceso de carbonatación, y los hidráulicos o acuáticos que endurecen bajo el agua, debido a que su composición les permite desarrollar resistencias iniciales relativamente altas.

Teniendo en cuenta los materiales que los constituyen, pueden ser: (Gutiérrez de López, 2003).

3.1.1.1. Morteros calcáreos. En los que interviene la cal como aglomerante, se distinguen, según el origen de ésta en aéreos e hidráulicos. Las cales aéreas más conocidas son la cal blanca y la cal gris (dolomítica); en los morteros aéreos la arena tiene como objetivo principal evitar el agrietamiento por las contracciones del mortero al ir perdiendo el agua de amasado. Se recomienda que la arena sea de partículas angulares y que esté libre de materia orgánica. La proporción de cal-arena más usada para revoque es de 1:2 y para mampostería simple de 1:3 o de 1:4. Si la proporción aumenta el mortero pierde ductilidad y trabajabilidad.

En Colombia sólo se utiliza este mortero en trabajos de embellecimiento de interiores que requieran esquinas perfectas (Gutiérrez de López, 2003).

3.1.1.2. Morteros de yeso. Se preparan con yeso hidratado y con agua. El contenido de agua es variable según el grado de cocción, calidad y finura de molido del yeso. En obras corrientes se agrega el 50%, para estucos el 60% y para moldes el 70%. El mortero se prepara a medida que se necesita, pues comienza a fraguar a los cinco minutos y termina más o menos en un cuarto de hora (Gutiérrez de López, 2003).

3.1.1.3. Morteros de cal y cemento. Son aconsejables cuando se busca gran trabajabilidad, buena retención de agua y alta resistencia (superior a la de los morteros de cal; en estos morteros se sustituye parte del cemento por cal, razón por la cual se les conoce también como Morteros de Cemento Rebajado). Las relaciones de mezcla más usadas varían entre 1:2:6 y 1:2:10 de cemento, cal y arena y el agua necesaria varía de acuerdo a la composición del mortero y a la consistencia deseada. Si el contenido de cemento es alto, el mortero será de alta resistencia y de poco tiempo entre amasado y colocación, será más o menos trabajable y tiene una contracción del 3% si el mortero es seco; en cambio si el contenido de cal es alto tendrá menor resistencia, será mayor el tiempo entre amasado y colocación, será más plástico y permeable, pero tendrá mayor retracción. Si el contenido de arena es alto, la resistencia disminuirá y será poco trabajable, pero tendrá poca retracción. Por lo anterior debe buscarse una combinación adecuada a las condiciones de obra (Gutiérrez de López, 2003).

3.1.1.4. Mortero de cemento. Son los más empleados en Colombia, se componen de arena y cemento Pórtland. Este mortero tiene altas resistencias y sus condiciones de trabajabilidad son variables de acuerdo a la proporción de cemento y arena

usados. Es hidráulico y debe prepararse teniendo en cuenta que haya el menor tiempo posible entre el amasado y la colocación; se acostumbra mezclarlo en obra, revolviendo primero el cemento y la arena y después adicionando el agua. En el mortero de cemento al igual que en el hormigón, las características de la arena, tales como la granulometría, módulo de finura, forma y textura de las partículas, así como el contenido de materia orgánica, juegan un papel decisivo en su calidad. En algunos casos se emplean arenas con ligeros contenidos de limo o arcilla, para darle mayor trabajabilidad al mortero, sin embargo, los morteros fabricados con este tipo de arena no son muy resistentes. Si el mortero tiene muy poco cemento la mezcla se hace áspera y poco trabajable ya que las partículas de arena se rozan entre sí, pues no existe suficiente pasta de cemento que actúe como lubricante. Por otro lado, si el mortero es muy rico, es decir, con alto contenido de cemento, es muy resistente pero con alta retracción en el secado, o sea muy susceptible de agrietarse; estos morteros muy ricos sólo se usan en obras de ingeniería que exijan altas resistencias, tales como muros de contención o cimientos (Gutiérrez de López, 2003).

3.1.2. Usos del mortero

Los morteros pueden tener una función estructural, y pueden usarse entonces en la construcción de elementos estructurales, o en la mampostería estructural en donde puede ser de pega o de relleno en las celdas de los muros. Existen otros morteros que no tienen función estructural y se destinan a recubrimiento como pañetes, repellos o revoques (Gutiérrez de López, 2003).

3.1.2.1. Mortero de pega. Debe tener cualidades especiales, diferentes a los morteros usados para otros fines porque está sometido a las condiciones especiales del sistema constructivo, y una resistencia adecuada ya que debe absorber esfuerzos de tensión

y compresión (Gutiérrez de López, 2003).

3.1.2.2. Mortero de relleno. Se utilizan para llenar las celdas de los elementos en la mampostería estructural, y al igual que el mortero de pega debe tener una adecuada resistencia (Gutiérrez de López, 2003).

3.1.2.3. Mortero de recubrimiento. Ya que su función no es estructural sino de embellecimiento, o la de proporcionar una superficie uniforme para aplicar la pintura, no requieren una resistencia determinada; la plasticidad juega en ellos un papel muy importante (Gutiérrez de López, 2003).

3.1.3. Propiedades de los morteros en estado plástico

3.1.3.1. Manejabilidad. Es una medida de la facilidad de manipulación de la mezcla, es decir, de la facilidad para dejarse manejar. La manejabilidad está relacionada con la consistencia de la mezcla en cuanto a blanda o seca, tal que como se encuentra en estado plástico; depende de la proporción de arena y cemento y de la forma, textura y módulo de finura de la arena. Para medir la manejabilidad del mortero se usa el ensayo de fluidez descrito en la Norma NTC No. 111, aunque en la práctica, hasta ahora, se ha definido por la apreciación del albañil (Gutiérrez de López, 2003).

3.1.3.2. Retención de agua. Esta propiedad es una medida de la habilidad del mortero para mantener su plasticidad cuando quede en contacto con una superficie absorbente, como una pieza de mampostería. La retención de agua puede ser mejorada mediante la adición de cal, dada su capacidad plastificante, aunque no necesariamente, ya que hoy en día se tienen otras alternativas igualmente satisfactorias como son: mayores contenidos de finos, la adición de aditivos plastificantes y agentes incorporadores de aire o simplemente utilizando cementos puzolánicos o cementos de adición, con carga inerte que

cada día cobran mayor importancia y son muy comunes en Colombia. La retención de agua incide altamente en la velocidad de endurecimiento y en la resistencia final a la compresión, ya que, por ejemplo, una mezcla incapaz de retener el agua no permite la hidratación del cemento (Sánchez de Guzmán, 2001).

3.1.3.3. Velocidad de endurecimiento. Los tiempos de fraguado inicial y final de la mezcla deben estar entre límites adecuados. Por lo general, se aceptan valores entre 2 y 24 horas, respectivamente. Sin embargo, éstos dependen de diversos factores tales como las condiciones del clima o la composición de la mezcla y hoy en día son fácilmente controlables con el uso de aditivos (Sánchez de Guzmán, 2001).

3.1.4. *Propiedades de los morteros en estado endurecido*

3.1.4.1. Retracción. La retracción se debe principalmente a reacciones químicas de hidratación de la pasta, sobre todo en pastas puras con una alta relación agua-cemento. La arena soluciona el problema en parte, especialmente si es de textura rugosa, ya que forma un esqueleto que evita los cambios de volumen y el peligro de agrietamiento. En zonas calurosas y de muchos vientos, el agua de mezclado tiende a evaporarse produciendo tensiones internas en el mortero, que se expresan en la formación de visibles grietas. Lo mismo ocurre si la base es muy absorbente. Aparentemente la retracción es proporcional al espesor de la capa de mortero y a la riqueza del cemento. Para evitar la retracción es conveniente usar cementos de baja retracción al secado (puzolánicos o con adición inerte) y arenas de buena granulometría con pocos finos (Sánchez de Guzmán, 2001).

3.1.4.2. Adherencia. La adherencia es la capacidad que tiene el mortero de absorber tensiones normales y tangenciales a la superficie que une el mortero con la estructura. Es de gran importancia, ya que a ella se debe el hecho de que el mortero pueda

resistir pandeo, cargas transversales y excéntricas, dándole resistencia la estructura. Morteros de baja capacidad de retención de agua y morteros de alta resistencia se adhieren sólo en partes por lo que su adherencia es pobre. En el caso de la mampostería, para obtener una buena adherencia es necesario que la superficie del bloque sea tan rugosa como sea posible para permitir la unión mecánica del mortero y además debe tener un nivel de absorción adecuado y compatible con la mezcla el mortero. Los morteros plásticos, de buena adherencia, buena capacidad de retención de agua y que no requieran de superficies húmedas para su colocación, son los más adaptables y de mayor utilización en mampostería ya que permiten una íntima unión entre las piezas (Sánchez de Guzmán, 2001).

3.1.4.3. Resistencia. Si el mortero es utilizado como pega, debe proporcionar una unión resistente. Si el mortero va a ser utilizado para soportar cargas altas y sucesos, tal es el caso de la mampostería estructural, debe poseer una alta resistencia a la compresión. Para diseñar morteros de alta resistencia se debe tener en cuenta que, para un mismo cemento y un mismo tipo de agregado fino, el mortero más resistente y más impermeable será aquel que contenga mayor contenido de cemento para un volumen dado de mortero; y que para un mismo contenido de cemento en un volumen determinado de mortero el más resistente y probablemente el más impermeable será aquel mortero que presente mayor densidad, o sea aquel que en la unidad de volumen contenga el mayor porcentaje de materiales sólidos. El tamaño de los granos de la arena juega un papel importante en la resistencia del mortero; un mortero hecho con arena fina será menos denso que un mortero hecho con arena gruesa para un mismo contenido de cemento. Por último, el contenido de agua del mortero tiene influencia sobre su resistencia; los morteros secos dan mayor resistencia que los morteros húmedos, porque pueden ser más densamente compactados (Gutiérrez de López, 2003).

3.1.4.4. Durabilidad. Al igual que en el concreto, la durabilidad del mortero es la resistencia a los agentes externos tales como las bajas temperaturas, la penetración del agua, desgaste por abrasión, retracción al secado, eflorescencias, agentes corrosivos, o choques térmicos, entre otros, sin deterioro de sus condiciones físico-químicas con el tiempo. En general, se cree que morteros de alta resistencia a la compresión tienen buena durabilidad; sin embargo, el uso de agentes inclusores de airees de particular importancia en ambientes húmedos, ambientes marinos y en general en condiciones de ambientes agresivos (Sánchez de Guzmán, 2001).

