

Tesis para optar al título de magister MGIP



Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Claudia Ximena Granados Muñoz

Isaura Guzmán Pérez

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual y a Distancia

Programa de Maestría en Gerencia de la Innovación en Proyectos

Sublínea de investigación: Materiales de construcción.

noviembre de 2024

Tesis para optar al título de magister MGIP

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout.

Claudia Ximena Granados Muñoz ID: 000891915

Isaura Guzmán Pérez ID: 000876095

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Magíster en Gerencia de la Innovación en Proyectos

Asesor(a)

Julián Andrés Martínez Rincón

MBA - Ingeniero Electrónico, Especialista en Gerencia de Proyectos – Especialista en Seguridad y Salud en el Trabajo

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual y a Distancia

Programa de Maestría en Gerencia de la Innovación en Proyectos

noviembre de 2024

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Dedicatoria

A mi esposo José Gabriel y mi hija Luna Ximena porque sin sus abrazos y sonrisas no habría llegado a la meta.

A mis padres Pedro León y Edilma porque ellos me ayudaron a construir los cimientos de lo que soy.

Claudia Ximena Granados Muñoz

A mi compañero de vida Daniel Camargo Solar y a mi madre Neida Pérez Berrio gracias por su compañía y apoyo incondicional y gracias por su fe en mí, a mi hija Leonor Camargo Guzmán quien es mi motor, mi mayor motivación para completar este camino.

Isaura Guzmán Pérez

Agradecimientos

A Luna Ximena Calvo Granados por la corrección de estilo y asistencia en los análisis estadísticos.

Al Ingeniero Julián Andrés Martínez por ser un asesor paciente y entusiasta.

A Sika por permitirnos sus instalaciones, materiales y conocimiento para desarrollar la investigación.

Claudia Ximena Granados Muñoz.

A Sika Colombia S.A.S. por brindarme la oportunidad de crecer académica y profesionalmente.

Mi gratitud también al Ing. Carlos García, cuyo apoyo y disposición fueron esenciales para la culminación de esta tesis.

A mi equipo, Isáí Narváez y Samuel González, aprecié profundamente su confianza en mi trabajo.

Isaura Guzmán Pérez

Contenido

| | |
|--|-----------|
| Contenido..... | 4 |
| Lista de tablas | 6 |
| Lista de figuras..... | 8 |
| Lista de apéndices | 9 |
| Resumen..... | 10 |
| Abstract | 11 |
| Introducción | 12 |
| 1. Planteamiento del problema..... | 14 |
| Objetivos de investigación | 18 |
| Objetivo general | 18 |
| Objetivos específicos..... | 18 |
| Justificación..... | 19 |
| 2. Revisión literaria..... | 22 |
| Estado del arte | 22 |
| Marco conceptual | 29 |
| Cemento..... | 30 |
| Materiales cementantes..... | 34 |
| Agua..... | 37 |
| Pasta..... | 39 |
| Agregados | 40 |
| Morteros..... | 44 |
| 3. Metodología..... | 47 |
| Enfoque y alcance de la investigación | 47 |
| Diseño de la investigación..... | 50 |
| Instrumento..... | 54 |
| Descripción de procedimientos | 56 |
| <i>Proceso de elaboración de los especímenes cúbicos de mortero.....</i> | <i>57</i> |
| <i>Variables que pueden impactar los resultados.....</i> | <i>58</i> |
| Análisis de información | 60 |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| | |
|--|------------|
| <i>Valor p</i> | 60 |
| <i>ANOVA</i> | 61 |
| Consideraciones éticas | 67 |
| 4. Hipótesis | 69 |
| Variable independiente: ceniza volante..... | 69 |
| Variables dependientes..... | 69 |
| <i>Características físico-mecánicas</i> | 69 |
| <i>Costo de producción</i> | 70 |
| <i>Impacto ambiental</i> | 70 |
| Planteamiento de hipótesis | 71 |
| Hipótesis de trabajo para la resistencia..... | 71 |
| Hipótesis nula para la resistencia..... | 71 |
| Hipótesis estadísticas | 71 |
| Hipótesis de trabajo para los costos de producción | 72 |
| Hipótesis nula para los costos de producción | 72 |
| Hipótesis de trabajo para el impacto ambiental..... | 72 |
| Hipótesis nula para el impacto ambiental..... | 72 |
| 5. Resultados | 73 |
| Características físico-mecánicas | 73 |
| <i>Análisis estadístico</i> | 77 |
| Efecto en el costo de producción..... | 82 |
| Efecto en el medio ambiente | 86 |
| 6. Discusión y recomendaciones | 92 |
| 7. Conclusiones | 96 |
| Referencias | 99 |
| Apéndices | 107 |

Lista de tablas

| | | |
|----------|---|----|
| Tabla 1 | <i>Resistencia a la compresión esperada del producto en su consistencia fluida</i> | 73 |
| Tabla 2 | <i>Resistencia a la compresión obtenida a los 3 días. Datos válidos</i> | 74 |
| Tabla 3 | <i>Resistencia a la compresión obtenida a los 7 días. Datos válidos</i> | 74 |
| Tabla 4 | <i>Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días. Datos válidos</i> | 75 |
| Tabla 5 | <i>ANOVA de la resistencia a los 3 días</i> | 77 |
| Tabla 6 | <i>Comparaciones Post-hoc a los 3 días</i> | 78 |
| Tabla 7 | <i>ANOVA de la resistencia a los 7 días</i> | 79 |
| Tabla 8 | <i>Comparaciones Post-hoc de Games-Howell a los 7 días</i> | 79 |
| Tabla 9 | <i>ANOVA de la resistencia a los 28 días</i> | 80 |
| Tabla 10 | <i>Comparaciones Post-hoc de Games-Howell a los 28 días</i> | 81 |
| Tabla 11 | <i>Nombres y precios de los morteros homólogos en el mercado</i> | 82 |
| Tabla 12 | <i>Fórmula actual de producto. Precio por componente</i> | 83 |
| Tabla 13 | <i>Fórmula del producto con reemplazo del 10% por ceniza volante. Precio por componente</i> | 84 |
| Tabla 14 | <i>Fórmula del producto con reemplazo del 18% por ceniza volante. Precio por componente</i> | 84 |
| Tabla 15 | <i>Fórmula del producto con reemplazo del 26% por ceniza volante. Precio por componente</i> | 85 |
| Tabla 16 | <i>Fórmula del producto con reemplazo del 34% por ceniza volante. Precio por componente</i> | 85 |
| Tabla 17 | <i>Factor de emisión de GEI para cada componente del mortero</i> | 87 |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Tabla 18 *Huella de carbono del mortero en su fórmula original y con cada uno de los tratamientos* 87

Tabla 19 *Consolidado de resultados para cada tratamiento*..... 90

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 <i>Clasificación de los agregados por tamaño</i> | 42 |
| Figura 2 <i>Formato de evaluación de evaluación de morteros</i> | 55 |
| Figura 3 <i>Ejemplo de Gráfico Q-Q</i> | 64 |
| Figura 4 <i>Interpretación del tamaño del efecto según el cálculo</i> | 66 |
| Figura 5 <i>Variables, herramientas, cálculos y unidades</i> | 71 |
| Figura 6 <i>Comparación entre las resistencias a la compresión de cada tratamiento con la resistencia esperada del mortero de referencia</i> | 76 |
| Figura 7 <i>Porcentaje de reducción de emisión de GEI por tratamiento</i> | 88 |
| Figura 8 <i>Porcentajes de reemplazo por tratamiento</i> | 89 |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Lista de apéndices

| | |
|--|-----|
| Apéndice A. Formatos de recolección de datos..... | 107 |
| Apéndice B. Análisis con JASP..... | 122 |
| Apéndice C. Certificado de calibración de la prensa de compresión | 131 |
| Apéndice D. Autorización de Sika para adelantar el trabajo de investigación..... | 135 |

Resumen

La industria de la construcción es una de las principales contaminantes de la atmósfera debido a los gases liberados en sus procesos productivos, además, es una industria que enfrenta desafíos económicos, ya que uno de sus principales productos y materiales, el cemento, tiene costos de producción altos y poco favorables. Los estudios que ahondan en esta problemática desde el punto de vista financiero son pocos, aún más escasos aquellos que abordan también el componente ambiental. El presente estudio evaluó los efectos en las propiedades físico-mecánicas, el costo de producción y el impacto ambiental del reemplazo de parte del cemento por ceniza volante tipo F en un mortero de reparación tipo Grout. Para ello se elaboraron 135 cubos de mortero, divididos en 5 grupos de 27 especímenes cada uno, correspondiendo un grupo al control y cuatro grupos experimentales con diferentes de porcentajes de reemplazo (10%, 18%, 26% y 34%) basados en la literatura. La resistencia a la compresión fue determinada en una prensa mecánica bajo los lineamientos de las normas ASTM-C109 y NTC-220. Se realizaron análisis estadísticos en JASP, así como un comparativo entre los precios del producto y sus homólogos en el mercado, y el cálculo de la huella de carbono con y sin tratamiento. Se determinó que el mejor tratamiento es el T2 (18%) ya que cumple las expectativas en los tres aspectos, manteniendo la resistencia a la compresión ofrecida por el producto, disminuyendo el costo de producción 5% y la huella de carbono 16%. Esta investigación es un inicio en el estudio de alternativas con morteros.

Palabras clave: cemento, construcción civil, desarrollo sostenible, economía de la empresa.

Abstract

The construction industry is one of the main polluters of the atmosphere due to the gases released in its production processes. It is also an industry that faces economic challenges, since one of its main products and materials, cement, has high and unfavorable production costs. There are few studies that delve into this problem from a financial point of view, and even fewer that also address the environmental component. The present study evaluated the effects on the physical-mechanical properties, the production cost and the environmental impact of replacing part of the cement with fly ash type F in a grout-type repair mortar. For this purpose, 135 cubes of mortar were prepared, divided into 5 groups of 27 specimens each, corresponding to a control group and four experimental groups with different replacement percentages (10%, 18%, 26% and 34%) based on the literature. The compressive strength was determined in a mechanical press under the guidelines of ASTM-C109 and NTC-220. Statistical analyses were performed in JASP, as well as a comparison between the prices of the product and its counterparts in the market, and the calculation of the carbon footprint with and without treatment. It was determined that the best treatment is T2 (18%) since it meets the expectations in all three aspects, maintaining the compressive strength offered by the product, decreasing the production cost by 5% and the carbon footprint by 16%. This research is a beginning in the study of alternatives with mortars.

Keywords: cement, civil construction, sustainable development, business economics.

Introducción

Dada la importancia de la conservación del medio ambiente y de la conciencia que la humanidad ha tomado respecto a este tema, en las dos últimas décadas ha crecido el interés tecnológico de usar materiales para la construcción que contribuyan a la mitigación del impacto ambiental de esta industria, nace ahí el interés por proponer al sector industrial una nueva composición para el mortero de reparación tipo Grout incorporando cenizas volantes.

La raíz del problema de investigación se encuentra en el uso del cemento, para el que no se ha encontrado un sustituto con iguales cualidades, como aglutinante principal del mortero junto con la elevada huella de carbono medida en emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) del mortero Grout a causa de los materiales que se usan en la fabricación, siendo los principales arena y cemento que involucran o son en sí mismos recursos naturales que se explotan a cielo abierto y tienen factores de emisión de gases efecto invernadero (GEI) altos.

El propósito general de esta investigación es analizar el impacto del remplazo del cemento por cenizas volantes tipo F en las propiedades físicas, costos de producción e impacto ambiental en un mortero de reparación tipo Grout y para ello se ha propuesto establecer el porcentaje óptimo de cenizas que cumpla con lo anteriormente expresado. El mortero tipo Grout que se analiza en este estudio es específicamente el SikaGrout-212 que se produce en la planta ubicada en Malambo, Atlántico, según las especificaciones técnicas del fabricante puede usarse en una de tres consistencias entre plástica, semifluida o fluida en función de la cantidad de agua agregada, de estas se eligió la fluida por ser la que mayores desafíos representa en cuanto a propiedades como la resistencia y consistencia de la mezcla.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

La investigación tiene enfoque cuantitativo porque se recopilan datos numéricos que corresponden a la resistencia a la compresión de cubos de mortero, diseño experimental porque se tiene un grupo control y cuatro experimentales con tratamientos diferentes representados en el porcentaje de cenizas volantes incorporadas al mortero y alcance explicativo porque se busca comprender como la incorporación de cenizas volantes influye en la resistencia del mortero de reparación tipo Grout.

Avances en este campo de estudio son relevantes para las actividades de construcción porque redundan en obras de ingeniería que proporcionen seguridad desde el punto de vista técnico, asimismo contribuyen a la rentabilidad de las empresas productoras y como punto culmen, también ayudan, a la sostenibilidad ambiental y encontrar una armonía entre estos aspectos es lo que se busca actualmente a nivel global.

Las aplicaciones del mortero tipo Grout en el campo de la ingeniería civil son diversas, entre sus características destacadas está el hecho de ser autocompactante y autonivelante, además de no presentar fisuración por contracción térmica y garantizar altas resistencias, por lo que se puede usar en actividades de especificaciones exigentes como el anclaje de maquinaria pesada para procesos industriales, anclajes de puentes, llenado de celdas de mampostería estructural entre otras, así que si se puede lograr un producto económico, técnicamente adecuado y ambientalmente amigable es innovador.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

1. Planteamiento del problema

En el mundo entero las sociedades se han desarrollado a pasos agigantados, con una población en constante aumento, como señala Naciones Unidas (2023), que estima que desde el 2010 hasta el 2022 la población mundial aumentó en 1000 millones, y calcula que para 2050 la población mundial total será de 9700 millones de personas, 1700 millones más comparado con los 8000 millones actuales. Este fenómeno lleva a una creciente demanda de infraestructura que soporte tal magnitud de personas y sus labores diarias (ONU, 2023). Infortunadamente, el desarrollo de esta infraestructura conlleva al uso de gran cantidad de recursos naturales y energéticos, así como una contaminación que impacta en gran magnitud al medioambiente, ya que el sector industrial es una de las principales fuentes de contaminación antropogénica (Campdesuñer et al., 2015, p. 4).