3.1.4.5. Apariencia. Un aspecto generalmente olvidado del concreto que cobra mayor importancia en el mortero es su apariencia, especialmente en mampostería de ladrillo a la vista. En este caso, la plasticidad de la mezcla, la selección y la dosificación adecuada de sus componentes, son de vital importancia en la colocación y el acabado de las superficies. El color y la textura pueden mejorarse con colorantes inorgánicos o con aditivos especiales (Sánchez de Guzmán, 2001).

3.2. Material Puzolánico

Es un material silíceo o silíceo y aluminoso finamente dividido que no reaccionará químicamente con el agua, pero reaccionará con el hidróxido de calcio y el agua a temperaturas normales para formar compuestos que poseen propiedades cementosas (ASTM International, 2020b).

En la naturaleza, las puzolanas son en su mayor parte materiales de origen volcánico y, en menor escala, de origen biológico tal como las tierras de diatomeas. En la mayor parte de los casos estos materiales consisten en una masa amorfa, a veces vitrificada, acompañada de micro cristales de los constituyentes de origen que, en ocasiones, se encuentran alterados

o en fase de descomposición (feldespatos, piroxenos, magnetita, mica, ópalo, cuarzo, etc.) (Soria Santamaría, 1963).

3.2.1. Tipos de puzolanas

Hacer una clasificación precisa de puzolanas es difícil, puesto que, hoy día, con este término se abarcan materiales muy diversos en su origen y en su composición, tanto química como mineralógica, que tienen un comportamiento idéntico al mezclarlos con cal (o cemento) y agua. La clasificación más comúnmente aceptada se relaciona con el origen. Por tanto, una primera subdivisión es en naturales y artificiales (Soria Santamaría, 1983).

3.2.1.1. Puzolanas naturales. No requieren, en su empleo, tratamientos que creen modificaciones químicas y mineralógicas sustanciales, es decir, son activas por sí mismas (Soria Santamaría, 1983).

3.2.1.2. Puzolanas artificiales. Resultan de la transformación de materiales que, originalmente, no tenían o presentaban características puzolánicas débiles, pero que adquieren propiedades puzolánicas por un adecuado tratamiento térmico, que transforma profundamente su primitiva naturaleza (Soria Santamaría, 1983).

3.3. Metacaolín

La fuente principal de metacaolín es el caolín, éste puede estar compuesto de caolinita, haloisita o una mezcla de ambos, con pequeñas cantidades de minerales como la mica, cuarzo, feldespato, alunita, esmectita y varias formas de óxidos de hierro y titanio. La estructura cristalina de la caolinita es generalmente resistente al ataque por la mayoría de los fluidos corrosivos, por lo que la misma puede ser considerada como un polvo blanco inerte, el cual no reacciona con muchos medios en los que está presente (Bartolomé, 1997).

En condiciones ambientales normales, el caolín es bastante estable. Sin embargo, cuando se calienta a una temperatura de 650–900 C, pierde el 14% de su masa, este tratamiento térmico, o calcinación, descompone la estructura del caolín de manera que las capas de aluminio y sílice se arrugan y se desorganizan, lo que resulta en la formación de metacaolín (MK), siendo éste un material amorfo con reactividad puzolánica, adecuada para su uso en aplicaciones cementantes (Rashad, 2013).

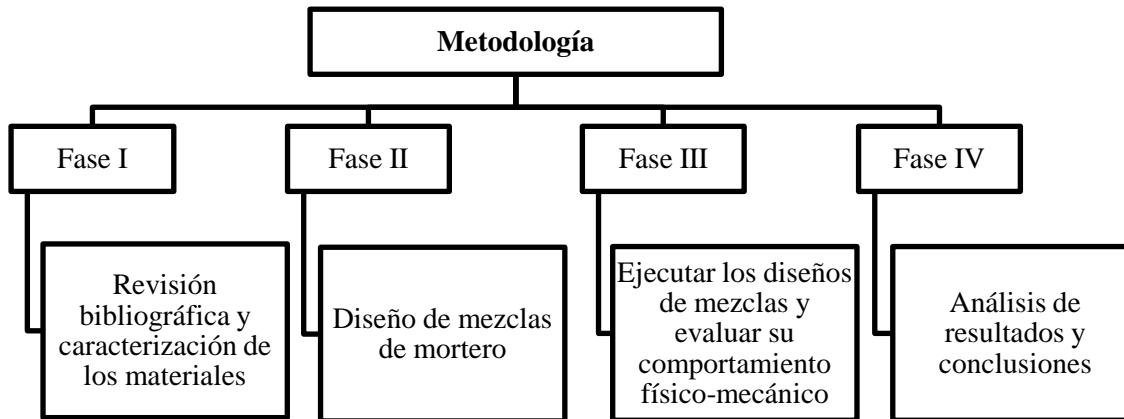
3.3.1. Efecto puzolánico del metacaolín

Fundamentalmente su aplicabilidad se ha centrado en el aprovechamiento de su composición química y reactividad para usarlo como una puzolana artificial en la producción de morteros y hormigones, ya que se reconoce su importante contribución en las resistencias mecánicas, reducción de la permeabilidad y aumento de la durabilidad. Su actividad puzolánica, especialmente a edades tempranas, es comparable o superior al humo de sílice y a las cenizas volantes, que son dos de las puzolanas más usadas en el mundo entero. La actividad puzolánica del metacaolín se evidencia cuando se obtiene un material con una serie de ventajas sobre los cementos Pórtland sin adiciones, tales como: incremento de las propiedades mecánicas especialmente a edades tempranas, incremento de la resistencia al ataque de sulfatos, incremento de la resistencia a la reacción álcali-sílice (ASR), incremento del refinamiento de poros, decrecimiento de la permeabilidad, decrecimiento de la corrosión del refuerzo, disminución en la evolución del calor de hidratación, entre otras (Restrepo Gutiérrez et al., 2006).

4. Metodología

Figura 1

Metodología de desarrollo del proyecto.



4.1. Caracterización de los Materiales

4.1.1. Agregado fino

4.1.1.1. **ASTM C40: Método de prueba estándar para la determinación de impurezas orgánicas en agregados finos para concreto (NTC 127).** Este método de prueba abarca el procedimiento para la determinación aproximada de la presencia de impurezas orgánicas nocivas en agregados finos que se utilizarán en concreto o mortero de cemento hidráulico (ASTM International, 2020c).

Figura 2

Contenido de impurezas orgánicas en el agregado fino.



4.1.1.2. ASTM C136: Método de prueba estándar para el análisis de tamiz de agregados finos y gruesos (NTC 77). Este método de prueba cubre la determinación de la distribución del tamaño de partícula de los agregados finos y gruesos por tamizado. Una muestra de agregado seco de masa conocida se separa a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente más pequeñas para la determinación de la distribución del tamaño de partícula (ASTM International, 2019b).

Tabla 1

Análisis por tamizado del agregado fino.

Tamiz N°	Peso retenido [g]	% retenido	% retenido acumulado	% pasa
4	47.5	4.8	4.8	95.3
8	76.3	7.6	12.4	87.6
16	192.9	19.3	31.7	68.3
30	372.7	37.3	68.9	31.1
50	218.3	21.8	90.8	9.2
100	59.2	5.9	96.7	3.3
Fondo	29.8	3.0	99.7	0.3
Σ	996.7	-	-	-

- Módulo de finura = 1

4.1.1.3. ASTM C128: Método de prueba estándar para densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado fino (NTC 237). Este método de prueba abarca la determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de los agregados finos. La densidad relativa (gravedad específica), una cualidad adimensional, se expresa como secado al horno (SH), saturado con superficie seca (SSS), o como densidad relativa (gravedad específica) aparente. La densidad relativa de secado al horno se determina después del secado del agregado. La densidad relativa y la absorción de superficie seca

saturada se determinan después de remojar el agregado en agua durante un tiempo indicado (ASTM International, 2015).

- Gravedad específica real = 2.65 Kg/dm^3
- Gravedad específica aparente = 2.54 Kg/dm^3
- Gravedad específica aparente S.S.S. = 2.58 Kg/dm^3
- % de absorción = 0.82%

4.1.1.4. ASTM C29: Método de prueba estándar para determinar la densidad aparente (peso unitario) y los vacíos en el agregado (NTC 92). Este método de prueba se refiere a la determinación de la densidad en masa (“peso unitario”) de un agregado compactado o en estado suelto, y el cálculo de los vacíos en agregados finos, gruesos o una mezcla de ambos, de acuerdo con la misma determinación (ASTM International, 2017b).

- Peso unitario del agregado S.S.S. compactado = 1609 Kg/m^3
- Peso unitario del agregado S.S.S. suelto = 1438 Kg/m^3
- % de vacíos = 37.73%

4.1.2. Cemento y metacaolín

4.1.2.1. ASTM C188 - Método de prueba estándar para la densidad del cemento hidráulico (NTC 221). Este método de prueba cubre la determinación de la densidad del cemento hidráulico. Su utilidad particular está relacionada con el diseño y control de mezclas de concreto. La densidad del cemento hidráulico está definida como la masa de un volumen unitario de los sólidos (ASTM International, 2017a).

- Densidad del cemento = 2.98 Kg/dm^3
- Densidad del metacaolín = 2.65 Kg/dm^3

4.1.2.2. ASTM C187 - Método de prueba estándar para la cantidad de agua requerida para la consistencia normal de la pasta de cemento hidráulica (NTC 110). Este método de prueba cubre la determinación de la consistencia normal del cemento hidráulico. Está destinado a ser utilizado para determinar la cantidad de agua requerida para preparar pastas de cemento hidráulico con consistencia normal, como se requiere para ciertas pruebas estándar (ASTM International, 2016).

- Metacaolín 0% → Humedad = 28%
- Metacaolín 20% → Humedad = 29%
- Metacaolín 25% → Humedad = 30%
- Metacaolín 30% → Humedad = 31%

4.1.2.3. ASTM C191 - Métodos de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico con aguja Vicat (NTC 118). Estos métodos de prueba determinan el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante la aguja Vicat. El tiempo inicial de fraguado de Vicat es el tiempo transcurrido entre el contacto inicial de cemento y agua y el momento en que la penetración se mide o calcula en 25 mm. El tiempo final de fraguado de Vicat es el tiempo transcurrido entre el contacto inicial de cemento y agua y el momento en que la aguja no deja una impresión circular completa en la superficie de la pasta (ASTM International, 2019c).

- Metacaolín 0% → $T_{\text{inicial}} = 176 \text{ min}$
 $T_{\text{final}} = 285 \text{ min}$
- Metacaolín 20% → $T_{\text{inicial}} = 159 \text{ min}$
 $T_{\text{final}} = 240 \text{ min}$
- Metacaolín 25% → $T_{\text{inicial}} = 151 \text{ min}$

$$T_{\text{final}} = 240 \text{ min}$$

- Metacaolín 30% $\rightarrow T_{\text{inicial}} = 144 \text{ min}$

$$T_{\text{final}} = 240 \text{ min}$$

Los resultados obtenidos en la caracterización de materiales se encuentran dentro de los valores típicos y aceptables. Para el caso de agregado fino, el color de la muestra evaluada es el más claro de la placa, el N°1 (Figura 2), por lo tanto, se infiere que el agregado sometido a ensayo no contiene compuestos orgánicos perjudiciales; por otro lado, se observa que la gradación y el módulo de finura obtenidos se encuentran dentro de los rangos admisibles descritos en la ASTM C33 (NTC 174). Y finalmente, para el caso del material cementante, éste cumple con las especificaciones descritas en la ASTM C1157 (NTC 121), por consiguiente, se concluye que los materiales evaluados son aptos para su uso en morteros o concretos.

4.2. Diseño de Mezclas de Mortero

Para una resistencia de diseño de 17.5 Mpa, y a partir de los datos obtenidos en la caracterización de los materiales, se realizaron los diseños de mezcla para cada porcentaje de reemplazo, teniendo en cuenta la metodología de diseño implementada por (Rivera López, 1992), en su libro “Concreto Simple”.

Nota: Los resultados de algunas fórmulas podrían variar un poco debido a que los cálculos fueron hechos teniendo en cuenta todos los decimales de cada valor.

- **Mortero con 0% de metacaolín**

Tabla 2

Datos obtenidos en la caracterización de los materiales.

DATOS DE LA CARACTERIZACIÓN		
Cemento	Densidad	2.98 Kg/dm ³
Metacaolín	Densidad	2.65 Kg/dm ³
	Gravedad específica aparente SSS	2.58 Kg/dm ³
Agregado fino	Absorción	0.82%
	Contenido de humedad	1.54%
	Módulo de finura	3.1
Agua	Densidad	1 Kg/dm ³

Selección de la fluidez según el uso

Tabla 3

Fluidez recomendada para morteros.

Fluidez [%]	Consistencia	Tipo de estructura (uso)
80-100	Dura (seca)	Reparaciones, recubrimiento de túneles, galerías, pantallas de cimentación, pisos
100-120	Media (plástica)	Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos
120-150	Fluida (húmeda)	Rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos

Nota: (Rivera López, 1992).

Resistencia a la compresión

Tabla 4

Resistencia a la compresión a los 28 días.

Mortero tipo	Resistencia mínima al a compresión [Mpa]
H	22.5
M	17.5
S	12.5
N	7.5

Nota: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010b).

Ajuste de la resistencia a la compresión

Tabla 5

Resistencia promedio requerida.

Resistencia especificada a la compresión [Mpa]	Resistencia promedio requerida a la compresión [Mpa]
$f'c < 21$	$f'cr = f'c + 7.0$
$21 \leq f'c \leq 35$	$f'cr = f'c + 8.3$
$f'c > 35$	$f'cr = 1.10f'c + 5.0$

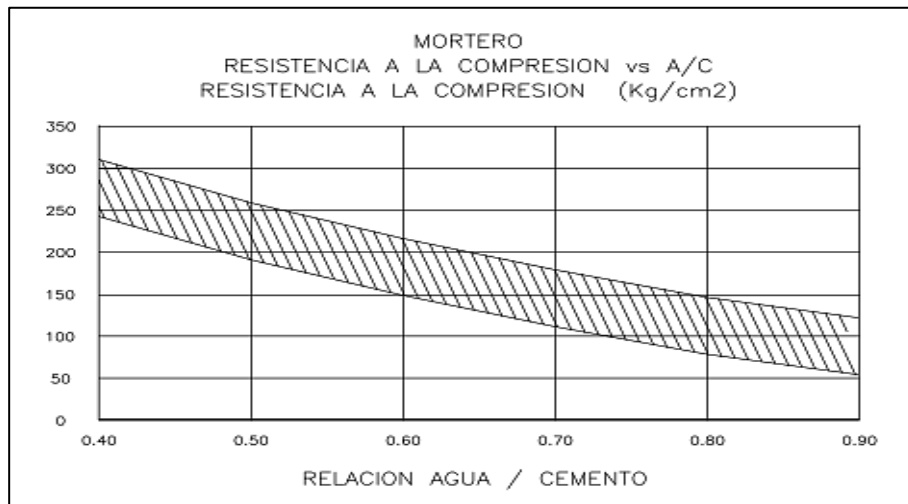
Nota: Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010a).

$$f'_{cr} = 17.5 + 7 = 24.5 \text{ Mpa} = 245 \text{ Kg/cm}^2$$

Relación agua/cemento

Figura 3

Resistencia a la compresión vs Relación agua/cemento.



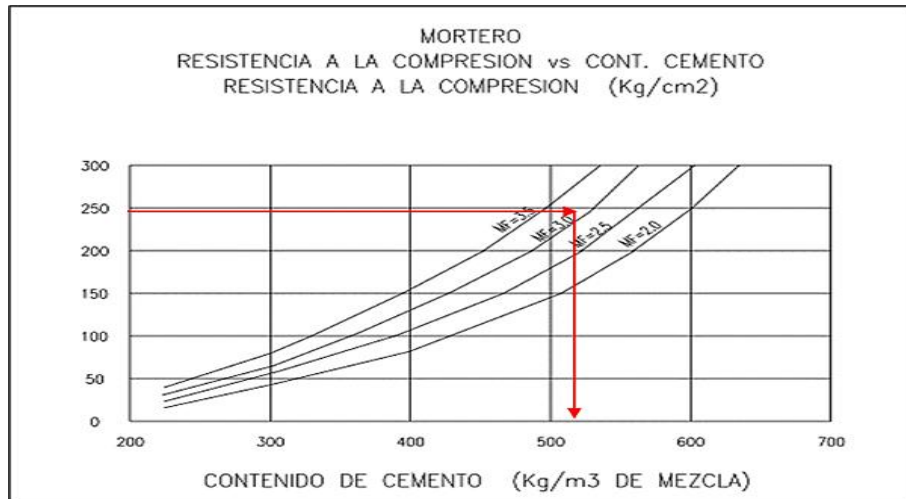
Nota: (Rivera López, 1992).

Límite inferior, para arenas finas:

$$R_c = \frac{851.12}{19.86 \frac{A}{C}} \rightarrow 245 = \frac{851.12}{19.86 \frac{A}{C}} \rightarrow \frac{A}{C} = 0.42$$

R_c: Resistencia a la compresión del mortero a los 28 días en Kg/cm²

A/C: Relación agua/cemento en masa

Contenido de cemento**Figura 4***Resistencia a la compresión VS Contenido de cemento.**Nota: (Rivera López, 1992).*

$$\text{Cantidad de cemento} = 516 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Cantidad de agua

$$A = C * \frac{A}{C} = 516 * 0.42 = 215.00 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

A: Cantidad de agua [Kg/m³]**C:** cantidad de cemento [Kg/m³]**A/C:** Relación agua/cemento**Contenido de agregado**

$$V_f = 1000 - \frac{C}{G_c} - \frac{A}{G_A} \quad P_f = V_f * G_f$$

Vf: Volumen del agregado fino [dm³]**C:** cantidad de cemento [Kg]**A:** Cantidad de agua [Kg]

GC: Densidad del cemento [Kg/dm³]

GA: Densidad del agua [Kg/dm³]

Pf : Masa seca del agregado fino [Kg]

Gf : Densidad del agregado fino [Kg/dm³]

$$V_f = 1000 - \frac{516}{2.98} - \frac{215}{1} = 611.66 \frac{\text{dm}^3}{\text{m}^3}$$

$$P_f = 611.66 * 2.58 = 1580.51 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Proporciones iniciales

$$a : c : f \quad \rightarrow \quad \frac{A}{C} : 1 : \frac{P_f}{C}$$

Tabla 6

Cantidad inicial de material para el mortero con 0% de metacaolín.

	Masa	Volumen	Proporción
Agua	215.00 Kg/m ³	215.00 dm ³ /m ³	0.42
Cemento	516.00 Kg/m ³	173.34 dm ³ /m ³	1
Agregado fino	1580.51 Kg/m ³	611.66 dm ³ /m ³	3.06
Σ	2311.51 Kg/m ³	1000 dm ³ /m ³	-

Corrección por humedad del agregado fino

$$P_{hf} = P_f * (1 + \%H_f)$$

$$\%H_{Sf} = \%H_f - \%Abs_f$$

$$A_{phf} = P_f * \%H_{Sf}$$

$$A_{efectiva} = A - A_{phf}$$

Phf : Masa húmeda del agregado fino [Kg]

Pf : Masa seca del agregado fino [Kg]

Hf : Contenido de humedad del agregado fino [%]

HSf : Humedad superficial del agregado fino [%]

Absf : Absorción del agregado fino [%]

Aphf : Aporte de humedad del agregado fino [Kg]

Aefectiva: Cantidad de agua efectiva [Kg]

A: Cantidad de agua [Kg]

$$P_{hf} = 1580.51 * (1 + 1.54\%) = 1604.90 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\%H_{Sf} = 1.54 - 0.82 = 0.73\%$$

$$Aph_f = 1580.51 * 0.73\% = 11.48 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$A_{efectiva} = 215 - 11.48 = 203.52 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Proporciones corregidas

Tabla 7

Cantidad final de material para el mortero con 0% de metacaolín.

	Masa	Volumen	Proporción
Agua	203.52 Kg/m ³	203.52 dm ³ /m ³	0.39
Cemento	516.00 Kg/m ³	173.34 dm ³ /m ³	1
Agregado fino	1604.90 Kg/m ³	621.10 dm ³ /m ³	3.11
Σ	2324.42 Kg/m ³	997.96 dm ³ /m ³	-

- **Mortero con 20% de metacaolín**

$$M = C * \%R$$

$$C_m = C - M$$

M: Cantidad de metacaolín [Kg]

C: cantidad de cemento [Kg]

R: Reemplazo del material cementante [%]

C_m: Cantidad de cemento modificada [Kg]

$$a : c : m : f \quad \rightarrow \quad \frac{A}{C_m} : 1 : \frac{M}{C_m} : \frac{P_f}{C_m}$$

Tabla 8

Cantidad de material para el mortero con 20% de metacaolín.