Dentro del sector industrial se encuentra la construcción, donde uno de los materiales más utilizados es el cemento, como componente principal de concretos y morteros. El cemento es un material producido a gran escala, que genera una serie de problemáticas relacionadas con sus costos de producción, la cantidad de energía que demanda y la contaminación resultante (Jaimes y Montaña, 2022). A nivel mundial para el año 2020 se produjeron cerca de 4,7 billones de toneladas de cemento (Global Concrete and Cement Association [GCCA], 2021), que a su vez produjeron por cada tonelada de cemento entre 0,9 y 1 tonelada de dióxido de carbono (CO_2) que se libera hacia la atmósfera, aportando aproximadamente el 8% del total de las emisiones de CO_2 en el 2020, es decir, cerca de 3500 millones de toneladas de CO_2 , esto sin tener en cuenta el consumo energético elevado al necesitar que la temperatura de los hornos donde se fabrica el cemento alcancen cerca de $1450\text{ }^\circ\text{C}$ por un tiempo prolongado, además del uso de combustibles fósiles (Gessa y Sancha, 2016; León y Guillén, 2020; Gjørsv, 2014).

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

El principal problema que genera la producción de cemento es la contaminación del aire, bien sea por la emisión de gases efecto invernadero [GEI] o por las partículas de material que se liberan en el aire como consecuencia del uso de hornos (García, 2021). Ejemplo de esto es la investigación llevada a cabo por Predicatori et al., (2009) donde al estudiar la calidad del aire en el ambiente cercano a una planta de cemento en la región, se encontró que la concentración de partículas finas y ultrafinas de residuos como el azufre, silicio, hierro y calcio era alta debido al proceso productivo de este material.

Esta contaminación produce efectos nocivos para la salud, tales como asma, enfermedades bronquiales, cardiovasculares y en casos extremos, cáncer (Becerra, 2019). Cyprowski et al., (2023) analizaron en Varsovia, Polonia, los efectos de la aspiración de distintos materiales industriales en la respuesta inflamatoria de los trabajadores, encontrando una correlación directa fuerte entre la aspiración de polvos en una planta productora de cemento y la respuesta inflamatoria de las vías respiratorias de los trabajadores de dicha planta. Incluso las plantas y cultivos se ven afectados, puesto que se han encontrado trazas importantes de azufre, silicio, potasio y cloro en la vegetación que crece cerca de los sitios de producción de cemento (Mutlu et al., 2013).

En América Latina la industria del cemento es prominente, alcanzando una producción de 174 millones de toneladas de cemento en 2021, produciendo incluso más que Norteamérica, que produjo 97 toneladas y casi alcanzando a Europa que produjo 181 (Cámara Colombiana del Cemento y del Concreto [PROCEMCO], 2021). Cedeño-Valdiviezo (2011) en México señala que la fabricación de cemento es una actividad económica altamente contaminante debido a la emisión de gases producto de su proceso industrial, además de las consecuencias que tiene para la salud de las poblaciones cercanas al punto de fábrica, señalando particularmente la

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

contaminación auditiva que se produce en este entorno, sugiriendo el uso de materiales alternativos que permitan disminuir estos impactos.

Resultados similares se han observado en otros países, tales como Cuba, donde al analizar una planta de cemento y sus alrededores se registraron niveles altos de contaminación auditiva (100dB en algunas zonas de la planta, y más de 70dB en la mayoría), así como una concentración alta ($3,83 \text{ mg/m}^3$) partículas finas y ultrafinas de residuos del proceso productivo del cemento (Godínez et al., 2022). En Perú, al entrevistar a 30 trabajadores de una fábrica de cemento que llevaban trabajando allí desde 6 hasta 30 años, se determinó que el 74% de ellos padecía constantemente dolores de garganta y de las vías respiratorias, así como inflamaciones agudas recurrentes (Alvarado et al., 2018).

Colombia no ha sido ajena a los problemas ambientales por causa de la fabricación de cemento. Según la Asociación de Productores de Cemento [ASOCEM] (2019), el país ocupó en 2013 a nivel mundial el puesto 33 entre 171 productores de cemento, codeándose con Argentina, Canadá y Reino Unido. La base de datos Gestor Comercial y de Crédito reporta que a 2022 las ventas de cemento en Colombia alcanzaron los 1.525.932.209,76 millones de pesos, un 31,77% más que en el periodo inmediatamente anterior, por lo tanto, el país enfrenta los desafíos ambientales y de salud que se observan en otras partes del mundo como consecuencia de la producción de material cementante.

Teniendo en cuenta que es una industria próspera en la nación, también se toma conciencia acerca de lo contaminante que esta resulta. De la contaminación en Colombia, particularmente la del aire, cerca de un 20% ocurre por la industria y aproximadamente 8.000 personas mueren anualmente por problemas de salud relacionados a la mala calidad del aire (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2021). Es por ello por lo que la búsqueda de alternativas para

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

disminuir estas cifras ha comenzado. La Cámara Colombiana del Cemento y del Concreto [PROCEMCO], que forma parte de la Global Cement and Concrete Association [GCCA], planteó en 2021 la Hoja de Ruta CO₂ donde reconoce los efectos nocivos de la industria y propone alternativas en cuanto a materiales y técnicas en la producción del cemento para mitigar estos efectos. Países como Chile adaptaron esta Hoja de Ruta a sus propias necesidades (Grimmeissen et al., 2020), igual que Colombia (Gobierno de Colombia, 2022)

A pesar de la cifra anterior en Colombia la industria del cemento, el yeso y la cal redujo su utilidad neta en el periodo 2014-2019 incluso con el aumento de sus ventas y sus activos, de acuerdo con la evaluación de desempeño de este sector; lo que indica que su eficiencia, eficacia y efectividad no han sido las mejores (Rivera et al., 2021). Lo anterior podría explicar la tendencia al alza del precio del cemento en los últimos años, lo que repercute de forma directa en el costo de producción del mortero tipo Grout por ser su principal componente. Ejemplo de esto es el precio al público del SikaGrout-212, que actualmente es de 192.900 pesos colombianos, el más costoso de su segmento.

Así las cosas, se vuelve necesaria la búsqueda de nuevos métodos y alternativas que reduzcan el gasto de las empresas como consecuencia del uso de cemento para permitirles mantenerse en una posición competitiva y estratégica en el mercado, ya sea a través del ajuste de precios de venta o del aumento de los márgenes de ganancia, esto a la vez que se promueven cambios en los procesos productivos industriales para minimizar los impactos ambientales y de salud negativos que generan. La meta es conseguir estos dos cambios sin que la calidad de los productos, y por consiguiente la confianza del cliente disminuyan, entendiendo esta calidad en términos de propiedades como la resistencia, durabilidad y trabajabilidad. Por lo tanto, la labor

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

principal es lograr la actualización de la industria sosteniendo los pilares que la conforman, manteniéndola vigente en las condiciones actuales.

Teniendo en cuenta lo anterior, esta investigación se pregunta ¿Qué porcentaje de cemento puede ser sustituido por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout garantizando su calidad según los requerimientos de la normatividad colombiana vigente?

Objetivos de investigación

Objetivo general

Analizar el efecto en las características físicas, económicas y ambientales que presentarían los morteros de reparación tipo Grout con el reemplazo de material cementante por cenizas volantes tipo F.

Objetivos específicos

Definir experimentalmente el efecto del reemplazo de material cementante por cenizas volantes tipo F para el uso de morteros de reparación tipo Grout.

Determinar el rango porcentual óptimo de los compuestos en la mezcla de cemento con cenizas volantes tipo F para la fabricación de morteros de reparación tipo Grout de manera que se conserven las propiedades físicas y mecánicas.

Estimar los beneficios económicos en términos de producción del efecto del reemplazo de material cementante por cenizas volantes tipo F para el uso de morteros de reparación tipo Grout.

Inferir la mitigación del impacto ambiental por la utilización de cenizas volantes tipo F en la producción de mortero de reparación tipo Grout mediante el reemplazo de un porcentaje de material cementante.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Justificación

En 2015 la Organización de las Naciones Unidas [ONU] formuló los Objetivos de Desarrollo Sostenible - ODS que pertenecen a la Agenda 2030 (2022). Las 193 naciones acogidas a la ONU se comprometieron a procurar y promover el cumplimiento de estos objetivos que responden a una serie de desafíos que se estima competen a la población mundial, involucrando una serie de temáticas ambientales, sociales, económicas y políticas.

Teniendo en cuenta lo anterior, es apenas lógico que una industria tan amplia e importante como es la construcción busque alternativas en cuanto a materias primas, materiales, procesos productivos y costos con el propósito de contribuir al desarrollo de los objetivos previamente mencionados. Yendo un paso más adelante, PROCEMCO de la mano con la GCCA creó la mencionada Hoja de Ruta CO₂ que plantea entre sus objetivos “Ampliar la recopilación, disponibilidad y el uso de combustibles y materias primas alternativas de buena calidad, incluidos los residuos de otros sectores en un concepto de economía circular” (PROCEMCO, 2021).

De modo que la presente investigación es sumamente pertinente debido a su propuesta innovadora y de conformidad con la protección del medioambiente. Este estudio propone como objetivo el análisis de los cambios en las características físicas, económicas y ambientales que presentarían los morteros de reparación tipo Grout con el reemplazo de material cementante por cenizas volantes tipo F, en pro de la formulación de estrategias y alternativas al proceso tradicional de la producción de morteros. Con este estudio se contribuye a cuatro objetivos de los contemplados en los ODS, que son: número 3 Salud y Bienestar, número 9 Industria, Innovación e Infraestructura, número 11 Ciudades y Entornos Sostenibles, y número 12 Producción y Consumo Responsables.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

La contaminación resultante de la producción de cemento provoca problemas en la salud de los trabajadores de las plantas y de las poblaciones aledañas, ya que las emisiones de CO₂ y otros GEI reducen la calidad del aire. Al disminuir el uso de cemento en los morteros es posible disminuir la producción de cemento, lo que a su vez reduce las emisiones (Razi et al., 2016; Zafar, 2022). Asimismo, la captación de cenizas volantes -un subproducto de la producción de materiales de construcción – para su utilización como material alternativo reduce los residuos que se liberan en el ambiente, promoviendo un entorno más saludable (Navaratnam et al., 2023), contribuyendo de este modo con el objetivo 3 Salud y bienestar.

Igualmente usar materiales alternativos como las cenizas volantes es una solución novedosa para la industria de la construcción, que además de permitirle contribuir a la conservación del medioambiente, puede reducir sus costos de producción, ya que la reutilización de sus residuos disminuye la demanda de materias primas y con ello es factible que los recursos disponibles se empleen en otros proyectos (Bala et al., 2024), lo que va en línea con los ODS 9, 11 y 12 ya mencionados.

Además, con la reducción de agentes contaminantes producto de la fabricación de cemento, así como el diseño de estrategias productivas alternativas, aquellos lugares que son hogar de las plantas de producción de materiales para ingeniería mejorarán sus condiciones ambientales, por ejemplo, índices de calidad del aire o de contaminación auditiva (Becerra, 2019; Campdesuñer et al., 2015), entre otros, acercándose a convertirse en una comunidad sostenible.

Finalmente, en cuanto a los ODS, al sensibilizarse de las afectaciones al ambiente y a la población generadas por la actividad productiva de las plantas y formular medidas como el uso de materiales alternativos y la captación de residuos, la industria de la construcción se responsabiliza de los efectos y resultados de sus procesos y plantea soluciones que contribuyen al

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

avance de la sociedad en cuanto a protección ambiental y desarrollo técnico e industrial (Gessa y Sancha, 2016).

Este estudio resulta conveniente porque aunque existen experimentos similares, en ellos no se ha analizado el reemplazo del cemento por cenizas volantes en morteros tipo Grout, la mayoría de ellos se han enfocado en el concreto, lo que representa una posibilidad de contribución a la comunidad científica desde la academia, en el mismo sentido contribuirá en el conocimiento existente porque se espera que los hallazgos que resulten puedan ser un punto de partida para estudios posteriores que contribuyan al sector industrial de la construcción y a la sociedad en general.

El enfoque metodológico cuantitativo experimental de este estudio permite proponer un aporte a la solución de la contaminación ambiental que afecta a toda la sociedad, porque puede ser reproducible y mejorado por otros investigadores (Hernández et al., 2014), además los resultados de este experimento podrían influir en la forma de producción de los morteros tipo Grout y otros materiales fabricados a base de cemento lo que transformaría la forma de producción en este sector industrial.

2. Revisión literaria

Estado del arte

Existe una tendencia por buscar materiales alternativos para reemplazar parcial o totalmente algunos componentes tradicionales de los morteros y concretos, esto con la intención de mejorar sus propiedades mecánicas como la resistencia o la durabilidad, además de una posible reducción de costos de producción y del impacto ambiental nocivo para el planeta y la humanidad. A continuación, se analizan estudios acerca de la incorporación de cenizas volantes en la fabricación de morteros y otros aspectos relacionados.

El interés en este tema data de hace ya unas décadas, ejemplo de esto es el estudio realizado por Xu et al., (1993) donde se analizó el efecto de las cenizas volantes en la microestructura del mortero de cemento, encontrando que los enlaces carbono-hidrógeno (CH) se adhieren a la ceniza y retrasar la reacción agua-cemento en un principio, fortaleciéndola posteriormente. Así mismo, en Taylor y Tait (1999) investigaron el efecto de las cenizas volantes en la resistencia y la dureza de un mortero de cemento, determinando que esta adición beneficia las dos propiedades mencionadas anteriormente.