	Masa	Volumen	Proporción
Agua	203.52 Kg/m ³	203.52 dm ³ /m ³	0.49
Cemento	412.80 Kg/m ³	138.68 dm ³ /m ³	1
Metacaolín	103.20 Kg/m ³	34.67 dm ³ /m ³	0.25
Agregado fino	1604.90 Kg/m ³	621.10 dm ³ /m ³	3.89
Σ	2324.42 Kg/m ³	997.96 dm ³ /m ³	-

- **Mortero con 25% de metacaolín**

Tabla 9

Cantidad de material para el mortero con 25% de metacaolín.

	Masa	Volumen	Proporción
Agua	203.52 Kg/m ³	203.52 dm ³ /m ³	0.53
Cemento	387.00 Kg/m ³	130.01 dm ³ /m ³	1
Metacaolín	129.00 Kg/m ³	43.34 dm ³ /m ³	0.33
Agregado fino	1604.90 Kg/m ³	621.10 dm ³ /m ³	4.15
Σ	2324.42 Kg/m ³	997.96 dm ³ /m ³	-

- **Mortero con 30% de metacaolín**

Tabla 10

Cantidad de material para el mortero con 30% de metacaolín.

	Masa	Volumen	Proporción
Agua	203.52 Kg/m ³	203.52 dm ³ /m ³	0.56
Cemento	361.20 Kg/m ³	121.34 dm ³ /m ³	1
Metacaolín	154.80 Kg/m ³	52.00 dm ³ /m ³	0.43
Agregado fino	1604.90 Kg/m ³	621.10 dm ³ /m ³	4.44
Σ	2324.42 Kg/m ³	997.96 dm ³ /m ³	-

Nota: Cabe aclarar que las relaciones agua/material cementante y agregado/material cementante son las mismas para todos los diseños, pero las proporciones que se muestran durante todo el diseño y las correcciones del mismo, no tienen en cuenta el porcentaje de

cemento que es reemplazado por metacaolín, es por ello que éstas son diferentes para cada tratamiento.

Corrección por fluidez

Al evaluar los diseños de mezcla descritos anteriormente, se tiene que éstos no cumplen con el porcentaje de fluidez especificado, por lo tanto, se debe hacer una corrección de manera tal que cada diseño se ajuste al rango de fluidez dado.

Durante el ajuste se buscó mantener las mismas proporciones con respecto al material cementante total para todos los diseños, esto con el fin de no alterar un diseño con respecto al otro y así evidenciar claramente el cambio en las propiedades físico-mecánicas de los morteros modificados con respecto al mortero de referencia.

Sin embargo, para el mortero convencional no fue posible mantener dichas proporciones ya que al hacerlo éste superaba el porcentaje de fluidez establecido. Y aunque la relación agua/material cementante se conservó con la finalidad de no modificar la resistencia de diseño, la relación agregado/material cementante de éste sí se vio ligeramente alterada con respecto a la de los morteros modificados.

Tabla 11

Relación A/C para la cual se cumple el porcentaje de fluidez seleccionado.

	A/C'	Fluidez
Metacaolín 0%	0.58	111%
Metacaolín 20%	0.78	104%
Metacaolín 25%	0.84	103%
Metacaolín 30%	0.90	101%

$$1\text{m}^3 = V_{\text{agua}} + V_{\text{cemento}} + V_{\text{agregado}}$$

Tabla 12

Cantidad de material en función de la cantidad de cemento corregida para el mortero con 0% de metacaolín.

	Masa	Volumen	Proporción
Agua	0.58C' Kg/m ³	0.58C' dm ³ /m ³	0.58
Cemento	1.00C' Kg/m ³	0.34C' dm ³ /m ³	1
Agregado fino	3.11C' Kg/m ³	1.20C' dm ³ /m ³	3.11
∑	4.69C' Kg/m ³	2.11C' dm ³ /m ³	-

$$1\text{m}^3 = 2.11C' \rightarrow C' = \frac{1000}{2.11} = 472.90 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Tabla 13

Cantidad de material corregidas para el mortero con 0% de metacaolín.

	Masa	Volumen	Proporción
Agua	271.92 Kg/m ³	271.92 dm ³ /m ³	0.58
Cemento	472.90 Kg/m ³	158.86 dm ³ /m ³	1
Agregado fino	1470.85 Kg/m ³	569.22 dm ³ /m ³	3.11
∑	2215.66 Kg/m ³	1000 dm ³ /m ³	-

Finalmente, se ajusta el diseño de manera tal que se conserve la relación A/C definida luego de la corrección por humedad del agregado fino, ya que, como se mencionó anteriormente, de ésta depende la resistencia de diseño.

Proporciones finales

4.2.1. Mortero con 0% de metacaolín

Tabla 14

Cantidad de material para el mortero con 0% de metacaolín.

	Masa	Volumen	Proporción
Agua	271.92 Kg/m ³	271.92 dm ³ /m ³	0.39
Cemento	689.41 Kg/m ³	231.60 dm ³ /m ³	1
Agregado fino	1282.91 Kg/m ³	496.48 dm ³ /m ³	1.86
∑	2244.23 Kg/m ³	1000 dm ³ /m ³	-

4.2.2. Mortero con 20% de metacaolín

Tabla 15

Cantidad de material para el mortero con 20% de metacaolín.

	Masa	Volumen	Proporción
Agua	289.46 Kg/m ³	289.46 dm ³ /m ³	0.49
Cemento	587.10 Kg/m ³	197.23 dm ³ /m ³	1
Metacaolín	146.78 Kg/m ³	49.31 dm ³ /m ³	0.25
Agregado fino	1198.98 Kg/m ³	464.01 dm ³ /m ³	2.04
Σ	2222.32 Kg/m ³	1000 dm ³ /m ³	-

4.2.3. Mortero con 25% de metacaolín

Tabla 16

Cantidad de material para el mortero con 25% de metacaolín.

	Masa	Volumen	Proporción
Agua	289.39 Kg/m ³	289.39 dm ³ /m ³	0.53
Cemento	550.28 Kg/m ³	184.86 dm ³ /m ³	1
Metacaolín	183.43 Kg/m ³	61.62 dm ³ /m ³	0.33
Agregado fino	1199.29 Kg/m ³	464.13 dm ³ /m ³	2.18
Σ	2222.40 Kg/m ³	1000 dm ³ /m ³	-

4.2.4. Mortero con 30% de metacaolín

Tabla 17

Cantidad de material para el mortero con 30% de metacaolín.

	Masa	Volumen	Proporción
Agua	289.46 Kg/m ³	289.46 dm ³ /m ³	0.56
Cemento	513.71 Kg/m ³	172.58 dm ³ /m ³	1
Metacaolín	220.16 Kg/m ³	73.96 dm ³ /m ³	0.43
Agregado fino	1198.98 Kg/m ³	464.01 dm ³ /m ³	2.33
Σ	2222.32 Kg/m ³	1000 dm ³ /m ³	-

4.3. Tamaño de muestra

En la presente investigación se determinó el número de muestras a evaluar utilizando la metodología para la estimación de la media muestral, debido a que, de dichas muestras se espera obtener la resistencia a la compresión y expansión promedio de cada tratamiento.

4.3.1. *Tamaño muestral para la estimación de una media*

Para el cálculo del tamaño muestral es necesario fijar de antemano unos parámetros que dependen del tipo de estudio. En el caso de la estimación de una media, estos parámetros son: la desviación típica de la respuesta (σ), el nivel de confianza ($1-\alpha$) y la semi-amplitud (E) del intervalo. En esta fórmula, el nivel de confianza ($1-\alpha$) y la semi-amplitud (E) del intervalo son dos parámetros que escoge el investigador (Cortés Martínez et al., 2014).

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} * \sigma}{E} \right)^2$$

Donde $Z_{\alpha/2}$ es el cuantil de la distribución normal estándar correspondiente al nivel de confianza asignado.

4.3.2. *Teorema del límite central*

Dada una población con cualquier distribución (uniforme, asimétrica o cualquier otra), la distribución de las medias muestrales puede aproximarse mediante una distribución normal cuando las muestras son lo suficientemente grandes con $n > 30$ (Triola, 2018).

4.3.3. *Cálculo del tamaño muestral*

Puesto que, no se conoce el valor de la desviación estándar, se expresa el error máximo como un múltiplo de la misma, de esta manera el valor real de σ no es necesario para el cálculo del tamaño de la muestra (Johnson & Kubly, 2012).

En este caso se tomó el error máximo de estimación como 5/14 de la desviación estándar, debido a que, con dicho valor se alcanza un tamaño muestral superior a 30,

tendiendo así la media muestral a la normalidad, como se expresa en el teorema del límite central. El nivel de confianza asignado para esta investigación es del 95%, a partir del cual se obtiene $Z_{\alpha/2} = 1.96$.

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} * \sigma}{E} \right)^2 = \left(\frac{1.96 * \sigma}{\frac{5\sigma}{14}} \right)^2$$
$$n = \left(\frac{1.96 * 14}{5} \right)^2 = 30.12 \sim 31$$

En cada tratamiento se requiere una muestra de 31 especímenes.

4.3.3.1. Tamaño muestral ajustado a posibles pérdidas. Teniendo en cuenta que, en todos los estudios es preciso estimar las posibles pérdidas de especímenes por razones diversas (pérdida de información, abandono, no respuesta, etc.), se debe incrementar el tamaño muestral respecto a dichas pérdidas (Pita Fernández, 1996).

$$n_c = n * \frac{1}{1 - R}$$

Donde:

n: Número de especímenes sin pérdidas

R: Proporción esperada de pérdidas [%]

Asumiendo una proporción esperada de pérdidas del 10%, se obtiene:

$$n_c = 31 * \frac{1}{1 - 0.10} = 34.44 \sim 35$$

Se requieren entonces, 35 especímenes por cada tratamiento.

Nota: Para el ensayo de expansión de barras de mortero sólo se evaluaron 20 especímenes por cada porcentaje de reemplazo, esto debido a dificultades para la obtención del material.

5. Resultados

Al evaluar las muestras se obtuvieron los siguientes resultados:

5.1. ASTM C109 - Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulicos (NTC 220)

Este método de prueba cubre la determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico, usando probetas cúbicas de 2 pulg. o 50 mm. Se aplica la carga a las caras de la muestra que estaban en contacto con las superficies planas verdaderas del molde. Se coloca con cuidado la muestra en la máquina de prueba debajo del centro del bloque de cojinete superior. Se aplica la tasa de carga a una tasa relativa de movimiento entre las placas superior e inferior correspondiente a una carga en la muestra con un rango de 200 a 400 lbs/s (900 a 1800 N/s) (ASTM International, 2020a).