Continuando por esta línea, Sukumar et al., (2008) evaluaron la resistencia a edades tempranas de concreto autocompactante con alto volumen de cenizas volantes, utilizando las de clase F como sustituto del cemento Portland en sus experimentos con el objetivo de establecer la posibilidad de retirar la formaleta de las estructuras a menor tiempo que en concretos convencionales, para ello analizaron mezclas con diferentes porcentajes en masa de cenizas volantes según su propio método de diseño de mezclas y llegaron a concluir que el uso de cenizas volantes proporciona beneficios en la resistencia a edades tempranas del concreto acompañado de otras bondades como el logro de una mayor trabajabilidad de la mezcla con menores cantidades de agua y una mayor resistencia en edades posteriores de curado,

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

características que no son posibles mediante el uso de cemento Portland tradicional, que es el equivalente al cemento tipo UG usado en Colombia.

Lo anterior se encuentra respaldado por estudios más recientes como el de Abdulhasan et al., (2018), quienes utilizaron las cenizas volantes de una fábrica de ladrillos para reemplazar un porcentaje de cemento en un mortero. Las pruebas se realizaron reemplazando el 5%, 10%, 15% y 20% del cemento. Se encontró que la resistencia a la compresión mejoró en los casos donde el reemplazo fue del 5% y 10%.

De forma similar, Moses et al., (2020) llevaron a cabo el mismo procedimiento, con unos porcentajes de reemplazo del 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 45% y 50%, hallando que la resistencia óptima se obtiene con porcentajes de reemplazo de hasta el 30%. Los autores también resaltaron que es posible que estos porcentajes varíen dependiendo de la procedencia de las cenizas volantes, lo que potencialmente explica las diferencias entre los porcentajes óptimos para cada caso. Por su parte, Mahdi-Olewi (2021) en búsqueda de una alternativa que redujera en parte los daños ambientales ocasionados por la producción de cemento decidió sustituir parte de este componente por cenizas volantes producto de la fabricación del mismo en un rango porcentual de 0% a 40%, determinando que con un 20% de cenizas volantes se consigue un aumento en la resistencia a la compresión del 13,15%, más adelante se retomará nuevamente este estudio.

En cuanto a otras propiedades del mortero, tales como la absorción y la capilaridad, Angulo y Aguilar (2021) encontraron que estas disminuyen en un 29% cuando se reemplaza el cemento por cenizas volantes en un 2% sin afectar la resistencia, aspecto positivo ya que así el material mejora su durabilidad al no ser tan vulnerable a la influencia del agua, ante lo que Yu et al., (2016) están de acuerdo, pues en un estudio realizado por ellos se añadió a un mortero de

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

cemento una serie de compuestos como fluorosilicatos, agentes expansivos, cenizas volantes, entre otros, logró reducirse la absorción hasta en un 57% y la penetración de cloruros hasta en un 38%, evitando así daños por corrosión, entre otros.

También ha sido objeto de estudio la serie de reacciones químicas que ocurren durante la mezcla de los morteros: Du et al., (2023) presentaron un trabajo en el que analizan imágenes e intensidad del color gris para determinar el nivel de reacción de las cenizas volantes cuando se mezclan con el cemento, el resultado permite conocer la cantidad de partículas que reaccionan, diferenciando las que reaccionan parcialmente y las que no reaccionan cuando en la pasta de cemento.

A mayor profundidad se encuentra la investigación de Thuy y Lam (2023) quienes se interesaron en determinar la posibilidad de una reacción álcali-agregado entre cuatro agregados diferentes según su composición mineralógica y morteros que incorporaban o no en su constitución cenizas volantes. Al usar las cenizas volantes como sustituto del cemento se concluyó que estas funcionaron como inhibidor de la reacción estudiada, la evidencia fue que, al realizar el ensayo de expansión de barras de mortero durante 14 días en hidróxido de sodio a 80°C, que es el ensayo que se realiza para tal fin, dio resultados favorables que se encuentran dentro de las especificaciones normativas.

Un resultado favorable fue obtenido también por Ramjan et al., (2021) que lograron reducir hasta en un 50% la expansión de la reacción álcali-sílice al usar como agregado fino arena de río de alta finura y al reemplazar un 20% del cemento de un mortero por cenizas volantes de distintas finuras. En el estudio se hace gran énfasis en la finura de las cenizas volantes, pues esto sugiere que las propiedades de estas tienen influencia en su desempeño como material alternativo.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Evidencia de lo anterior se encuentra en el estudio de Mironyuk et al., (2021) en el cual se modificaron cenizas volantes de carbón al darles un tratamiento ácido con el objetivo de aumentar su actividad puzolánica. Acto seguido, se comparó la resistencia de dos morteros, uno contenía cenizas volantes sin modificar y el otro contenía las cenizas volantes cuya superficie fue modificada. Se encontró que con un porcentaje de reemplazo del 5%, la ceniza volante modificada aumentó la resistencia a la compresión hasta 63.2 MPa, comparado con el 60.5MPa de la ceniza sin modificar (datos tomados a los 28 días). Así, se demuestra que la forma de las partículas de cenizas volantes influye en su desempeño.

Hsu et al., (2018) encontraron resultados coherentes con el anterior estudio, yendo un paso más allá incluso, pues su objetivo fue analizar los efectos que la finura y el porcentaje de reemplazo de la ceniza volante tienen en las propiedades del mortero. Para esto se molió ceniza volante de clase F en tres grupos distintos, con valores de finura de 4610 cm^2/g , 5690 cm^2/g y 6300 cm^2/g , utilizando con cada grupo porcentajes de reemplazo en el mortero de 0%, 10%, 15% y 20%. Los resultados mostraron mejoras notables en la resistencia a la compresión y una disminución significativa en la absorción de agua y la cantidad de poros capilares comparado con morteros de cemento tradicionales. Se encontró que el mortero con un porcentaje de reemplazo del 20% por ceniza volante con una finura de 5690 cm^2/g es aquel que presenta la resistencia a la compresión más alta y la porosidad y absorción más bajas.

Hasta ahora se observa como en algunas investigaciones el mortero de cemento es modificado no sólo con cenizas volantes sino también con otros materiales alternativos tales como bagazo de caña, escoria de alto horno, entre otros. Ahora se ahondará en este apartado.

Ebid et al., (2023) realizaron un análisis comparativo de las propiedades térmicas de los hormigones autocompactantes convencional y geopolimérico, que es aquel compuesto por un

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

material con características cementicias, apto para utilizarse en construcción y con un proceso productivo menos contaminante ((Davidovits, 1978) como se citó en (Salirrosas, 2020)). Para este objetivo se basaron en datos recopilados en investigaciones previas, determinando que las propiedades térmicas del hormigón geopolimérico son mejores que las del hormigón autocompactante convencional, este hallazgo es trascendental puesto que abre la posibilidad de tener construcciones sostenibles y ecológicas reduciendo la huella de carbono al remplazar parte del cemento Portland por cenizas volantes, escoria de alto horno o humo de sílice en la fabricación.

Poniendo a prueba esta posibilidad, Kurbetci et al., (2022) mezclaron morteros de cemento con agregado fino reciclado obtenido a través de la demolición de pavimentos de concreto y con cenizas volantes. Si bien a causa del agregado fino reciclado las propiedades como la resistencia a la compresión y a la flexión disminuyeron, y la permeabilidad, absorción y contracción aumentaron, lo cual es desfavorable, al añadir las cenizas volantes estos resultados mejoraron considerablemente, particularmente cuando el porcentaje de ceniza está entre el 20% y 40%.

Por otro lado, se halló que las cenizas volantes son un material alternativo con mejores resultados que la ceniza de bagazo de caña. Esto se demostró en Patil et al., (2021) al mezclar dos clases de mortero, uno con cenizas volantes y el otro con ceniza de bagazo de caña. En ambos casos los porcentajes de reemplazo fueron 10%, 20% y 30%. El resultado demostró que los porcentajes óptimos son 20% en caso de la ceniza volante y 10% en caso de la ceniza de bagazo de caña. Sin embargo, se observó que el primer material logra la mejor resistencia con 37.97 MPa a los 28 días, mientras que en el segundo solo llegó a 32.36 MPa en el mismo tiempo.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

En contraste, volviendo con Mahdi-Olewi (2021) comparó los desempeños de las cenizas volantes y de la escoria de alto horno, así como de los materiales juntos. Para todos casos se utilizaron porcentajes de reemplazo entre 0% y 40%, obteniendo un aumento en la resistencia a la compresión de 13,15% en el caso de las cenizas volantes, el cual fue superado por la escoria de alto horno, que consiguió un aumento de esta propiedad en el 15,5.

Consecuentemente, es congruente el resultado obtenido por Poletanovic et al., (2020) quienes estudiaron las propiedades físico-mecánicas de dos morteros que contenían cenizas volantes y habían sido activados alcalinamente, uno de ellos solamente tenía cenizas volantes y el otro además tenía escorias. Desde un inicio el segundo mortero era ligeramente menos poroso, menos absorbente y más frágil que el primero, siendo más resistente también. A estos morteros se les agregó fibra de cáñamo y se analizaron nuevamente sus propiedades, se llegó al resultado de que el efecto del cáñamo en los morteros produjo una alteración significativa en la capacidad de absorber energía de los morteros analizados, volviéndolos menos densos y resistentes, pero mejor protegidos de la fricción.

A partir de los dos resultados anteriores se estima que existen materiales alternativos que superan en algunos aspectos a las cenizas volantes, de modo que la elección entre uno u otro depende de las necesidades específicas de la construcción por realizar y otros elementos.

Una de estas cuestiones de suma importancia al momento de planear un proyecto es el presupuesto, por lo que es ideal conseguir materiales que cumplan con los estándares de calidad impuestos por las normas al menor precio posible. Con esto en mente, Zafar (2022) hizo los cálculos de cuánto costaría el mantenimiento y los arreglos de un edificio de oficinas de 50 años de antigüedad, de 7 pisos, con 18 oficinas y 2 habitaciones de descanso en cada piso, cuyos muros de concreto presentan grietas de no más de 50mm de profundidad en la mitad de los

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

mismos. Las opciones eran: mortero de cemento tradicional, mortero donde la arena de río ha sido reemplazada por residuos de cantera, mortero con cenizas volantes sin modificaciones, y mortero con cenizas volantes activadas mediante procesos alcalinos. Se estimó que las dos opciones que reducían en mayor medida los costos sin comprometer las propiedades mecánicas del mortero son el mortero con residuos de cantera y el mortero con cenizas volantes activadas mediante procesos alcalinos, con reducciones en los costos del 22.1% y 21.5% respectivamente.

Finalmente, recientes avances en las tecnologías del software han permitido la realización de modelos predictivos que estudian el comportamiento de las propiedades mecánicas de los morteros hasta aproximadamente 360 días de curado, lo cual abre la posibilidad de realizar cálculos preliminares confiables, reduciendo así la cantidad de mezclas reales de ensayo y error para encontrar la mejor mezcla, cuyos ensayos reales son indispensables.

Qadir et al., (2019) recogieron información de cerca de 1000 estudios y modelos matemáticos para encontrar correlaciones entre la cantidad de cenizas volantes, el tiempo de curado, la relación agua-cemento y las resistencias a la compresión, la tracción y la flexión. Encontraron que la presencia de cenizas volantes está directamente correlacionada con mejoras de hasta el 50% en la resistencia a la tracción, siendo mínimo el efecto en las resistencias a la compresión y a la flexión.

Contrario a esto, Abdalla y Mohammed (2022) concluyeron que la presencia de cenizas volantes (con un porcentaje de reemplazo máximo de 55%) aumenta la resistencia a la compresión del cemento, aunque no con la misma influencia que la relación agua-cemento ni el tiempo de curado, que fue el factor con más determinante. Para lograr esto fueron tomados en cuenta 450 estudios y se utilizaron 4 modelos matemáticos, de los cuales el Multi Expression Programming [MEP] fue el más preciso.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Para complementar, este mismo año Xiao et al., (2024) estudiaron el comportamiento de morteros con contenido de ceniza volante respecto a la resistencia a la tracción y la contracción, esta última relacionada con el potencial de presentar grietas o quiebres a una edad temprana. Se formularon cuatro muestras de mortero, con porcentajes de reemplazo de 0%, 10%, 20% y 30%. El resultado obtenido a través de la correlación de imagen digital determinó que para los morteros con un contenido de cenizas volantes entre el 20% y 30% el riesgo de grietas o quiebres producto de la contracción es 18% menor que en los morteros de cemento tradicionales. También se observó que la pérdida de densidad disminuye y la resistencia a la tracción aumenta.

En conclusión, existe literatura extensa acerca del uso de las cenizas volantes como material alternativo en la mezcla de morteros de cemento gracias a que son una opción de reemplazo donde disminuye el costo y el impacto ambiental asociados a la construcción sin comprometer en mayor medida la calidad y seguridad. Actualmente se ha avanzado hasta la experimentación con las características físicas de las cenizas volantes, la mezcla con otros materiales alternativos y el modelamiento de su comportamiento a través de softwares. Sin duda, es un material que ha probado su utilidad y sus beneficios.

Marco conceptual

Construir es más que una acción. Según Ferri (2010) “es la combinación de diferentes materiales o elementos con la debida técnica o habilidad para conseguir un conjunto llamado edificio, que deberá ser útil, estable, duradero y estético” (p. 17). Partiendo de esto, existen diversos materiales y distintas combinaciones de estos que se clasifican de diferentes formas según criterios como su constitución o su uso. Para mayor claridad respecto a los conocimientos que utiliza el presente trabajo, a continuación, se exponen los conceptos más importantes.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Cemento

El cemento es un material fundamental para la construcción, Sánchez de Guzmán (2001) postula que actualmente no existe ninguna obra donde se pueda prescindir del cemento, pues es el “pegante más barato y más versátil” (p. 27). Hablando en otros términos, el cemento es un material con propiedades adhesivas y cohesivas, es decir, que le permite unir, aglutinar o aglomerar fragmentos minerales (piedras, arenas, etc) los cuales se compactan en un todo que es resistente y duradero (Neville, 2013; Sánchez de Guzmán, 2001).

El proceso a través del cual este “todo” (sea mortero o concreto, conceptos abordados en un futuro) se endurece y compacta se llama fraguado. Por lo tanto, los cementos se dividen en dos clasificaciones según su fraguado (Chandías, 1992).