Tabla 18

Resistencia a la compresión a los 28 días del mortero con 0% de metacaolín.

Fuerza [KN]	Resistencia [Mpa]	Fuerza [KN]	Resistencia [Mpa]
62.1	24.8	70.2	28.1
54.1	21.6	72.9	29.2
55.1	22.0	52.9	21.2
54.6	21.8	59.5	23.8
55.6	22.2	58.5	23.4
43.9	17.6	64.9	26.0
36.4	14.6	76.2	30.5
52.7	21.1	88.7	35.5
34.9	14.0	76.8	30.7
48.3	19.3	69.7	27.9
54.6	21.8	77.2	30.9
49.0	19.6	69.9	28.0
59.8	23.9	59.2	23.7
63.2	25.3	38.3	15.3
73.8	29.5	69.7	27.9
56.6	22.6	68.3	27.3

66.0	26.4	68.9	27.6
59.2	23.7	-	-

Tabla 19

Resistencia a la compresión a los 28 días del mortero con 20% de metacaolín.

Fuerza [KN]	Resistencia [Mpa]	Fuerza [KN]	Resistencia [Mpa]
55.3	22.1	37.2	14.9
63.4	25.4	49.8	19.9
48.8	19.5	55.8	22.3
57.5	23.0	54.1	21.6
57.8	23.1	43.5	17.4
45.7	18.3	44.2	17.7
58.0	23.2	42.8	17.1
57.0	22.8	51.3	20.5
63.4	25.4	46.2	18.5
38.0	15.2	47.4	19.0
47.3	18.9	46.1	18.4
54.6	21.8	38.9	15.6
54.9	22.0	44.0	17.6
54.1	21.6	49.5	19.8
53.9	21.6	61.2	24.5
56.8	22.7	54.4	21.8
55.9	22.4	67.7	27.1
43.2	17.3	-	-

Tabla 20

Resistencia a la compresión a los 28 días del mortero con 25% de metacaolín.

Fuerza [KN]	Resistencia [Mpa]	Fuerza [KN]	Resistencia [Mpa]
38.3	15.3	36.7	14.7
33.7	13.5	37.1	14.8
36.0	14.4	34.7	13.9
46.1	18.4	33.0	13.2
36.4	14.6	38.9	15.6
40.1	16.0	42.5	17.0
38.8	15.5	35.4	14.2
42.0	16.8	37.1	14.8
44.7	17.9	40.8	16.3
34.0	13.6	33.3	13.3
33.8	13.5	36.2	14.5
39.3	15.7	43.0	17.2
37.4	15.0	43.2	17.3
36.4	14.6	36.6	14.6

40.1	16.0	30.4	12.2
25.0	10.0	30.8	12.3
37.4	15.0	34.2	13.7
35.4	14.2	-	-

Tabla 21

Resistencia a la compresión a los 28 días del mortero con 30% de metacaolín.

Fuerza [KN]	Resistencia [Mpa]	Fuerza [KN]	Resistencia [Mpa]
46.2	18.5	48.5	19.4
47.8	19.1	52.7	21.1
49.8	19.9	45.7	18.3
42.3	16.9	38.8	15.5
49.1	19.6	47.4	19.0
42.7	17.1	51.3	20.5
45.2	18.1	40.6	16.2
38.3	15.3	41.7	16.7
42.7	17.1	50.8	20.3
44.0	17.6	46.2	18.5
48.5	19.4	43.2	17.3
44.4	17.8	46.2	18.5
46.8	18.7	42.7	17.1
37.7	15.1	41.1	16.4
42.7	17.1	43.2	17.3
45.6	18.2	49.6	19.8
44.7	17.9	47.3	18.9
37.6	15.0	-	-

5.2. ASTM C1038 - Método de prueba estándar para la expansión de barras de mortero de cemento hidráulico almacenadas en agua (NTC 4927)

Este método de prueba se utiliza para determinar la cantidad de expansión de una barra de mortero cuando se almacena en agua. La cantidad de expansión de la barra de mortero puede relacionarse con la cantidad de sulfato en el cemento; la expansión puede volverse excesiva cuando el cemento contiene demasiado sulfato (ASTM International, 2019a).

Tabla 22

Expansión del mortero con 0% de metacaolín.

Longitud inicial [cm]	Longitud final [cm]	Expansión [mm]	Expansión [%]
30.068	30.068	0.000	0.000%
30.070	30.086	0.160	0.064%
30.032	30.036	0.040	0.016%
30.086	30.100	0.140	0.056%
30.128	30.140	0.120	0.048%
30.100	30.110	0.100	0.040%
30.124	30.130	0.060	0.024%
30.082	30.090	0.080	0.032%
30.032	30.042	0.100	0.040%
30.048	30.056	0.080	0.032%
30.042	30.050	0.080	0.032%
30.106	30.116	0.100	0.040%
30.040	30.060	0.200	0.080%
30.052	30.060	0.080	0.032%
30.100	30.110	0.100	0.040%
30.044	30.054	0.100	0.040%
30.100	30.104	0.040	0.016%
30.100	30.100	0.000	0.000%
30.030	30.032	0.020	0.008%
30.100	30.108	0.080	0.032%

Tabla 23

Expansión del mortero con 20% de metacaolín.

Longitud inicial [cm]	Longitud final [cm]	Expansión [mm]	Expansión [%]
30.052	30.052	0.000	0.000%
30.044	30.050	0.060	0.024%
30.110	30.112	0.020	0.008%
30.048	30.050	0.020	0.008%
30.046	30.060	0.140	0.056%
30.054	30.064	0.100	0.040%
30.046	30.052	0.060	0.024%
30.106	30.108	0.020	0.008%
30.062	30.068	0.060	0.024%
30.038	30.048	0.100	0.040%
30.100	30.110	0.100	0.040%
30.128	30.142	0.140	0.056%
30.106	30.110	0.040	0.016%
30.090	30.094	0.040	0.016%
30.032	30.040	0.080	0.032%
30.104	30.110	0.060	0.024%
30.100	30.108	0.080	0.032%
30.048	30.054	0.060	0.024%
30.104	30.114	0.100	0.040%
30.052	30.060	0.080	0.032%

Tabla 24*Expansión del mortero con 25% de metacaolín.*

Longitud inicial [cm]	Longitud final [cm]	Expansión [mm]	Expansión [%]
30.060	30.066	0.060	0.024%
30.058	30.064	0.060	0.024%
30.100	30.110	0.100	0.040%
30.106	30.110	0.040	0.016%
30.046	30.052	0.060	0.024%
30.048	30.048	0.000	0.000%
30.072	30.076	0.040	0.016%
30.066	30.072	0.060	0.024%
30.056	30.056	0.000	0.000%
30.038	30.046	0.080	0.032%
30.046	30.052	0.060	0.024%
30.036	30.040	0.040	0.016%
30.052	30.060	0.080	0.032%
30.064	30.074	0.100	0.040%
30.050	30.052	0.020	0.008%
30.120	30.122	0.020	0.008%
30.128	30.136	0.080	0.032%
30.076	30.080	0.040	0.016%
30.068	30.068	0.000	0.000%
30.100	30.106	0.060	0.024%

Tabla 25*Expansión del mortero con 30% de metacaolín.*

Longitud inicial [cm]	Longitud final [cm]	Expansión [mm]	Expansión [%]
30.080	30.092	0.120	0.048%
30.030	30.038	0.080	0.032%
30.034	30.036	0.020	0.008%
30.100	30.106	0.060	0.024%
30.036	30.040	0.040	0.016%
30.046	30.062	0.160	0.064%
30.086	30.086	0.000	0.000%
30.104	30.110	0.060	0.024%
30.104	30.104	0.000	0.000%
30.080	30.090	0.100	0.040%
30.052	30.062	0.100	0.040%
30.084	30.086	0.020	0.008%
30.110	30.112	0.020	0.008%
30.104	30.108	0.040	0.016%
30.120	30.124	0.040	0.016%
30.058	30.064	0.060	0.024%

30.074	30.076	0.020	0.008%
30.060	30.064	0.040	0.016%
30.068	30.076	0.080	0.032%
30.040	30.046	0.060	0.024%

Tabla 26

Resistencia a compresión y expansión promedio.

Metacaolín	Resistencia promedio [Mpa]	Expansión promedio [%]
0%	24.2	0.034%
20%	20.6	0.027%
25%	14.8	0.020%
30%	18.0	0.022%

6. Análisis Estadístico

A partir de la estadística descriptiva de cada conjunto de datos obtenido mediante ensayos de resistencia a la compresión y expansión de barras de mortero con diferentes porcentajes de reemplazo del material cementante, se observa el comportamiento de dichos conjuntos y las similitudes o diferencias de unos con respecto a los otros.

Para verificar la tendencia de los datos a la distribución normal se analiza la gráfica de probabilidad y la regla empírica del teorema de Chebyshev.