- Cementos hidráulicos: aquellos con la capacidad de endurecer sumergidos en el agua a partir de la reacción química que resulta de esta acción. Estos cementos se componen usualmente de silicatos y aluminatos de cal (Neville, 2013).

- Cementos aéreos: aquellos que endurecen en el aire (Chandías, 1992).

El tipo de cemento usado por excelencia se llama cemento a base de portland, aunque existen otros tipos de cemento y materiales cementantes. Este tipo de cemento se fabrica utilizando materiales calcáreos como sílices, calizas y alúminas (Neville, 2013). Actualmente los cementos se elaboran utilizando los componentes del cemento portland además de otros materiales. Para la fabricación del cemento las materias primas son mezcladas con determinada proporción y calcinadas en un horno a mínimo 1450 °C, formando unas esferas llamadas clínker que posteriormente son trituradas en un molino junto con óxido de hierro o yeso -que evita el fraguado relámpago- para formar un polvo fino, es decir, el cemento (Sánchez de Guzmán, 2001).

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Propiedades del cemento

El cemento tiene propiedades fisicoquímicas importantes para su calidad. Según Rivva (2000) estas son:

Peso específico

Es la relación existente entre el peso y el volumen de las partículas de cemento sin considerar los espacios de vacío entre ellas. No es indicador de la calidad del material, sino un parámetro para la dosificación de mezclas de mortero y concreto.

Finura

Se determina según el grado de molienda del cemento, expresándose en superficie específica, que corresponde al área superficial medida en centímetros cuadrados de las partículas de un gramo de cemento, asumiendo que son esféricas.

Es primordial ya que la finura es determinante en la velocidad de hidratación, la resistencia y el calor que se genera. Por lo tanto, es un indicador de la calidad, por lo que un mayor grado de finura permitirá que se den más reacciones de hidrólisis, formando más hidrosilicatos, hidroaluminatos y geles, lo que a su vez aumentará el gradiente de resistencia a la compresión y flexotracción.

Contenido de aire

Corresponde a la cantidad de vacíos o espacios existentes entre las partículas del material.

Fraguado

Es el paso de la pasta de cemento de estado fluido o plástico a estado sólido. La pasta ha fraguado cuando su rigidez permite soportar una presión arbitrara definida. Se divide en dos etapas: fraguado inicial y fraguado final. El ensayo de Vicat se usa para medir los tiempos de fraguado. Según este ensayo, el fraguado inicial debe ser no menor de 45 minutos, y el fraguado

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

final debe ser no mayor de 420 minutos. Si lo anterior no se cumple significa que las reacciones químicas de hidratación del cemento no ocurren como es usual, siendo muy aceleradas o demoradas según sea el caso. Una vez finaliza el fraguado, comienza el periodo de endurecimiento, donde aumentan la rigidez y resistencia.

Resistencias mecánicas

Esta propiedad define la capacidad del cemento para soportar un esfuerzo sin fallar. Es un parámetro de calidad del cemento, ya que influye directamente en la resistencia de las mezclas de morteros y concretos. Es un criterio de aceptación por su contribución desde el punto de vista estructural. Los esfuerzos a los que se someten las estructuras son compresión, flexión y tracción, de modo que en el cemento se mide la resistencia a dichos esfuerzos. La resistencia de un cemento está determinada por la composición química, la finura de sus granos, la cantidad de agua utilizada en la mezcla y el grado de hidratación de este. Como convención, se dice que el parámetro que define la resistencia del cemento es el valor de resistencia a los 28 días, pues los cambios posteriores en la resistencia son mínimos.

Calor de hidratación

Corresponde a la cantidad de calor que se desarrolla durante la hidratación del cemento a una temperatura determinada. Se expresa en calorías por gramo de cemento no hidratado. Se estima que este calor suele estar entre 85 y 100 calorías por gramo, por lo general, el calor de hidratación se disipa por radiación en periodo de tiempo corto. El calor de hidratación existe por las reacciones químicas entre el cemento y el agua durante el fraguado y endurecimiento, influenciado principalmente por la composición química y la finura del cemento.

Estabilidad de volumen

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Es la capacidad del cemento para mantener constante su volumen después del periodo de fraguado. En caso contrario, se le considera un cemento poco estable ya que se expande lenta y progresivamente, posiblemente debido a la presencia de yeso o excesos de cal libre o de magnesia, que se hidratan y expanden. Las consecuencias de esta expansión pueden llegar al agrietamiento y en casos extremos a la falla de la estructura.

Fisuración

Ocurre cuando el secado del cemento es repentino y no se garantiza un proceso de curado adecuado. Está relacionada con el tipo de cemento, su composición, la finura y la relación agua cemento. Sus efectos son peligrosos, ya que aparece rápidamente y propicia el desgarramiento de la pasta, mortero o concreto, lo que desenlaza posiblemente en la oxidación del hierro interno de la estructura, el aumento de la permeabilidad del concreto y el deterioro de la apariencia. Su efecto es menor en ambientes húmedos, y mayor en ambientes de altas temperaturas.

Tipos de cemento

Al modificar las proporciones de la mezcla de los materiales, se modifican las propiedades fisicoquímicas del cemento, para obtener distintos tipos de cemento para diferentes usos. El Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), con base en las características del cemento hidráulico que tienen influencia en las propiedades del concreto, clasifica los cementos según la Norma Técnica Colombiana NTC 121:2021 y los describe así (2021):

Cemento tipo UG

Es el cemento de uso general, usado normalmente para construcciones y no posee propiedad especial.

Cemento tipo MRS

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Se emplea en obras donde el hormigón se expone a sulfatos de forma moderada, u obras donde el calor de hidratación debe ser moderado.

Cemento tipo ART

El nivel de desarrollo de la resistencia inicial es alto, como cuando la construcción se da en un clima de temperaturas bajas (Rivva, 2000). Esto debido al aumento del silicato tricálcico, un compuesto fundamental en el proceso de fraguado, el que más contribuye a su desarrollo, así como al endurecimiento de la pasta. Otro aspecto relevante de este cemento es que su finura es mayor que la de otros tipos de cemento, puesto que la mayor superficie específica le da un área de influencia amplia al agua, lo que promueve las reacciones químicas que determinan el fraguado y demás efectos. Este es el cemento usado en esta investigación (Neville, 2013; Sánchez de Guzmán, 2001).

Cemento tipo BCH

Este cemento desarrolla un calor de hidratación bajo.

Cemento tipo MCH

Este cemento desarrolla un moderado calor de hidratación.

Cemento tipo ARS

Tiene una resistencia alta ante la influencia de los sulfatos.

Materiales cementantes

Los materiales cementantes son compuestos que se añaden a las pastas, morteros y concretos, sustituyendo una parte de cemento. Estos materiales toman el nombre de puzolanas ya que fueron descubiertos por los romanos en la ciudad de Pozzuoli (Matallana, 2019). Las puzolanas son similares al Clinker ya que se constituyen de sílice y alúmina, pero no tienen propiedades cementantes en sí mismas. Para lograr esto deben ser amorfas, finamente pulverizadas a temperaturas ordinarias y en presencia de humedad, ya que así reaccionarán con

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

el proceso de hidratación del cemento. Es sólo en este estado que será posible su combinación con el hidróxido de calcio (Matallana, 2019; Neville, 2013). Según los autores ya citados, estos materiales son:

Puzolanas naturales

Son aquellas que se encuentran en la naturaleza y se producen por procesos que ocurren en el ambiente. Las más comunes son las cenizas que tienen un origen volcánico como las pumitas, las pizarras y los pedernales opalinos, y las rocas orgánicas como la tierra diatomácea y la arcilla quemada. Según la norma ASTM C 618 (2019) el nombre que corresponde a estos materiales es Clase N.

Puzolanas artificiales

Se denominan así ya que son residuos o productos de procesos industriales. Existen varios tipos.

Escoria de alto horno

Es un subproducto de la fabricación de acero, resultado del tratamiento de los minerales de hierro en el horno. Debe enfriarse de forma inmediata con agua o aire apenas sale del horno para que el cambio brusco de temperatura granule la escoria y le dé una forma amorfa de arena suelta.

Humo de sílice

También recibe el nombre de microsílíce o microsílíce, de uso poco común en mezclas que no sean de concreto. Es un subproducto de la producción de aleaciones férricas, se constituye básicamente de hollín lo que lo hace altamente fino y dificulta su manejo. No es común en Colombia y su costo es alto, de modo que se utiliza en casos especiales donde se requiere reducir la permeabilidad y aumentar la resistencia de la construcción.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Cascarilla de arroz calcinada

Residuo proveniente del procesamiento del arroz, que al quemarse de forma controlada (entre 500°C y 700°C) resulta en una ceniza amorfa compuesta en gran parte por sílice y adquiriendo propiedades puzolánicas. Normalmente requiere la presencia de aditivos superplastificantes para su manejo ya que es un material altamente poroso.

Ceniza volante

Se produce con la combustión de carbón en sitios como las centrales de energía, aunque también se producen en las plantas de fabricación del cemento. Su uso es muy común y tiene a favor aspectos como su alta finura y su forma esférica, ideales para la manejabilidad y el consumo de agua de la mezcla. Debe cumplir con ciertos requisitos como un contenido mínimo de sílice, alúmina y óxido férrico del 50%, entre otras especificaciones (ASTM C 618, 2019). La ceniza volante se clasifica según el carbón que la generó. Nihalani et al., (2020) estiman que cerca del 66% del contenido de cemento en una mezcla puede reemplazarse por ceniza volante, mejorando su durabilidad y resistencia.

Ceniza volante Clase C

Es producto de la combustión de carbón sub-bituminoso y lignito, conformándose en gran porcentaje por cal. Tiene propiedades cementantes por sí misma, sin embargo, contiene menos compuestos que reaccionen con la cal del cemento. Su contenido de carbono suele ser bajo y es de alta finura.

Ceniza volante Clase F

Es resultado de la combustión de carbón bituminoso y se compone principalmente de sílice. Tiene propiedades puzolánicas, es decir, es necesario combinarlas con el cemento en proceso de hidratación para que adquiera propiedades cementantes. Es requisito cuya finura y su

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

contenido de carbono sean constantes, aspecto que a veces puede ser difícil de conseguir, y tiende a oscurecer la mezcla a la que se añade.

Puzolanas mixtas

Son materiales naturales que se exponen a altas temperaturas para lograr que adquieran propiedades puzolánicas. El metacaolín es por excelencia el ejemplo de esta categoría. Proviene del sometimiento de la arcilla caolínica pura a temperaturas entre 650°C y 850°C, y su contenido alto de aluminio mitiga los ataques por cloruros. Es poco utilizado y requiere de un aditivo superplastificante para que la mezcla sea manejable.

Calizas finamente molidas

En sí no poseen propiedades puzolánicas, pero su finura y características físicas son de gran beneficio para las mezclas a las que se añaden. Hacen que la mezcla sea adecuadamente trabajable, aumentan su densidad a la vez que reducen su permeabilidad y la exudación.

Agua

El agua es un elemento indispensable en la preparación de mezclas, por lo tanto, es de suma importancia que su calidad y cantidad sean óptimas para que la hidratación del cemento y posteriores aspectos se desarrollen de la mejor forma (Matallana, 2019; Sánchez de Guzmán, 2001). En palabras de Sánchez de Guzmán (2001) el agua es:

“Aquel componente del concreto en virtud del cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados. Para ello, se clasifica en agua de mezclado y agua de curado” (p. 57)

A continuación se describen los principales apartados al respecto de acuerdo con los autores previamente mencionados.

Agua de mezclado

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Es el volumen de agua que necesita el cemento para la producción de una pasta hidratada correctamente que lubrique los materiales que la componen. Se encarga principalmente de dos tareas. La primera, permitir que el cemento presente sus características aglutinantes mediante la hidratación. La segunda, brindar fluidez a la mezcla para hacerla manejable mientras se encuentra fresca.

Agua de hidratación

Porción del agua de mezclado que produce una reacción química con el cemento, desencadenando sus propiedades aglomerantes y cambiando progresivamente de estado plástico o fluido a estado sólido.

Agua de evaporación

Porción del agua de mezclado que no reacciona con los compuestos del cemento y por tanto termina evaporándose conforme la mezcla se seca. El agua de evaporación deja vacíos o canales capilares al interior de la pasta, lo que puede disminuir su resistencia y propiciar la entrada de sustancias que permeabilicen el mortero o el concreto, lo que puede comprometer la estructura.

Debido a lo anterior, Matallana (2019) indica que “la cantidad de agua de mezclado influye en las principales propiedades del concreto, siendo este uno de los principales factores a controlar durante la dosificación.” (p. 85).

Agua de curado

A través de ella se garantizan las condiciones necesarias para que la mezcla con cemento pueda continuar su proceso de hidratación sin cambios e interrupciones hasta lograr la hidratación total del cemento y que sus propiedades se desarrollen como es requerido (Sánchez de Guzmán, 2001). Las condiciones necesarias son humedad y temperatura, de modo que el agua

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

de curado es una adición al agua de mezclado, la cual se calcula a partir de aspectos como la humedad ambiente y el tipo de cemento utilizado en la pasta. Es necesaria el agua de curado durante al menos 7 días de la fragua del cemento, aunque se recomienda un tiempo mayor (Matallana, 2019). En ambientes controlados como los laboratorios, las condiciones de curado se proporcionan a través de la inmersión de los productos en tanques, sin embargo, en ambientes como las obras, los productos suelen ser humedecidos periódicamente para garantizar las condiciones ya mencionadas.

Calidad del agua

Determina en gran parte que las propiedades de la mezcla se den como se espera. Es de saber común que el agua potable o apta para consumo humano es adecuada en la elaboración de mezclas, sin embargo, algunas otras aguas pueden utilizarse, como las aguas de reciclaje. No obstante, se debe ser precavido con la utilización de cualquier agua de dudoso origen o composición, pues la presencia de sustancias como azúcares, sales, aceites, ácidos, sulfatos, entre otros, potencialmente afecta los tiempos de fraguado, y por tanto la durabilidad y resistencia de los productos.

Pasta

La pasta es una unidad básica para la conformación de los materiales de construcción, es aquella combinación de carácter químico entre el material cementante (ligante) y agua (Rivva, 2000, p. 8; Chandías, 1992, p. 1), así como aditivos en caso de que sean añadidos (Sánchez de Guzmán, 2001, p. 22). Las características de la pasta van a ser determinantes en la calidad y las características del mortero o el concreto del que formarán parte, así como la relación entre agua y material cementante. Rivva (2000) explica algunos aspectos sobre la pasta que aquí se abordan.

Elementos de la pasta

La pasta se compone principalmente de:

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

- Gel: producto de la hidratación del cemento.
- Los poros.
- El cemento no hidratado en caso de haberlo.
- La cal libre: cristales de hidróxido de calcio que pueden formarse al hidratar el cemento.

Funciones de la pasta

Cumple cuatro funciones:

- Propiciar que se den las propiedades requeridas del producto endurecido.
- Distanciar las partículas del agregado.
- Llenar aquellos vacíos entre partículas de agregado y adherirse a ellas firmemente.
- Lubricar la masa cuando aún no endurece.

Propiedades de la pasta

- Propiedades fisicoquímicas del material cementante con el que fue formada.
- Propiedades relativas del agua y el cemento que la conforman.
- Nivel de hidratación del cemento, determinado por la efectividad de la combinación química entre material cementante y agua.

Estas propiedades serán clave en el producto terminado en su nivel de porosidad de hidratación, lo que determinará su duración y resistencia, entre otros aspectos (Sánchez de Guzmán, 2001).

Agregados

Son cualquier tipo de material que se agrega a la pasta para fabricar morteros o concretos, ayudando a formar un todo compacto. Contribuyen al logro de la resistencia, no interfieren con la adherencia y no reaccionan químicamente de forma desfavorable (Matallana, 2019; Sánchez de Guzmán, 2001).

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Dice Matallana (2019) que:

“Algunas propiedades indispensables de los agregados para elaborar concretos de densidad normal son: una adecuada distribución en los tamaños de sus partículas forma y textura superficial apropiada, granos densos, duros y resistentes, durables, inertes, y libres de limo, arcilla, sales, azúcares y materia orgánica.” (p. 63).

Para describir el modo en que se clasifican los agregados se utilizará como base el escrito de Matallana (2019).

Clasificación

Según su origen o procedencia

Agregados naturales

Son aquellos materiales que, como su nombre lo indica, se encuentran en la naturaleza. Proviene de los distintos tipos de rocas: ígneas, metamórficas o sedimentarias, y se han formado a través de procesos naturales como la erosión, el arrastre del agua y la exposición a las condiciones de la intemperie. A partir de estos procesos se producen partículas de piedra, gravas, limos y arcillas (Matallana, 2019).

A pesar de que son agregados naturales, estos materiales muchas veces deben pasar por un proceso de molienda para que obtenga la distribución granulométrica adecuada, así, se obtienen el triturado y el machacado. Del mismo modo, el material debe ser lavado.

En cuanto a arenas, existen principalmente cuatro tipos. El primero son las arenas de peña, que vienen de las canteras y suelen ser muy finas, además de contener grandes cantidades de arcilla. El segundo son las arenas de río que suelen complementarse con las de peña. El tercero son las arenas de playa o desierto, que no se utilizan frecuentemente por la presencia de sales y conchas. Por último, las arenas producto de trituración, que según la norma NTC-174

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

solo pueden conformar el 30% del contenido total de arena, siendo requisito que la demás sea arena de río o de peña.

Agregados artificiales

Se obtienen a través de procesos industriales utilizando materiales que provienen de los mismos. Se utilizan para mezclas especiales tales como concretos livianos, donde es popular el uso de ladrillos triturados, escoria de alto horno o arcilla expandida térmicamente. También es común el uso de productos como limadura de hierro o de acero, producto de la fabricación de concretos pesados. En cuanto a los concretos de peso normal, sus subproductos con potencial de agregados son el clínker y el concreto triturado a partir de escombros. Estos materiales tienen la ventaja de contribuir a la disminución de costos y de efectos ambientales adversos.

Según su tamaño

Es la clasificación más utilizada y se subdivide en dos tipos: agregado grueso o grava y agregado fino o arena. La diferencia entre el mortero y el concreto es que el primero solo contiene agregado fino, mientras que el concreto contiene ambos tipos. En la figura 1 obtenida de Matallana (2019) se muestra una clasificación detallada de los agregados según su tamaño.

Figura 1

Clasificación de los agregados por tamaño

| Tamaño (mm) | Mayor a 50 | Entre 50 y 19,0 | Entre 19,0 y 4,75 | Entre 4,75 y 2,36 | Entre 2,36 y 0,42 | Entre 0,42 y 0,074 | Entre 0,074 y 0,002 | Menor a 0,002 |
|---------------|---------------------------------------|-----------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|---------------|
| Denominación | Piedra | Grava | Gravilla | Arena gruesa | Arena media | Arena fina | Limo | Arcilla |
| | Agregado grueso | | | Agregado fino | | | Fracción muy fina | |
| Recomendación | Material bueno para producir concreto | | | Material bueno para producir concreto | | | Material no recomendable | |

Nota. Obtenido de: Matallana, R. (2019). El Concreto: fundamentos y nuevas tecnologías. Corona.

Funciones

Trabajabilidad

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

En el caso del mortero, que es la mezcla de interés en la presente investigación, la manejabilidad mide indirectamente la consistencia o estado de fluidez de la mezcla, lo que quiere decir que su manejabilidad depende de qué tan dura/seca o blanda/fluida se encuentre en estado plástico (Sánchez de Guzmán, 2001). Los agregados, más específicamente la arena, influyen en la fluidez de la mezcla y en su trabajabilidad, por lo que hay que seleccionar arena que permita a la mezcla ser trabajable como se espera. Sánchez de Guzmán (2001) sugiere que una arena con un contenido ligero de limos e incluso arcillas son óptimas para mejorar la trabajabilidad.

Resistencia

La resistencia es una característica propia del agregado, sin embargo, este transmite a la mezcla de mortero o concreto su resistencia. Por lo tanto, el origen de las partículas de agregado es un factor determinante para lograr la resistencia y dureza necesarios en la mezcla. Es fundamental para los morteros tener una alta resistencia a la compresión, lo que mejora con un mayor porcentaje de cemento, pero también con un agregado correcto que resalte esta propiedad.

Densidad

Sánchez de Guzmán (2001) postula que un mortero es más resistente e impermeable en cuanto mayor sea su densidad, es decir, que contenga mayor cantidad de materiales sólidos. Un agregado denso, en este caso arena, es aquel que posea el menor volumen de poros cuando está seco. Para favorecer la densidad se recomienda una arena bien gradada, es decir, que tenga partículas de variedad de tamaños, desde las más grandes hasta las más pequeñas para que estas últimas ocupen los vacíos que dejan las más grandes.

Durabilidad

Hace referencia a la resistencia de los morteros y concretos ante aquellos agentes ajenos o externos que se encuentran en su entorno, es decir, hace alusión a la resistencia ante los efectos

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

de la intemperie que pueden ocasionar la contracción al secarse, la penetración del agua, el frío, el desgaste por abrasión, la corrosión, eflorescencias o cambios repentinos de temperatura, sin deteriorarse o dañarse. Matallana (2019) explica que los agregados transfieren sus propiedades de durabilidad a la mezcla de la que forman parte.

Morteros

El mortero, como se ha dicho anteriormente, es “una mezcla homogénea de un material cementante (cemento), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y en algunas ocasiones adiciones” (Gutiérrez, 2003, p. 115). Se utilizan para distintas tareas, como la pega de unidades de mampostería, recubrimiento de superficies recibiendo nombres como revoque, repello o pañete o relleno (Sánchez de Guzmán, 2001).

En general suelen distinguirse dos clasificaciones principales para los morteros, que no son los tipos propiamente dichos. Existen los morteros aéreos, que endurecen por influencia del aire y la pérdida de agua, fraguando por carbonatación. Por otro lado, los morteros hidráulicos endurecen al encontrarse sumergidos en agua, compartiendo con el concreto la habilidad para desarrollar resistencias iniciales altas por su contenido de sílices y alúminas.

Tipos

Si bien existen distintos tipos de morteros según su composición, solo se precisa ahondar en uno, los morteros de cemento.

Morteros calcáreos

Aquellos donde la cal ya sea blanca o gris es el elemento aglomerante.

Morteros de yeso

Compuestos por yeso hidratado y agua, de fraguado rápido.

Morteros de cemento

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Son los de mayor uso en el país, compuestos por agua, arena y cemento. Por lo tanto, su resistencia es alta y la trabajabilidad depende de la proporción y clase de arena (Gutiérrez, 2003; Sánchez de Guzmán, 2001). Estos morteros se pueden clasificar del siguiente modo:

- Morteros cuya resistencia les permite soportar cargas a compresión, mampostería estructural.
- Morteros de pega, es decir, mantienen unidos y en la posición deseada los elementos. Morteros de superficie uniforme y lisa, de revestimiento y revoque.
- Morteros de relleno.

A continuación, se presentan las propiedades de los morteros en sus diferentes estados según Gutiérrez (2003) y Sánchez de Guzmán (2001).

Propiedades en estado plástico

Manejabilidad

Mide la facilidad con la que una mezcla permite que se le manipule. También se liga a su consistencia, si es blanda o seca. Lo anterior depende de las proporciones de agua, cemento y arena, así como las propiedades de esta última.

Retención de agua

Hace referencia a la capacidad de la mezcla para conservar su plasticidad al encontrarse en contacto con la superficie sobre la que es colocado. Tiene efecto sobre la velocidad de endurecimiento y la resistencia final de la mezcla, pues la cantidad de agua presente determina hasta qué punto ocurre la reacción de hidratación del cemento.

Velocidad de endurecimiento

Se determina a partir del tiempo que transcurre entre el fraguado inicial y final de la mezcla, estos están entre 2 y 24 horas.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Propiedades en estado endurecido

Retracción

Es el cambio volumétrico debido a la pérdida de agua de la mezcla. La mezcla se contrae entre más agua pierda. Se relaciona particularmente con la retracción de la pasta de cemento, siendo mayor en cuanto más cemento contiene la mezcla. Puede contrarrestarse con la elección de un agregado rugoso.

Adherencia

Se refiere a la capacidad de la mezcla para absorber tensiones tanto normales como tangenciales a la superficie de la estructura a la que se encuentra unida y mantenerse de este modo.

Resistencia

Mide la capacidad del mortero para soportar cargas altas, lo que se logra aumentando la cantidad de material cementante en la mezcla, así como con un agregado de mayor densidad. Los morteros secos tienden a ser más resistentes que un mortero húmedo.

Durabilidad

Hace referencia a la resistencia del mortero ante los ataques de agentes externos como las temperaturas, los cloruros, la corrosión, entre otros. Los morteros altamente resistentes también suelen ser más duraderos.

Apariencia

Particularmente importante en construcciones donde la mezcla será visible, como las mamposterías de ladrillo a la vista. Se relaciona con la plasticidad

3. Metodología

El presente apartado expone la metodología utilizada para llevar a cabo la investigación, en la cual se hace el reemplazo parcial de cemento por cenizas volantes clase F en un mortero de reparación tipo Grout. Para ello, se seleccionaron 5 grupos de especímenes: 1 grupo control y 4 experimentales con porcentajes de reemplazo de 10%, 18%, 26% y 34%, la decisión respecto a la cantidad de grupos y los porcentajes de reemplazo se fundamenta en estudios previos donde se utilizaron 4 grupos experimentales, así como porcentajes similares (Hsu et al., 2018; Abdalla y Mohammed, 2022).

En cuanto a la cantidad de especímenes por grupo, que son 9, esta cantidad la determina la norma que contiene el procedimiento para realizar los ensayos de laboratorio, en este caso la NTC-220:2024 de ICONTEC (2024). Si bien la norma permite trabajar con sólo 6 cubos, esto no es recomendable, puesto que para que un dato sea válido debe existir un promedio, es decir, después de realizar la exclusión de datos debe haber por lo menos 2 cubos por edad de falla, y teniendo en cuenta que son 3 edades, se corre el riesgo de que un dato sea desechado y con ello el otro también. Por lo tanto, se trabajan 3 datos por edad de falla, permitiendo que si uno es desechado aún se tengan 2 para continuar los análisis. Esto se abordará con mayor profundidad en el apartado Descripción de procedimientos.

Enfoque y alcance de la investigación

Según Lerma (2016), las características del enfoque cuantitativo en la investigación son: desde unos objetivos precisos definidos por el investigador, se formulan hipótesis que pueden verificarse o refutarse, el problema de investigación está caracterizado, los datos recolectados son numéricos y se usa análisis estadístico, además aplicable a las ciencias naturales y se realiza

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

desde una perspectiva objetiva. Se precisa que la presente investigación se ciñe a este enfoque, detallando a continuación los aspectos metodológicos que así lo demuestran.

Cuando la pregunta de investigación indaga sobre el efecto de alguna acción sobre un resultado, cuando el alcance de la investigación es explicativo, cuando el diseño es experimental y entre las actividades a realizar está la comparación, el enfoque de la investigación se tipifica como cuantitativo (Jiménez-Becerra, 2020). La postura epistemológica es la perspectiva desde donde se aborda la investigación, el positivismo plantea la objetividad y la percepción de la realidad como una sola que puede observarse sin alteraciones, el enfoque cuantitativo acoge estos planteamientos y considera que la mejor forma de acercarse a esa realidad es mediante el conteo y análisis estadístico de la información (Gómez, 2009).

La “Sustitución de una parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout” es una investigación con un enfoque cuantitativo porque se plantea como hipótesis a corroborar o refutar, que este reemplazo repercute positivamente en la reducción de costos de producción y en la reducción del impacto ambiental y también que no repercute negativamente en la resistencia a la compresión del mortero; los datos de resistencia a la compresión son datos numéricos que serán analizados con el programa JASP, y los costos de producción e indicadores ambientales serán analizados matemáticamente.