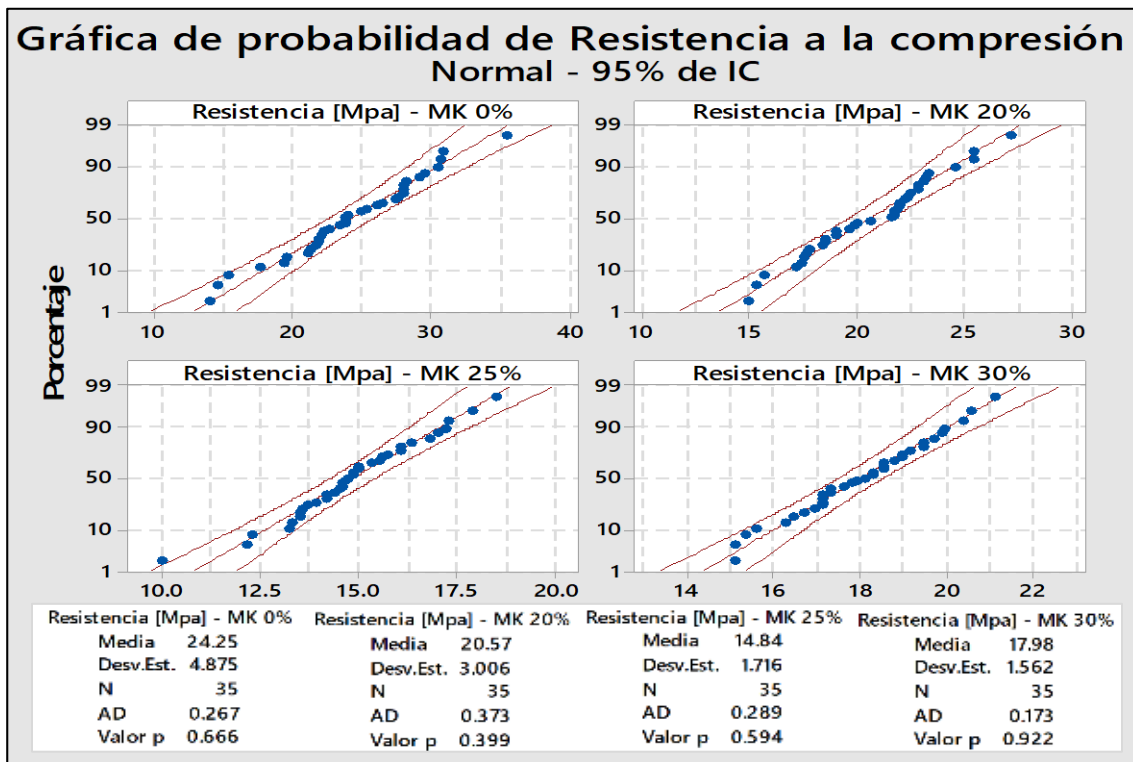
6.1. Gráfica de probabilidad

Es un método gráfico para determinar si los datos muestrales se ajustan a una distribución hipotetizada basada en un examen visual subjetivo de los datos. Para hacer una gráfica de probabilidad, primero se ordenan las observaciones de la muestra de la menor a la mayor. Después de las observaciones ordenadas se grafican contra sus frecuencias acumuladas observadas. Si la distribución hipotetizada describe adecuadamente los datos, los

puntos graficados estarán aproximadamente en una recta; si los puntos graficados se apartan significativamente de una recta, entonces el modelo hipotetizado no es el apropiado (Montgomery & Runger, 2002).

Figura 5

Gráfica de probabilidad para resistencia a la compresión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacolín.

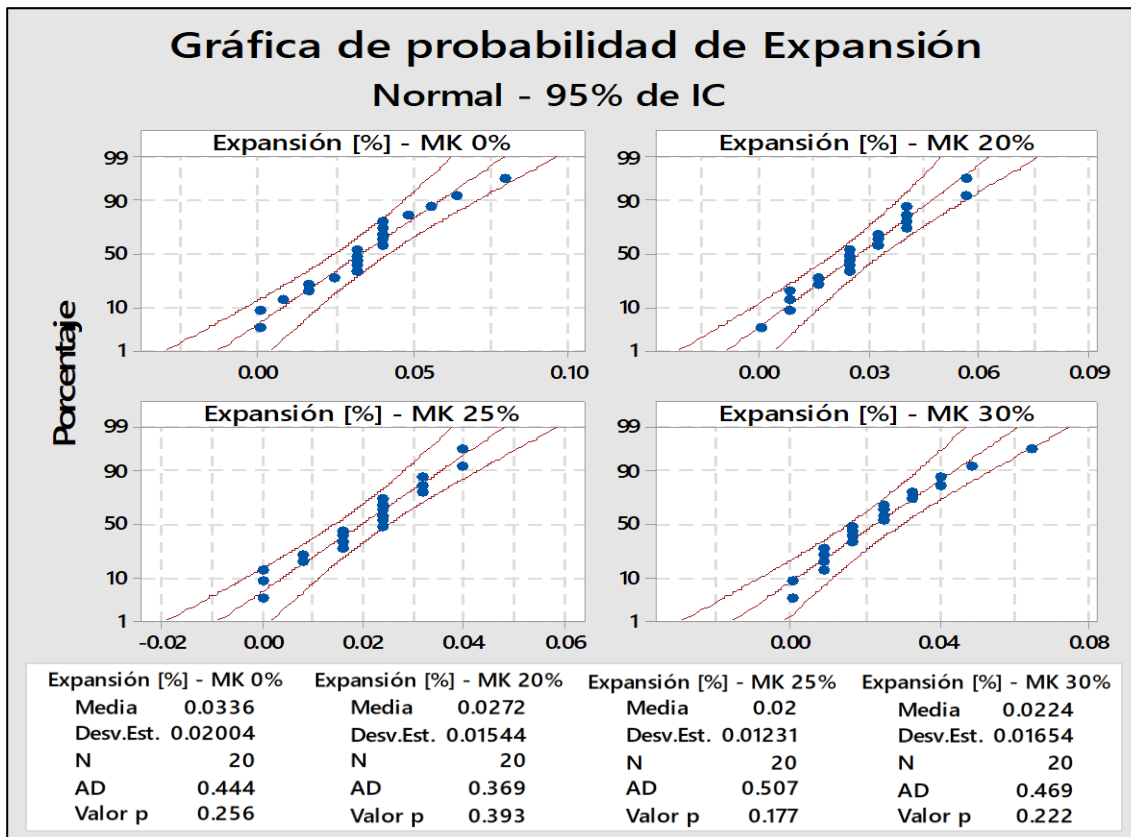


La figura 5 muestra las gráficas de probabilidad de los datos obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacolín; las cuales representan la probabilidad de que dichos datos se distribuyan normalmente. Cuando el valor P es menor o igual al nivel de significancia, que para el caso es del 5% (nivel de confianza del 95%), se dice que los datos no se distribuyen normalmente.

Se evidencia gráficamente que todos los datos se encuentran dentro de los límites de confiabilidad, y al observar que el valor P para cada porcentaje de reemplazo es mayor a 0.05, se confirma entonces que los datos obedecen a una distribución normal.

Figura 6

Gráfica de probabilidad para expansión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacolín.



La figura 6 muestra las gráficas de probabilidad de los datos obtenidos en los ensayos de expansión de barras de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacolín; las cuales, al igual que las anteriores, contienen todos sus datos dentro de los límites de confiabilidad y su valor P es mayor a 0.05, indicando entonces que dichos datos también se distribuyen normalmente.

6.2. Teorema de Chebyshev

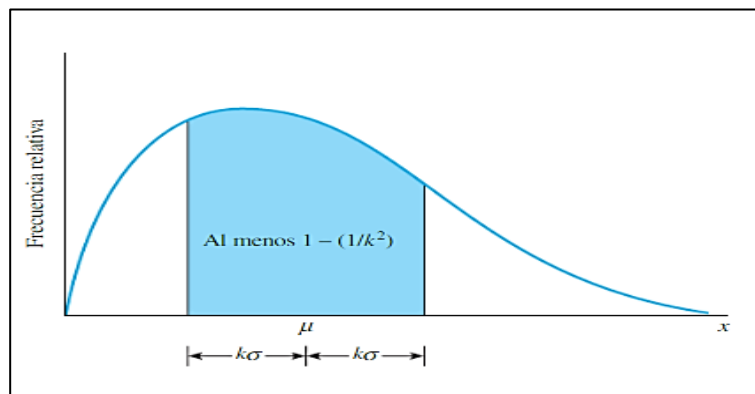
Dado un número k mayor que o igual a 1 y un conjunto de n mediciones, al menos $[1-(1/k^2)]$ de las mediciones estarán dentro de k desviaciones estándar de su media. El teorema de Chebyshev aplica a cualquier conjunto de mediciones y se usa para describir ya sea una muestra o una población. La idea comprendida en el teorema de Chebyshev se ilustra en la figura 7 (Mendenhall et al., 2015).

Al menos ninguna de las mediciones está en el intervalo $\mu - \sigma$ a $\mu + \sigma$. Al menos $3/4$ (75%) de las mediciones están en el intervalo $\mu - 2\sigma$ a $\mu + 2\sigma$. Al menos $8/9$ (89%) de las mediciones están en el intervalo $\mu - 3\sigma$ a $\mu + 3\sigma$ (Mendenhall et al., 2015).

Aun cuando el primer enunciado no es útil en absoluto, los otros dos valores de k dan valiosa información acerca de la proporción de mediciones que caen en ciertos intervalos (Mendenhall et al., 2015).

Figura 7

Representación gráfica del teorema de Chebyshev.



Nota: (Mendenhall et al., 2015).

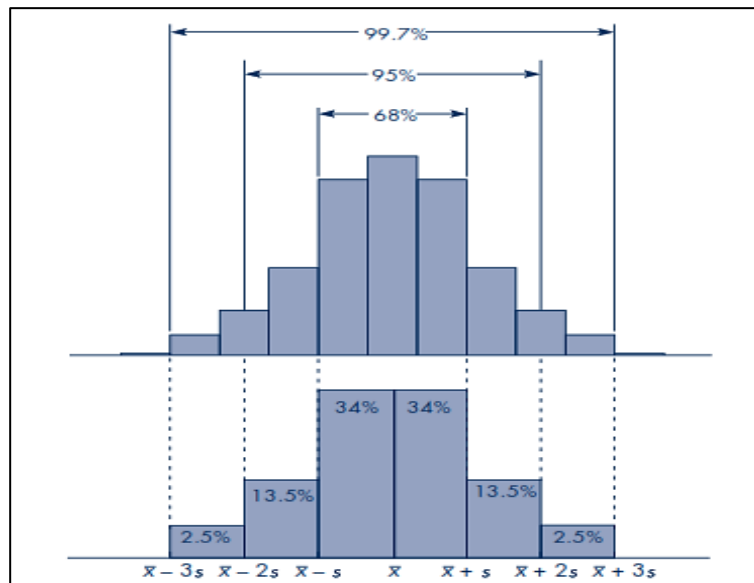
6.2.1. Regla empírica

Si una variable tiene distribución normal, entonces: 1) dentro de 1 desviación estándar de la media, habrá aproximadamente 68% de los datos; 2) dentro de 2 desviaciones estándar

de la media, habrá aproximadamente 95% de los datos; y 3) dentro de 3 desviaciones estándar de la media, habrá aproximadamente 99.7% de los datos. (Esta regla se aplica específicamente a una distribución normal [con forma de campana] (Johnson & Kuby, 2012).

Figura 8

Representación gráfica de la regla empírica del teorema de Chebyshev.



Nota: (Johnson & Kuby, 2012).

Tabla 27

Porcentaje de datos de resistencia a la compresión dentro del rango dado.