La delimitación del conocimiento que se desea obtener como resultado de la investigación define el alcance, este es pues la respuesta al interrogante ¿Hasta dónde se quiere llegar con la investigación?, poner estos límites necesarios contribuye a que la investigación no se convierta en un estudio sin fin sobre el fenómeno que se investiga (Gómez, 2009). Según el alcance que se plantee en la investigación puede ser de corte exploratorio, descriptivo,

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

correlacional o explicativo sin importar el enfoque que tenga, siendo el alcance exploratorio básico y el explicativo de mayor complejidad, no es usual pero puede suceder que una investigación pase por varios tipos de alcance durante su desarrollo (Gómez, 2009).

Plantea Galarza (2020), que el alcance exploratorio es adecuado cuando el tema a investigar es incipiente y no se cuenta con nutrida información sobre este. Es pertinente una investigación exploratoria cuando el fenómeno por estudiar es un descubrimiento o acontecimiento nuevo, destacando su carácter novedoso el cual más que tener un fin en sí mismo, es la apertura o primer acercamiento, lo que posteriormente facilitará y promoverá la realización de investigaciones más profundas que obtengan mayor cantidad de información y conclusiones respecto a la temáticas (Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

Un estudio se estima de alcance descriptivo cuando está constituido en descripciones, propiedades, elementos, grupos, etc respecto a un fenómeno determinado (Hernández, Fernández & Baptista, 2014). Es más amplio en la información que contiene comparado con un estudio de alcance exploratorio, sin embargo, no establece relaciones ni causalidad entre las variables o conceptos objeto de la investigación, sino que meramente realiza precisiones y descripciones del problema, a veces mostrando distintas posturas respecto al mismo, lo que conforma una base científica y conceptual para futuras predicciones y planteamientos hipotéticos (Arias, 2021).

El alcance correlacional hace referencia a una investigación con al menos dos variables, en la que se busca establecer el nivel de correlación o grado de asociación entre las variables (Hernández, Fernández & Baptista, 2014). Para ello se formulan hipótesis y se usa la estadística inferencial en el análisis de resultados de las mediciones realizadas, para finalmente establecer si existe o no una correlación entre las variables (Moscoso et al., 2022). Es importante recalcar que

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

un estudio de alcance correlacional no establece relaciones causales entre las variables, ni las clasifica como variable dependiente e independiente (Arias, 2021).

El alcance más complejo es el explicativo, ya que este se extiende más allá que todos los anteriores, pues, como su nombre indica, tiene por objeto el explicar las relaciones causales entre variables y el modo en que estas ocurren respondiendo así preguntas como ¿Por qué ocurre este fenómeno? (Hernández, Fernández & Baptista, 2014). Arias (2021) explica que estas investigaciones son más profundas y estructuradas debido a la gran variedad de investigaciones que pueden realizarse dentro de este alcance, un ejemplo de esto es la opción de hacer una investigación transversal donde se mide una vez o longitudinal, donde se hacen varias veces.

Teniendo en cuenta lo anterior, la presente investigación plantea un alcance explicativo debido a que busca evaluar el efecto causado por el uso de cenizas volantes tipo F, en la resistencia a la compresión, la disminución de costos de producción y la disminución del impacto ambiental de la producción del mortero Sika Grout 212 fabricado en Barranquilla. Así, se plantea que al hablar de efecto se habla de causalidad, puesto que se espera que la adición de cenizas volantes tipo F modifique las propiedades del mortero, y a su vez haya otras disminuciones ya mencionadas. Los demás detalles respecto al diseño se encuentran en su propio apartado.

Diseño de la investigación

En general, el diseño de la investigación es el plan o estrategia para responder al planteamiento del problema, marca la ruta que debe seguirse buscando el objetivo planteado, el enfoque cuantitativo es afín a este diseño de investigación porque se recolecta información y se corrobora o refuta la hipótesis propuesta (Hernández, Fernández & Baptista, 2014). El enfoque cuantitativo comparte con el cualitativo las fases generales de la investigación, tales como la

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

recolección de la información o llamado trabajo de campo en el que también se miden fenómenos, la generación de supuestos o hipótesis, el análisis de la información recogida, la confirmación o refutación de la hipótesis o conjeturas y sentar las bases para nuevas investigaciones (Gómez, 2009).

La investigación puede clasificarse en distintos cortes, como la investigación básica y la aplicada. La investigación básica también podría llamarse teórica, puesto que no lleva a cabo acciones o prácticas que vayan más allá de los planteamientos teóricos y los marcos de referencia, siendo común que se utilice para formular nuevas teorías. Por otro lado, la investigación aplicada también se llama empírica, pues esta lleva a cabo acciones, ensayos, mediciones, entre otros para recolectar datos empíricos que posteriormente son analizados a la luz de los postulados, leyes o teorías de alguna ciencia o disciplina (Narvárez y Villegas, 2014).

Los diseños de investigación admitidos en el enfoque cuantitativo son los diseños experimentales y no experimentales (Arias, 2021; Hernández, Fernández & Baptista, 2014). Los diseños no experimentales se clasifican en longitudinales o transversales, y los experimentales a su vez se dividen en otros tres grupos: pre-experimentos, cuasiexperimentos y experimentos puros, siendo estos últimos también de distintos subtipos (Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

Los pre-experimentos tienen un grado de control mínimo pues suelen realizar una sola medición, y más importante aún, no cuentan con grupo control sino sólo grupo experimental. Los cuasiexperimentos cuentan con mayor grado de control pero carecen de una característica muy importante que es la aleatorización al elegir los participantes para el grupo control y el grupo experimental. Finalmente, los experimentos puros cumplen con los dos requisitos de presentar grupos de comparación (control y experimental) y la equivalencia entre estos grupos, desde

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

luego, puede haber múltiples grupos experimentales o control (Arias, 2021; Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

Un diseño experimental se determina así debido a que se presentan al menos dos variables, una independiente y otra dependiente, donde la primera se manipula o modifica para observar su efecto en la segunda, pudiendo hacerse esto en distintos grados (Arias, 2021; Moscoso et al., 2022). Los grados de manipulación de la variable independiente son: presencia o ausencia, donde a un grupo se le aplica la variable independiente y al otro no para determinar el efecto de su presencia, a estos grupos se les llama grupo experimental y grupo control, respectivamente. Más de dos grados, donde lo que se manipula es en qué magnitud se administra o aplica la variable independiente a diversos grupos experimentales, y por último, las modalidades de manipulación en vez de grados (Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

La propuesta de investigación realizada se asume desde un diseño experimental por cuanto la resistencia a la compresión del mortero se obtiene a través de ensayos normalizados realizados en el laboratorio de la empresa Sika, sede Barranquilla, donde se manipula la variable de cantidad de ceniza volante tipo F y se evalúa el impacto sobre la resistencia a la compresión en el mortero Sika Grout 212, lo que constituye un ejemplo de variable independiente y dependiente, respectivamente. Estudios como el de Huaquisto y Belizario (2018) o de Molina Bas (2018) siguieron también una metodología experimental al añadir porcentajes de ceniza volante a morteros y concretos para medir luego el cambio en sus propiedades físicas, mecánicas y químicas efecto del reemplazo, por lo que este diseño es el apropiado para este tipo de estudios.

De forma paralela se evalúa también cómo la reducción de la cantidad de cemento usada en la mezcla repercute en los costos de producción y mitigación del impacto ambiental, que

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

como ya se mencionó, se analiza matemáticamente, siguiendo metodologías como las planteadas por Bala et al., (2024) donde se hace comparaciones entre el costo de producción del mortero en su forma tradicional y con cenizas volantes, así como cálculos del costo de cada material para la producción del mortero según las proporciones que utiliza, y por O'Brien et al., (2019), quienes calcularon la huella de carbono del mortero con o sin ceniza a partir de un factor fijo que mide el CO_{2e} . Al ser una investigación donde se lleva a la práctica las hipótesis para su comprobación, clasifica como investigación aplicada.

Respecto al grado de manipulación de las variables, en este caso se presenta una manipulación de presencia o ausencia, así como de más de dos grados, puesto que se cuenta con un grupo control y varios grupos experimentales, a los cuales se les agregaron proporciones distintas de la ceniza volante tipo F para observar cómo cambian las propiedades del mortero al variar la cantidad de ceniza que se integra en su mezcla. Por lo anterior, este estudio cumple con los requisitos para ser un experimento puro, además de que los morteros que se prepararon alterando su composición para añadir la ceniza volante tipo F se eligieron aleatoriamente de un mismo lote.

Finalmente, después de realizar el análisis del alcance, enfoque y diseño de la investigación, se puede afirmar que la propuesta de sustitución de una parte de cemento por cenizas volantes tipo F en la fabricación del mortero Sika Grout 212 que se produce en Barranquilla, cumple los parámetros para ser de alcance explicativo, abordado epistemológicamente desde el positivismo, con un enfoque cuantitativo y diseño experimental en calidad de experimento puro. A través de este diseño se responde a la pregunta de investigación de forma completa, puesto que somete a comprobación los supuestos realizados, determinando a través de ensayos y cálculos cuál es el porcentaje de reemplazo que cumple las expectativas en

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

cuanto a resistencia, costos e impacto ambiental mientras se mantiene en el marco de la normativa y presenta un beneficio

Instrumento

Los datos obtenidos en los ensayos se registran en un formato de elaboración propia llamado “Evaluación de morteros” En el formato se consignan los siguientes datos: materiales, peso de cada material, orden de ejecución, tratamiento, el número de cubo, la edad de falla, la medida en milímetros del lado del cubo, la resistencia en mega pascales, y el tipo de falla que presentó el cubo. En cada hoja de formato hay espacio para colocar los datos de un ensayo donde la mezcla se falla a los 3, 7 y 28 días. También se encuentra un espacio para las observaciones del experimentador.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Figura 2

Formato de evaluación de evaluación de morteros

| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | | | | | | | |
|--|-------------|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | | | | | | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: | | | | | | | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 |






Fecha (día-mes-año): _____

| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla |
|--|---|---|---------------|------|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | | | | | | | | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | | | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | | | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | | | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | | | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | | | | | | | | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | | | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | | | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | | | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | | | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | | | | | | | | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | | | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | | | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | | | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | | | | | | | | |

Observaciones:

| |
|--|
| |
| |
| |

Tipo de falla

| | | | | |
|---|--|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|  |  |  |  |  |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Descripción de procedimientos

Para llegar a los resultados obtenidos en el desarrollo de la tesis Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212 se siguió el siguiente proceso:

En primer lugar, se seleccionó el mortero de reparación de dicha empresa puesto que una de las investigadoras trabaja en el laboratorio de la misma. Por lo tanto, se realizó el contacto con la empresa donde se solicitó permiso para el uso de su producto, sus materias primas y sus instalaciones. Sika S.A.S amablemente aceptó las solicitudes previas y suministró lo necesario para llevar a cabo los ensayos de laboratorio necesarios. La autorización se encuentra en el Apéndice D.

De acuerdo con el estudio del estado del arte y la experiencia de la empresa, se concluyó que el reemplazo de material cementante por cenizas volantes tipo F se haría en valores porcentuales de 10%, 18%, 26% y 34% referidos a la masa del cemento usado que es marca Argos tipo ART, los demás componentes de la mezcla mantendrán constante la cantidad, incluida el agua necesaria para producir una mezcla fluida según la especificación técnica del SikaGrout-212.

Teniendo en cuenta lo establecido en la norma NTC 220:2024 “Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 milímetros (2 pulgadas) de lado”, se decidió preparar 108 especímenes cúbicos de mortero para determinar la resistencia a la compresión a edades de 3, 7 y 28 días y con porcentajes de ceniza de 10%, 18%, 26% y 34%.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Se realizó el cálculo de los materiales necesarios para la preparación de los cubos de mortero y se separó la cantidad calculada de un mismo lote para garantizar la uniformidad de estos.

Proceso de elaboración de los especímenes cúbicos de mortero

Siguiendo lo establecido en la norma NTC 112:2021 “Cementos. Mezcla mecánica de pastas y morteros de cemento hidráulico de consistencia plástica”, se vierte primero el agua, luego se agrega el cemento, el carbonato de calcio y la ceniza volante y se mezcla a velocidad baja por 30 segundos, posteriormente se añade la arena y se continúa el mezclado por 30 segundos más a velocidad media, se detiene la mezcladora por 90 segundos y se reinicia el mezclado por 60 segundos más, los tiempos y velocidades son los indicados en la norma.

Se realizó el ensayo de fluidez del mortero de acuerdo con lo determinado en la norma ASTM C 939 – 10 “Método de prueba estándar para el flujo de lechada para concreto de agregados preemplazados (método de cono de flujo)” (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2016), para verificar que el mortero tenga la consistencia deseada obteniendo un resultado menor de 180 segundos que cumple con la especificación técnica del SikaGrout-212.

Posteriormente se realizó el llenado de los moldes cúbicos de 50mm de lado en dos capas de 25mm de espesor compactadas cada una con 32 golpes del apisonador dados en 10 segundos, una vez llenados los moldes se dejan en una cámara húmeda durante 24 horas y posteriormente se someten a curado en tanque de agua que garantiza la correcta hidratación del cemento.

La prueba de resistencia a la compresión se realizó aplicando una carga uniformemente distribuida sobre las caras del cubo que han estado en contacto con la superficie del molde a una velocidad regulada establecida según la norma NTC 220: 2024 “Cementos. Determinación de la

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 milímetros (2 pulgadas) de lado” entre 900N/s y 1800N/s, ensayando 3 especímenes cúbicos para cada edad establecida (3, 7 y 28 días) para un total de 9 especímenes cúbicos por réplica, lo que para las tres réplicas de cada tratamiento daría un total de 27 cubos ensayados.

Teniendo en cuenta que se realizaron 4 tratamientos diferentes de reemplazo de material cementante por ceniza volante (10%, 18%, 26% y 34%) se ensayaron a compresión 108 cubos de mortero SikaGrout-212 para la presente investigación.

La norma NTC 220:2024 (ICONTEC, 2024) establece el criterio de exclusión de los cubos que resulten defectuosos, para ello indica que si se tiene 3 cubos para la edad de ensayo se debe realizar el promedio de los datos de resistencia y descartar aquellos que estén por fuera del rango máximo permisible que es 8.7%, si al realizar esta verificación quedan 2 datos válidos, estos se deben promediar y en este caso el rango máximo permisible es 7.6%, que es el que aplica en caso que solo se tengan 2 cubos para la edad a ensayar, si al realizar la segunda verificación solo queda un dato, este se debe descartar y es necesario repetir el ensayo.

Variables que pueden impactar los resultados

La resistencia a la compresión del mortero se determina experimentalmente en el laboratorio y el valor que de ella se obtenga puede verse influenciado por varios aspectos, entre ellos están las características de los materiales, debido a que los componentes son de origen natural puede haber variaciones de un lote a otro así cumplan con los rangos de valores admitidos para cada propiedad (Matallana, 2019), este aspecto se controló en la investigación al asegurar que todos los materiales usados provinieran de un mismo lote y realizando el acopio en cantidades mayores a las requeridas.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Otro factor influyente son las condiciones ambientales como humedad relativa y temperatura del laboratorio (González, 2014), este riesgo se minimizó al realizar los ensayos en un mismo laboratorio y a la misma hora del día, también el factor humano cobra relevancia en el resultado de la resistencia toda vez que puede cometerse errores durante las diferentes etapas del ensayo como la preparación de la mezcla que requiere que los materiales se viertan en el recipiente en un orden específico, por ejemplo, si esto se omite puede variar el resultado de resistencia.

Posteriormente a la elaboración de los cubos viene la etapa de curado que consiste en garantizar un ambiente húmedo adecuado para que la hidratación del cemento suceda de forma normal, el curado de los cubos se hizo mediante inmersión en agua de calidad adecuada y cubriéndolos con al menos una lámina de 2cm de agua sobrenadando a ellos y estas condiciones se garantizaron hasta la edad de ensayo de cada grupo.

Asimismo, la precisión de prensa usada para imprimir los esfuerzos de compresión a los cubos puede incidir en los resultados, frente a esto el equipo usado garantiza una precisión del 95% en los resultados que arroja, lo que se comprueba mediante la calibración periódica que se realiza dos veces en cada año (Ver Apéndice C). La calibración del equipo ocurre una vez al año, en este caso, fue calibrado en septiembre de 2023 y los ensayos fueron realizados en febrero de 2024.

Las variables anteriormente expuestas pueden influir en los valores de resistencia a la compresión del mortero, debido a ello se toma la decisión de preparar especímenes cúbicos en número superior al mínimo requerido por la normatividad para que, en caso de ser necesario, se puedan excluir los especímenes que no arrojen valores confiables de resistencia y aun así tener el número necesario para que el ensayo sea válido y el resultado obtenido sea aceptable.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Análisis de información

Para el análisis de la información recolectada se utiliza el software estadístico JASP. En él es posible realizar diversas operaciones de la estadística inferencial con lo cual se determinan aspectos como la normalidad, varianza, tamaño del efecto, entre otros, respecto a los datos resultado de los experimentos realizados. Gracias a lo anterior, con los análisis estadísticos se comprueba o refuta la hipótesis de investigación planteada y además se determina que tan confiables son los resultados. Adicionalmente, sus herramientas de visualización permiten enseñar los datos a través de no sólo tablas sino también gráficas para una mejor comprensión y organización.

La versión del programa utilizada es la versión JASP 0.19.1 que fue lanzada el 11 de septiembre del 2024, haciéndola la versión más actual (JASP Team, 2024); el programa fue creado bajo la licencia GNU Affero General Public License (AGPL), una licencia que garantiza la gratuidad y libertad de uso y modificación del software que es creado bajo la misma (Free Software Foundation, 2007)

Para los análisis estadísticos se emplean las siguientes pruebas.

Valor p

El valor p es utilizado como punto de corte en cuánto a significancia para todas las pruebas estadísticas aquí descritas. En este caso, el límite o punto de corte está en 0,050, lo que significa que si el valor $p < 0,050$ existe significancia estadística, particularmente diferencias significativas entre los grupos para el supuesto que se compara. Por otro lado, si $p \geq 0,050$ no existe significancia estadística, de modo que no hay diferencias entre los grupos para el supuesto que se compara. Es importante aclarar que el hecho de que no haya diferencias significativas en un supuesto, por ejemplo, el de homogeneidad de varianzas, no quiere decir que no existan

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

diferencias significativas a nivel general entre los grupos, deben realizarse análisis a fondo para determinar su existencia o no.

ANOVA

El ANOVA (one-way analysis of variance / análisis de varianza) es una prueba utilizada para medir las diferencias entre más de dos series de datos que son independientes entre sí, esto comparando sus medias (Goss-Sampson, 2022; Florez-Moreno, 2024). La realización del análisis ANOVA conlleva numerosos pasos y toma de decisiones. A continuación, se hace una descripción de cada prueba utilizada en el procedimiento para el cálculo del ANOVA.

Prueba F

El primer paso para este análisis es la llamada Prueba F del análisis de la varianza, la cual evalúa si la varianza explicada es mayor que la no explicada. Por ello se le considera dentro de las pruebas ómnibus (Goss-Sampson, 2022). Aquí, se pone a prueba la hipótesis nula que dicta que no existen diferencias significativas entre las medias de los grupos, lo que en esta investigación se traduce en la hipótesis estadística nula (ver capítulo 4). La Prueba F funciona como un diagnóstico preliminar que determina si hay diferencias o no, sin embargo, esta no señala en qué comparación/es se encuentran las diferencias (Florez-Moreno, 2024). En caso de que la Prueba F no detecte diferencias, el análisis estadístico termina, por el contrario, si se detectan diferencias, debe continuarse con las pruebas que en adelante se explican. (Ver Tabla 5 para la Prueba F tradicional).

Pruebas de corrección

Son pruebas diseñadas para realizar la corrección de la Prueba F cuando no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, ya que es posible que el cálculo de la significancia estadística sea erróneo cuando la comparación entre medias dicta que no son iguales.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Prueba de Brown-Forsythe: esta prueba difiere de sus homólogas puesto que calcula la significancia estadística basándose en los valores de mediana, no en los de la media. Tiene poder estadístico alto y corrige el error presente en la Prueba F cuando la prueba de Levene indica heterocedasticidad (Florez-Moreno, 2024). (Ver las Tablas 7 y 9 para la corrección de Brown-Forsythe).

Prueba T de Welch: la prueba de Welch comparte con la mayoría de sus homólogas que realiza sus comparaciones respecto a la media, sin embargo, esta es utilizada para calcular diferencias entre grupos cuando los tamaños de muestra son distintos, así como cuando las varianzas no son iguales, razón por la que difiere de su hermana la Prueba T de Student. Por lo tanto, actúa como un doble seguro en la corrección del error en la Prueba F, particularmente en casos como este donde la cantidad de datos es distinta entre cada grupo (Goss-Sampson, 2022; Florez-Moreno, 2024). (Ver las Tablas 7 y 9 para la corrección de Welch).

Verificación de supuestos

Para realizar el ANOVA correctamente deben cumplirse una serie de supuestos, según Goss-Sampson (2022) son:

- La variable independiente debe ser categórica y la dependiente debe ser continua.
- Debe haber independencia entre los grupos.
- Debe haber homogeneidad o igualdad de varianzas entre los grupos.
- La variable dependiente debe tener una distribución relativamente paramétrica o normal.
- No debe haber datos extremos que puedan desviar los resultados.

El autor señala que los dos primeros requisitos deben verificarse a partir de un diseño metodológico coherente, mientras que los tres últimos se verifican a través de análisis especializados.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Supuesto de homogeneidad de varianzas

La homogeneidad o igualdad de varianzas pone a prueba la hipótesis nula que supone que las varianzas de los grupos son iguales. Si el valor p de la prueba es mayor o igual a 0,050 quiere decir que se comprueba la hipótesis nula, si el valor p es menor a 0,050 quiere decir que hay significancia y las varianzas no son iguales.

Prueba de Levene: es la prueba por defecto para verificar la homogeneidad de varianzas u homocedasticidad entre dos o más grupos, si el resultado de esta muestra que el supuesto no se cumple y no existe dicha homogeneidad, debe procederse con las pruebas de corrección (ver Apéndice B, Tablas 2, 5 y 8 para las pruebas de Levene de cada comparación).

Según el resultado de las pruebas para la homogeneidad de varianzas se procederá a elegir el contraste post-hoc indicado (ver apartado *Contrastes Post-hoc*).

Supuesto de normalidad. Gráficos Q-Q

Para comprobar el supuesto de normalidad en un ANOVA se hace por medio de los Gráficos Q-Q, como se muestra en la figura 3. Se dice que entre más se acerque una distribución al modelo de la distribución normal o paramétrica, más cercanos deben ser los datos a la línea roja de guía que se observa, por lo tanto, en este caso el supuesto de normalidad se pone a prueba mediante análisis visual (Goss-Sampson, 2022). En el ejemplo de la figura 3, la variable 2 sigue una distribución normal o paramétrica, pero la variable 3 no lo hace. Una vez obtenidos los resultados del análisis del Gráfico Q-Q debe tomarse una decisión, si la distribución se observa relativamente paramétrica o normal, se continúa con las pruebas post-hoc, pero, si la distribución se observa no paramétrica o normal directamente se procede a realizar la prueba de Kruskal-

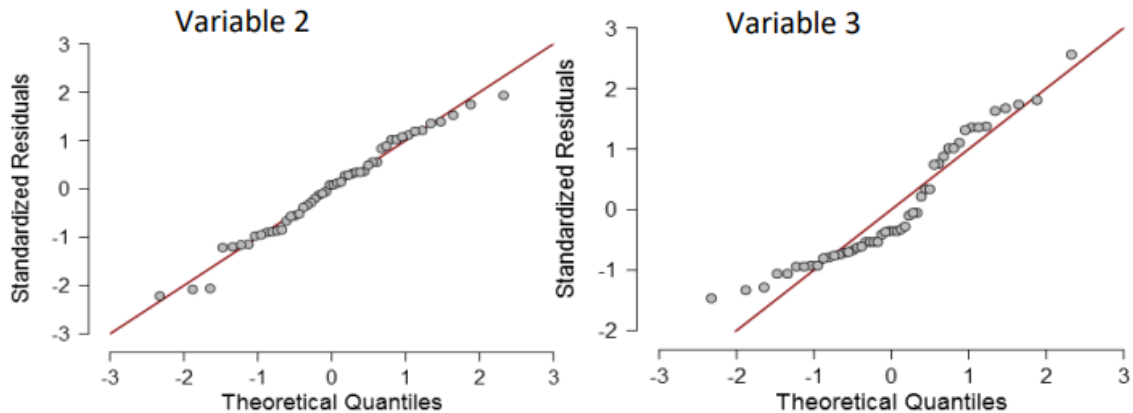
Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Wallis independientemente del resultado de la comprobación de la homogeneidad de varianzas.

(Ver Apéndice B, Figuras 1, 2 y 3 para los Gráficos Q-Q de cada comparación).

Figura 3

Ejemplo de Gráfico Q-Q



Nota. Tomado de: Statistical Analysis in JASP. A Student Guide [Figura], por Goss-Sampson, M.A. 2022. <https://jasp-stats.org/wp-content/uploads/2022/04/Statistical-Analysis-in-JASP-A-Students-Guide-v16.pdf>

Datos extremos

Si bien el programa da la opción de realizar la exclusión de datos, esta se realizó en un proceso independiente puesto que es solicitada en la norma que dicta la metodología para los ensayos de laboratorio, de modo que los datos ingresados en el programa ya se encuentran depurados. Para más información dirigirse al apartado Descripción de procedimientos.

Comparaciones Post-hoc

También llamadas pruebas post-hoc, estas se realizan únicamente si la Prueba F mostró significancia estadística, con el objetivo de determinar en qué parte de las comparaciones se encuentran las diferencias significativas marcadas por la prueba (Florez-Moreno, 2024). Se explican las más relevantes para el presente estudio.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Prueba Estándar vs Prueba de Games-Howell: la prueba estándar es utilizada cuando se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, mientras que la prueba de Games-Howell se utiliza cuando este supuesto no se confirma (IBM, 2024). (Ver Tabla 6 para la prueba estándar, ver Tablas 8 y 10 para la prueba de Games-Howell).

Corrección del Contraste Post-hoc

Similar a las pruebas de Brown-Forsythe o de Welch, las cuales corrigen el error de la Prueba F, las pruebas de corrección de las pruebas post-hoc funcionan como una doble comparación de que no se incurre en el error tipo I. Si bien existe gran variedad de pruebas de corrección, se explican las pertinentes para el estudio.

Prueba de Tukey: es la prueba más común para la corrección del error tipo I, es ideal cuando los tamaños de muestra sean iguales para todos los grupos. Establece el error aceptable por comparación como el error aceptable para el conjunto de todas las comparaciones (Goss-Sampson, 2022; IBM, 2024). Este es el tipo de corrección que se utiliza por defecto cuando se selecciona la prueba post-hoc de Games-Howell. (Ver Tablas 8 y 10 para la corrección de Tukey).

Prueba de Scheffe: conserva un buen control sobre el error aceptable y el nivel de confianza, siendo preferible cuando los tamaños de muestra entre grupos son diferentes entre sí. Realiza comparaciones por pareja, igual que la prueba de Tukey (Florez-Moreno, 2024; Goss-Sampson, 2022). (Ver Tabla 6 para la corrección de Scheffe).

Tamaño del efecto

Aunque las Pruebas F o las correcciones de Brown-Forsythe y Welch muestran la significancia estadística, así como los contrastes post-hoc señalan en dónde está dicha

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

significancia, ninguna de ellas expresa qué tan grande es la significancia, es decir, qué tan grande es el tamaño de las diferencias o el efecto. Para ello en el programa se ofrecen tres tipos de calculadoras del tamaño del efecto.