	$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$
Metacaolín 0%	69%	95%	100%
Metacaolín 20%	71%	97%	100%
Metacaolín 25%	74%	95%	100%
Metacaolín 30%	69%	100%	100%

Tabla 28

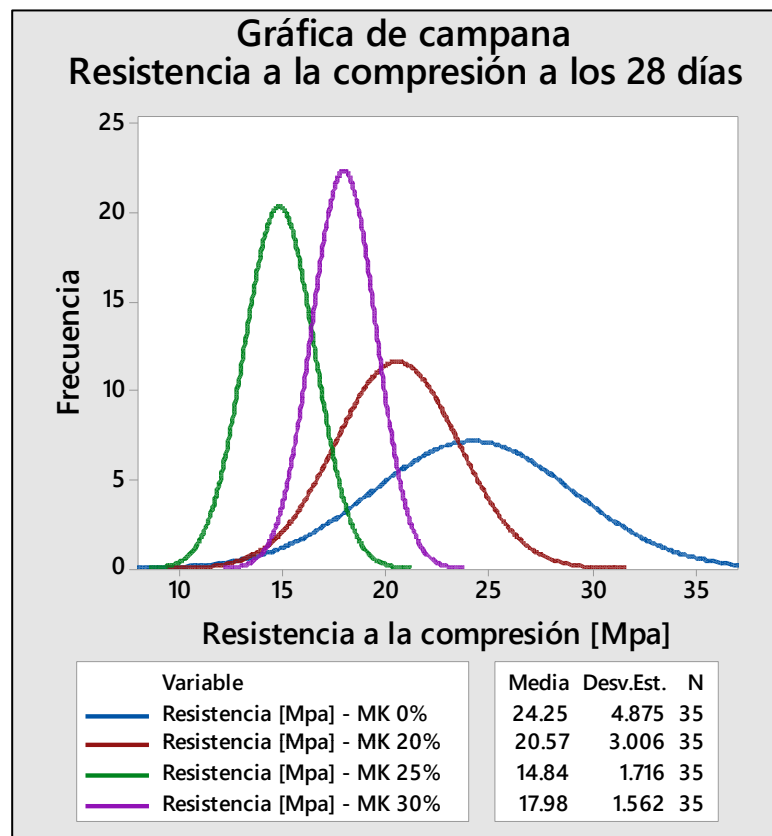
Porcentaje de datos de expansión dentro del rango dado.

Metacaolín 0%	$\mu \pm \sigma$ 70%	$\mu \pm 2\sigma$ 95%	$\mu \pm 3\sigma$ 100%
Metacaolín 20%	$\mu \pm \sigma$ 70%	$\mu \pm 2\sigma$ 100%	$\mu \pm 3\sigma$ 100%
Metacaolín 25%	$\mu \pm \sigma$ 75%	$\mu \pm 2\sigma$ 100%	$\mu \pm 3\sigma$ 100%
Metacaolín 30%	$\mu \pm \sigma$ 70%	$\mu \pm 2\sigma$ 95%	$\mu \pm 3\sigma$ 100%

Las tablas 27 y 28 muestran que los porcentajes de datos dentro de los rangos establecidos por la regla empírica del teorema de Chebyshev son mayores o iguales a los descritos en la misma, por lo tanto, se puede decir que los resultados obtenidos tanto en el ensayo de resistencia a la compresión como en el de expansión se distribuyen normalmente.

Figura 9

Gráfica de campana para resistencia a la compresión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacolin.

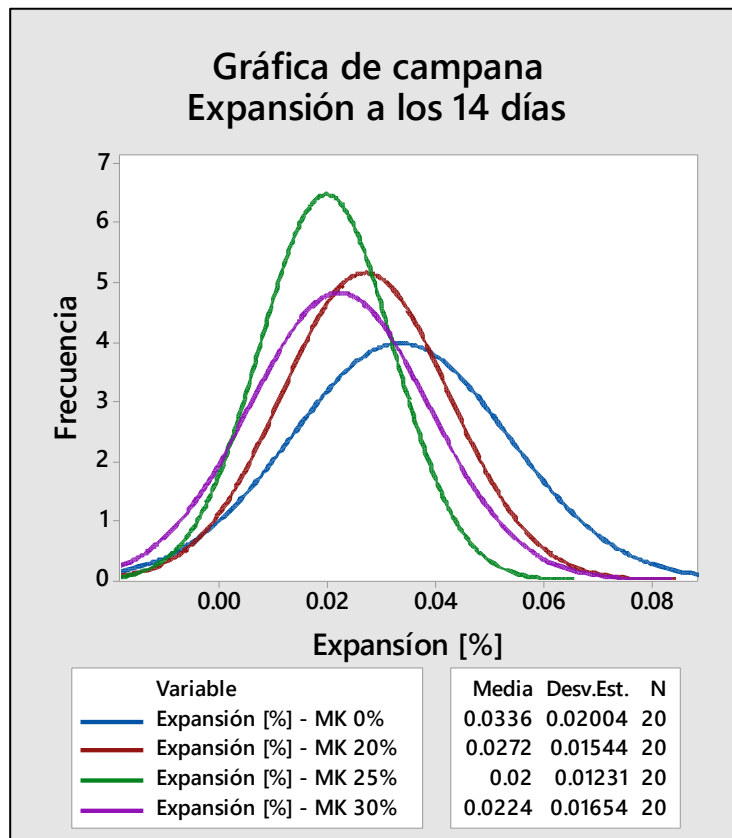


Al evaluar la figura 9 se puede visualizar una simetría en las gráficas, lo cual sugiere que los datos sí se ajustan a una distribución normal, como se mencionó anteriormente.

También se puede evidenciar una disminución en la resistencia de los morteros modificados con metacaolín con respecto al mortero de referencia.

Figura 10

Gráfica de campana para expansión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacaolín.



La figura 10, al igual que la anterior, muestra en sus gráficas una simetría que sugiere la distribución normal de los datos, reafirmando lo mencionado previamente.

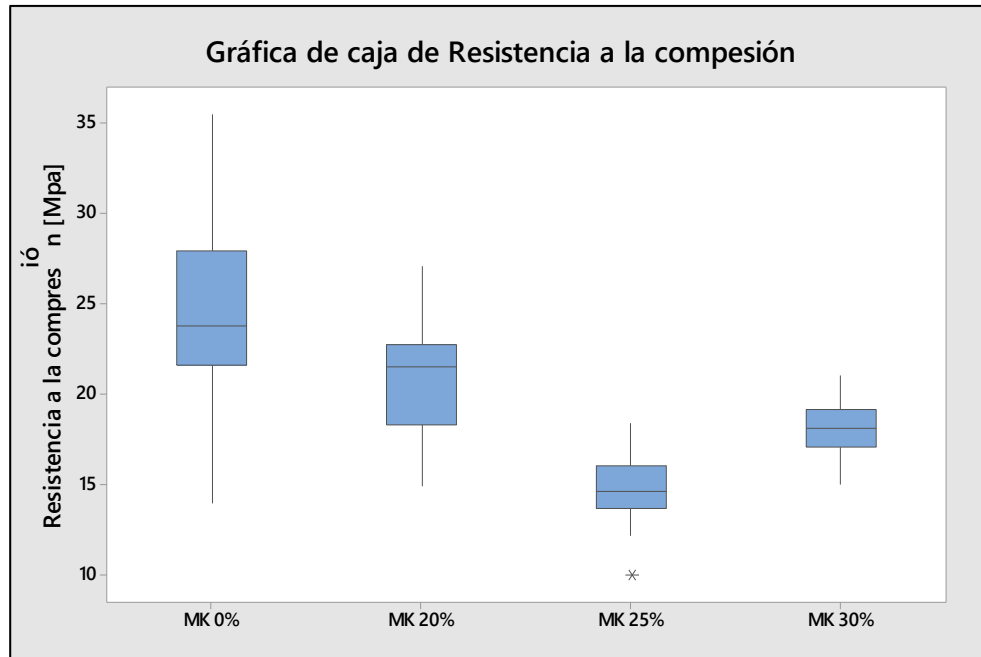
También se puede observar una disminución en la expansión de los morteros modificados con metacaolín con respecto al mortero de referencia.

6.3. Gráfica de caja

Es una representación gráfica que describe simultáneamente varias características importantes de un conjunto de datos, como el centro, la dispersión, la desviación de la simetría y la identificación de observaciones que caen inusualmente lejos del grueso de los datos. En este tipo de gráfico se representan los tres cuartiles y los datos mínimo y máximo en una caja rectangular alineada en sentido horizontal o vertical. La caja abarca el rango intercuartílico, con el borde izquierdo (o el inferior) en el primer cuartil Q1 y el borde derecho (o el superior) en el tercer cuartil Q3. Se traza una línea a través de la caja en el segundo cuartil (que es el percentil 50 o la mediana) Q2. Una línea o bigote se extiende desde cada extremo de la caja. El bigote bajo o izquierdo es una línea que va del primer cuartil al punto correspondiente al menor de los datos dentro de 1.5 rangos intercuartílicos a partir del primer cuartil. El bigote superior o derecho es una línea que va del tercer cuartil al punto correspondiente al mayor de los datos dentro de 1.5 rangos intercuartílicos a partir del tercer cuartil. Los datos que se encuentran alejados de la caja más allá de los bigotes se grafican como puntos individuales. A un punto situado después de un bigote, pero a menos de 3 rangos intercuartílicos del borde de la caja se le llama punto atípico. A un punto atípico situado a más de 3 rangos intercuartílicos del borde de la caja se le llama punto atípico extremo (Montgomery & Runger, 2002).

Figura 11

Gráfica de caja para resistencia a la compresión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacolín.

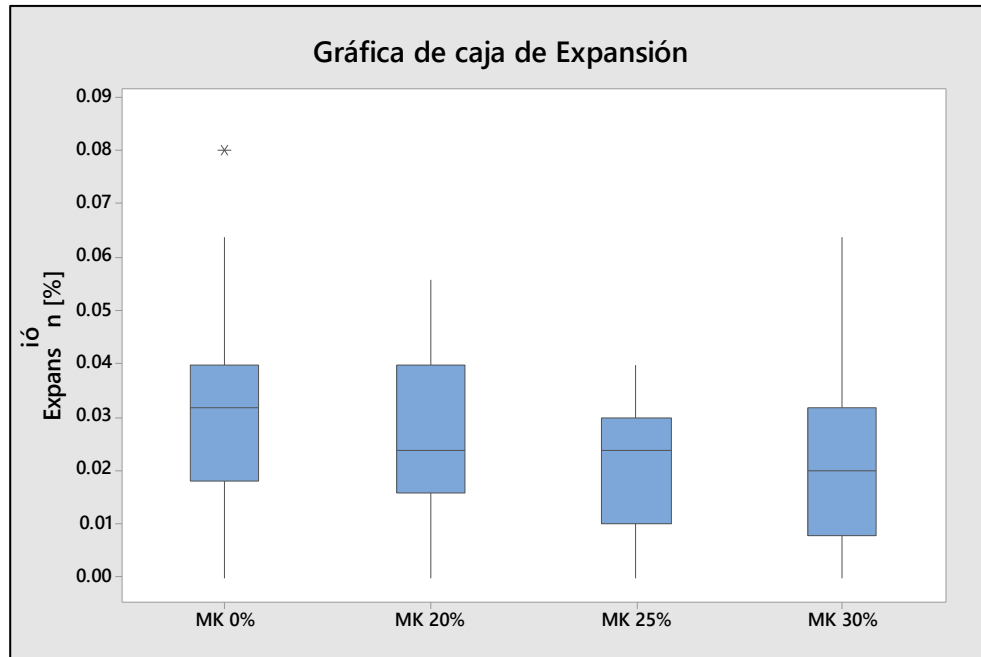


En la figura 11 se puede observar que las gráficas para morteros con 25% y 30% de metacaolín presentan una menor dispersión de los datos con respecto a los morteros con 0% y 20% de metacaolín, lo cual podría representar un mayor control en la realización de los ensayos.

Por otra parte, en el diagrama del mortero con 25% de metacaolín se observa un valor atípico, éste podría deberse a un error humano a la hora de fundir la muestra o en el momento de evaluar su resistencia a la compresión.

Figura 12

Gráfica de caja para expansión de morteros con 0%, 20%, 25% y 30% de metacaolín.



Las gráficas ilustradas en la figura 12 muestran una notable variación de los datos y en el caso del mortero de referencia se evidencia un valor atípico, esto puede ser debido al tipo de equipo de medición utilizado, el cual además de ser análogo, no posee una alta presión.

7. Conclusiones y Recomendaciones

Al evaluar la resistencia a la compresión a los 28 días de curado de los especímenes con diferentes porcentajes de reemplazo parcial del material cementante, se pudo observar que hubo una disminución de dicha resistencia en los especímenes con 20%, 25% y 30% de metacaolín con respecto al mortero de referencia.

La resistencia promedio obtenida para el mortero con 0% de reemplazo fue de 24.2Mpa, para el mortero con 20% de reemplazo fue de 20.6Mpa, en el caso del mortero con 25% de reemplazo se obtuvo 14.8Mpa y para el mortero con 30% de reemplazo fue de 18.0Mpa. Se evidencia que el mortero con 25% de reemplazo no alcanzó la resistencia mínima esperada que era de 17.5Mpa.

La resistencia promedio obtenida para el mortero con 0% de reemplazo fue de 24.2Mpa, para el mortero con 20% de reemplazo fue de 20.6Mpa, en el caso del mortero con 25% de reemplazo se obtuvo 14.8Mpa y para el mortero con 30% de reemplazo fue de 18.0Mpa. Se evidencia que el mortero con 25% de reemplazo no alcanzó la resistencia mínima esperada que era de 17.5Mpa.

Cabe destacar que, aunque el reemplazo de metacaolín por cemento no mejoró la resistencia mecánica del mortero, un gran porcentaje de las muestras evaluadas sí alcanzó la resistencia de diseño.

Del mortero con 20% de metacaolín el 82.9% de las muestras alcanzó la resistencia para la que fue diseñado; en el caso del mortero con 25% de metacaolín el 8.6%; y finalmente, para el mortero con 30% de metacaolín el 60% de dichas muestras alcanzó la resistencia de diseño.

El mortero con 25% de metacaolín no logró resultados satisfactorios en cuanto a resistencia mecánica se refiere, por lo tanto, no es recomendable su uso en estructuras que requieran alta resistencia. Pero los morteros con 20% y 30% de reemplazo obtuvieron un buen resultado a pesar de estar por debajo del mortero de referencia, por lo que, se recomienda investigar un poco más al respecto para determinar la utilidad que se le puede dar a este material y de esta manera aprovechar los beneficios que genera la utilización del mismo.

Los resultados obtenidos en el ensayo de expansión de barras de mortero arrojaron una disminución de ésta en los morteros modificados con metacaolín con respecto al mortero de referencia. Para el mortero de referencia se obtuvo una expansión promedio del 0.034%, 0.027% en el caso del mortero con 20% de metacaolín, para el mortero con 25% de metacaolín 0.020% y finalmente el mortero con 30% de metacaolín obtuvo una expansión promedio del 0.022%.

Podría concluirse entonces que el metacaolín tiene niveles de sulfatos más bajos que el cemento hidráulico convencional, lo que se traduce en expansiones menores para los morteros que contengan este material.

Sin embargo, se recomienda realizar nuevamente este ensayo con un tamaño de muestra mayor, un instrumento de medición de alta precisión y llevando un control más estricto respecto a la variación de la longitud de las barras de mortero en días intermedios entre la medición inicial y la medición final, esto debido a que se obtuvieron resultados con variación

considerable para un mismo porcentaje de reemplazo del material cementante, lo cual pone en tela de juicio la veracidad de dichos resultados.

Existen otros tipos de metacaolín, calcinados a diferentes temperaturas, con propiedades diferentes según su porcentaje de pureza, por lo que se recomienda tener en cuenta esta información para futuras investigaciones, pues esto puede ser un factor determinante en la obtención de resultados.

Referencias Bibliográficas

- Abbas, R., Abo-El-Enein, S. A., & Ezzat, E. S. (2010). Propiedades y durabilidad del cemento con adición de metacaolín: Mortero y hormigón. *Materiales de Construcción*, 60(300), 33–49. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.50609>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010a). Título C - Concreto Estructural. In *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010b). Título D - Mampostería Estructural. In *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- ASTM International. (2015). ASTM C128 - 15 Standard Test Method for Relative Gravity (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2016). ASTM C187 - 16 Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2017a). ASTM C188 - 17 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2017b). ASTM C29/C29M-17a Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2019a). ASTM C1038/C1038M-19 Standard Test Method for Expansion of Hydraulic Cement Mortar Bars Stored in Water. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2019b). ASTM C136/C136M-19 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, PA.

- ASTM International. (2019c). ASTM C191 - 19 Standard test methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2020a). ASTM C109/C109M - 20b Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2020b). ASTM C125 - 20 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2020c). ASTM C40/C40M-20 Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete. West Conshohocken, PA.
- Bailey, D., & Callery, S. (n.d.). Las causas del cambio climático. Holly Shaftel, NASA - Global Climate Change Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/causas/>
- Bartolomé, J. (1997). El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones. Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 36(1), 7–20.
- Burgos Galindo, D. M., Cardona Ramírez, L. M., Gordillo Suárez, M., & Delvasto Arjona, S. (2015). Valoración y efectos puzolánicos del material volcánico del Puracé. In Revista EIA (Issue 23). Escuela de Ingeniería de Antioquia. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372015000100008&lng=en&nrm=iso&tlng=
- Cortés Martínez, J., González Alastrué, J. A., Rufino, H., Riba, L., & Cobo Valeri, E. (2014). Tamaño muestral. Universitat Politècnica de Catalunya. <http://hdl.handle.net/2117/183174>
- Escalante García, J. I., Navarro, A., & Gómez Zamorano, L. Y. (2011). Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza. Revista

- ALCONPAT, 1(2), 149–161. <https://doi.org/10.21041/ra.v1i2.12>
- Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- Johnson, R., & Kuby, P. (2012). *Estadística Elemental* (11th ed.). Cengage Learning Editores.
- Llago Acero, R., & Calvo Herrera, I. (2009, May 20). Nuevos procedimientos. Nuevos materiales. Experiencias prácticas en España. *Diseño y Concepción de Puentes de Carretera. Estética, Eficiencia e Innovación*.
- Llano Guerrero, E. A. (2017). Síntesis y caracterización de cementos activados alcalinamente base metacaolín/escoria granulada de alto horno con adiciones de nanopartículas de TiO₂.
- Mendenhall, W., Beaver, R. J., & Beaver, B. M. (2015). *Introducción a la probabilidad y estadística*. In Cengage Learning.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2002). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería* (2nd ed.). Limusa Wiley.
- Pita Fernández, S. (1996). Determinación del tamaño muestral. *Cad Aten Primaria*, 3(138–14), 1–6. <https://www.fisterra.com/mbe/investiga/9muestras/9muestras2.asp>
- Rashad, A. M. (2013). Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition - A comprehensive overview. In *Construction and Building Materials* (Vol. 41, pp. 303–318). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>
- Restrepo Gutiérrez, J. C., Restrepo Baena, O. J., & Tobón, J. I. (2006). Efectos de la adición de metacaolín en el cemento pórtland. *Dyna*, 73(150), 131–141.
- Rivera López, G. A. (1992). *Concreto Simple*. Universidad del Cauca.

- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (5ta Ed.). Bhandar Editores.
- Soria Santamaría, F. (1963). Puzolanas y cementos puzolánicos. *Materiales de Construcción*, 13(111), 47–59. <https://doi.org/10.3989/mc.1963.v13.i111.1799>
- Soria Santamaría, F. (1983). Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción. *Materiales de Construcción*, 33(190–191), 69–84. <https://doi.org/10.3989/mc.1983.v33.i190-191.974>
- Torres Agredo, J., & Mejía de Gutiérrez, R. (2007). Influencia de la composición mineralógica de los caolines sobre el desempeño de morteros adicionados con MK. *Dyna*, 74(153), 61–67.
- Torres Agredo, J., Mejía De Gutiérrez, R., & Gutiérrez, C. (2008). Desempeño de morteros adicionados con metacaolín frente a la acción de sulfatos. *Revista Ingeniería E Investigación*, 28(1), 117–122.
- Triola, M. F. (2018). *Estadística* (12th ed.). Pearson Educación. <http://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2168/?il=7386>
- Vatopoulos, K., & Tzimas, E. (2012). Assessment of CO₂ capture technologies in cement manufacturing process. *Journal of Cleaner Production*, 32, 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.013>
- Villanueva-Solis, J., Ranfla, A., & Quintanilla Montoya, A. L. (2013). Isla de calor urbana: Modelación dinámica y evaluación de medidas de mitigación en ciudades de clima árido extremo. *Informacion Tecnologica*, 24(1), 15–24. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000100003>
- Zhao, A., Yang, J., & Yang, E. H. (2015). Self-cleaning engineered cementitious composites.

Cement and Concrete Composites, 64, 74–83.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.09.007>