Eta cuadrado (η^2): es preciso respecto a la varianza explicada, sin embargo, sobreestima la varianza de la población, lo que dificulta la comparación del efecto de una sola variable en diferentes estudios (Goss-Sampson, 2022).

Eta cuadrado parcial (η_p^2): este cálculo corrige el error de su versión anterior, de modo que facilita la comparación del efecto de una sola variable en diferentes estudios (Goss-Sampson, 2022).

Omega cuadrado (ω^2): es un cálculo preciso cuando la muestra es pequeña, inferior a 30 datos, como en el presente caso, puesto que mide el efecto de forma precisa (Florez-Moreno, 2024; Goss-Sampson, 2022). No es recomendable cuando el tamaño de la muestra es grande. (Ver Tablas 5, 7 y 9 para los tamaños del efecto calculados con ω^2).

La figura 4 muestra el modo de interpretar los valores de tamaño del efecto para cada tipo de cálculo.

Figura 4
Interpretación del tamaño del efecto según el cálculo

| Test | Measure | Trivial | Small | Medium | Large |
|-------|---------------|---------|-------|--------|-------|
| ANOVA | Eta | <0.1 | 0.1 | 0.25 | 0.37 |
| | Partial Eta | <0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.14 |
| | Omega squared | <0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.14 |

Nota. Tomado de: Statistical Analysis in JASP. A Student Guide [Figura], por Goss-Sampson, M.A. 2022. <https://jasp-stats.org/wp-content/uploads/2022/04/Statistical-Analysis-in-JASP-A-Students-Guide-v16.pdf>

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

¿Por qué no se utilizan pruebas T en vez de ANOVA? No se utilizan pruebas T puesto que existe una acumulación del porcentaje de error aceptable, lo que se llama family-wise error o error tipo I por familia, donde el 5% de error aceptable por cada comparación se multiplica por el número de comparaciones que se realicen, resultando en una confiabilidad de los datos disminuida. Esto puede provocar rechazo de la hipótesis nula cuando en realidad sea cierta, es decir, puede concluirse que sí existen diferencias entre los grupos cuando en realidad no las haya. El uso de la Prueba T de Welch es una excepción, pues se utiliza como una prueba de corrección del error y no como el estadístico principal.

Consideraciones éticas

Si bien es cierto que este estudio no involucra seres vivos, a nuestro modo de ver es importante aclarar que la recolección de datos se realizó siguiendo estrictamente lo dictado por la norma NTC 220:2024 y se usaron los criterios de exclusión determinados en esta sin manipulación alguna que pudiera representar sesgo (ICONTEC, 2024).

Adicionalmente, declaramos que, en congruencia con el interés por la sostenibilidad ambiental en esta investigación, la disposición final de los cubos ensayados lo realizó la empresa Sika según lo establecido en sus Planes y programas ambientales 2024: Plan residuos, bajo la responsabilidad del director de la planta y regido por el Decreto 4741 de 2005, por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral emitido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, para esto en las instalaciones de laboratorio se tiene 2 contenedores con capacidad de 60 kg que al llenarse se llevan a un reservorio de escombros ubicado en el centro de

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

acopio de la planta, luego se entregan con una frecuencia semanal a la empresa Eco soluciones quienes se encargan de la disposición final (Gobierno de Colombia, 2005).

Finalmente se deja constancia que la tesista Isaura Guzmán Pérez se encuentra vinculada contractualmente con la empresa Sika S.A.S. ubicada en Malambo, Atlántico.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

4. Hipótesis

A continuación, se presenta la operacionalización de las variables dependiente e independiente, así como las hipótesis de trabajo, alternativa y nula.

Variable independiente: ceniza volante

Es un material puzolánico producto del carbón que bajo condiciones de humedad adquiere propiedades cementantes, caracterizada por su alta finura y su forma esférica. Según la NTC-3493 de ICONTEC (2023) debe cumplir con un contenido mínimo de sílice, alúmina y óxido férrico del 50%, entre otras especificaciones. Su cantidad se expresa en gramos y su proporción en la mezcla en porcentaje. Según la ficha técnica entregada por Sika, tiene una densidad de 1,82 gramos sobre centímetro cúbico, un porcentaje de humedad máxima de 3%, un porcentaje de inquemados máximo de 11% y una retención en el tamiz No. 325 del 34%.

Variables dependientes

Características físico-mecánicas

La resistencia a la compresión del mortero, que se refiere a cuánta fuerza de aplastamiento puede soportar un material por unidad de área, es la propiedad que refleja el efecto de la sustitución que se haga de cemento por ceniza volante tipo F, según la NTC-220:2024 (ICONTEC, 2024), este parámetro se mide mediante una prensa que imprime fuerzas compresivas a velocidad constante sobre un cubo de mortero de 50mm de lado, los resultados se expresan en mega pascales (MPa) que son los establecidos en el Sistema Internacional de Unidades (SI) adoptado por Colombia. Para el mortero SikaGrout - 212 la resistencia a la compresión debe alcanzar como mínimo 15 MPa a 1 día, 35 MPa a 7 días y 43 MPa a 28 días.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Costo de producción

El efecto del reemplazo de material cementante por cenizas volantes tipo F puede medirse haciendo una comparación entre los costos de las materias primas de la fórmula original y de la nueva fórmula con ceniza incorporada, teniendo en cuenta que los demás componentes del proceso productivo se mantienen constantes. Asimismo, se puede calcular cuál es el cambio en el precio del producto respecto al precio de los morteros de reparación homólogos fabricados por los otros productores, en ambos casos la unidad de medida será el peso colombiano.

Impacto ambiental

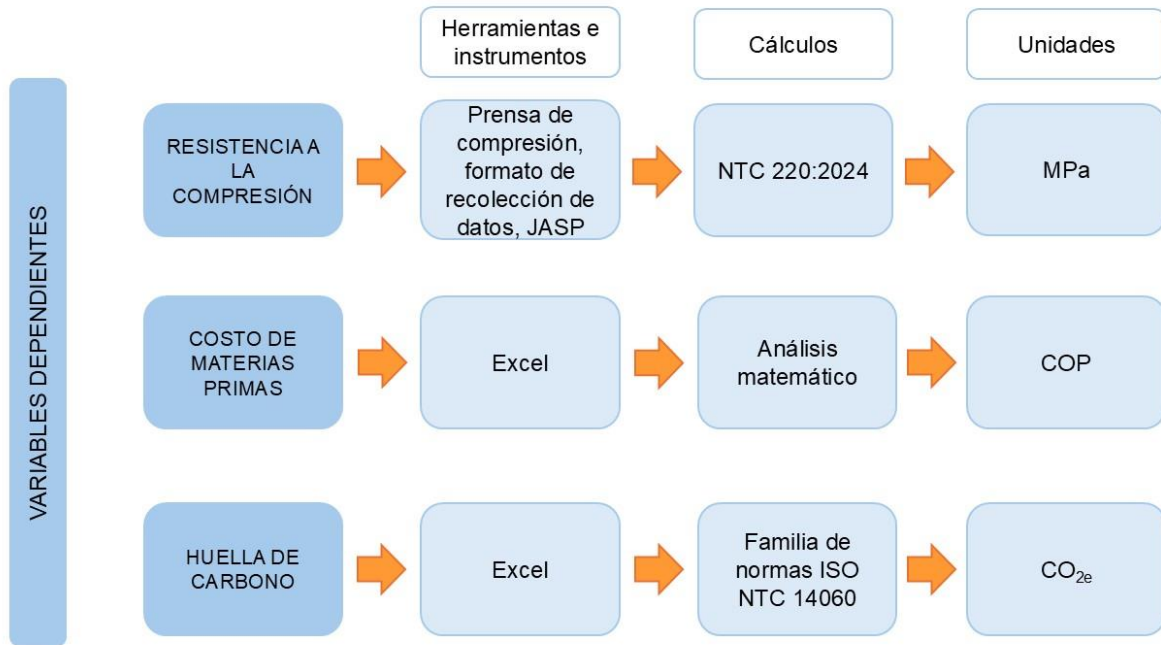
En relación con el impacto sobre el medio ambiente, el cálculo de los GEI emitidos de forma directa a la atmósfera y que tienen potencial influencia en el calentamiento global se pueden estimar usando como unidad de medida el kilogramo de CO₂ equivalente de las materias primas de la fórmula con ceniza incorporada respecto de la fórmula original, esto se hace aplicando los lineamientos de la familia de normas NTC-ISO 14060:2021 de ICONTEC (2021) que rigen este aspecto en Colombia.

En la Figura 5 se sintetiza la forma de calcular y medir cada variable, así como las herramientas utilizadas para cada una.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Figura 5

Variables, herramientas, cálculos y unidades



Nota. Las variables mostradas en el esquema son las operacionalizaciones de las variables dependientes que figuran en los títulos

Planteamiento de hipótesis

Hipótesis de trabajo para la resistencia

En al menos uno de los tratamientos, la sustitución de parte del cemento por ceniza volante tipo F en la mezcla mejorará la resistencia a la compresión del mortero.

Hipótesis nula para la resistencia

La sustitución de parte del cemento por ceniza volante tipo F en la mezcla no mejorará la resistencia a la compresión del mortero en ninguno de los tratamientos.

Hipótesis estadísticas

Hipótesis estadística de trabajo: Existen diferencias significativas entre las medias de por lo menos un grupo experimental y el grupo control.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Hipótesis estadística nula: No existen diferencias significativas entre las medias de ningún grupo experimental y el grupo control.

Hipótesis de trabajo para los costos de producción

La sustitución de parte del cemento por ceniza volante tipo F en la mezcla disminuirá el costo de producción del producto.

Hipótesis nula para los costos de producción

La sustitución de parte del cemento por ceniza volante tipo F en la mezcla no disminuirá el costo de producción del producto.

Hipótesis de trabajo para el impacto ambiental

La sustitución de parte del cemento por ceniza volante tipo F en la mezcla disminuirá la huella de carbono del producto.

Hipótesis nula para el impacto ambiental

La sustitución de parte del cemento por ceniza volante tipo F en la mezcla no disminuirá la huella de carbono del producto

5. Resultados

A continuación se muestran los resultados y análisis de los aspectos referentes a las características físico-mecánicas, al costo de producción y al impacto ambiental del producto en su forma tradicional y con las modificaciones propuestas, lo anterior para determinar qué alternativa cumple con su propósito de forma satisfactoria, verificando cada uno de los aspectos. Al final de los tres apartados se encuentra un análisis global de los resultados obtenidos.

Características físico-mecánicas

Al momento de añadir ceniza volante a los componentes del mortero SikaGrout-212 se esperó que esta modificación pudiese generar algunas variaciones en las propiedades físicas y/o mecánicas del mismo, principalmente, su resistencia. Por lo tanto, se buscó que con la alteración a la fórmula se mantuviese la resistencia a la compresión prometida al consumidor en su consistencia fluida, la cual se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Resistencia a la compresión esperada del producto en su consistencia fluida

| Días | Resistencia a la compresión (MPa) |
|------|-----------------------------------|
| 3 | 29,84 |
| 7 | 34,69 |
| 28 | 43,88 |

Nota. Adaptado de: SikaGrout-212. Hoja de datos del producto, por Sika.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizaron ensayos previamente descritos en la metodología para determinar la resistencia a la compresión del producto con cada uno de los tratamientos, estos resultados se encuentran en el Apéndice A. Posteriormente, se realizó la exclusión de datos extremos siguiendo las indicaciones de la norma NTC-220, la cual dicta que aquellos datos que no se encuentren dentro de un promedio de variación establecido no deberán ser tomados en cuenta para posteriores análisis, puesto que pueden generar resultados extraños y,

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

que un dato de resistencia debe resultar del promedio de al menos dos datos válidos, no se admiten valores de resistencia derivados de un solo ensayo.

En consecuencia, se presentan los datos válidos de las resistencias a la compresión logradas a los 3, 7 y 28 días para el grupo control, el tratamiento 1 (T1), el tratamiento 2 (T2), el tratamiento 3 (T3) y el tratamiento 4 (T4), los cuales corresponden a porcentajes de reemplazo del 0%, 10%, 18%, 26% y 34%, respectivamente.

Tabla 2

Resistencia a la compresión obtenida a los 3 días. Datos válidos

| Resistencia a la compresión (MPa) | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Control | T1 | T2 | T3 | T4 |
| 35,57 | 35,38 | 39,90 | 24,19 | 23,99 |
| 37,46 | 35,52 | 38,53 | 23,94 | 23,41 |
| 36,41 | 35,99 | 38,09 | 24,39 | 22,78 |
| 34,01 | 34,90 | 38,76 | 22,31 | 22,35 |
| 34,00 | 34,05 | 36,84 | 22,16 | 21,35 |
| 35,38 | 33,09 | 40,87 | 22,78 | 21,50 |
| | | 38,71 | | 21,99 |
| | | 40,87 | | 21,75 |

Como se observa en la Tabla 2, los tratamientos 1 y 2 arrojaron resistencias similares o superiores a las del grupo control, por otro lado, las de los tratamientos 3 y 4 son inferiores por un margen de al menos 10 MPa.

Tabla 3

Resistencia a la compresión obtenida a los 7 días. Datos válidos

| Resistencia a la compresión (MPa) | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Control | T1 | T2 | T3 | T4 |
| 44,25 | 39,46 | 39,46 | 26,10 | 24,92 |
| 45,00 | 41,18 | 41,18 | 26,28 | 26,12 |
| 43,34 | 40,19 | 40,19 | 25,50 | 24,97 |
| 31,80 | 35,84 | 40,06 | 26,96 | 24,73 |
| 33,14 | 36,30 | 42,60 | 28,45 | 23,73 |
| 40,12 | 35,81 | 42,34 | 27,10 | 24,92 |
| 37,10 | 36,12 | 40,47 | 26,22 | 24,59 |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

34,73 42,73 26,01 25,01

Como en el caso anterior, en la Tabla 3 se observa que los tratamientos 1 y 2, particularmente este último, producen resultados similares a los del grupo control, mientras que los tratamientos 3 y 4 producen resultados inferiores.

Tabla 4

Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días. Datos válidos

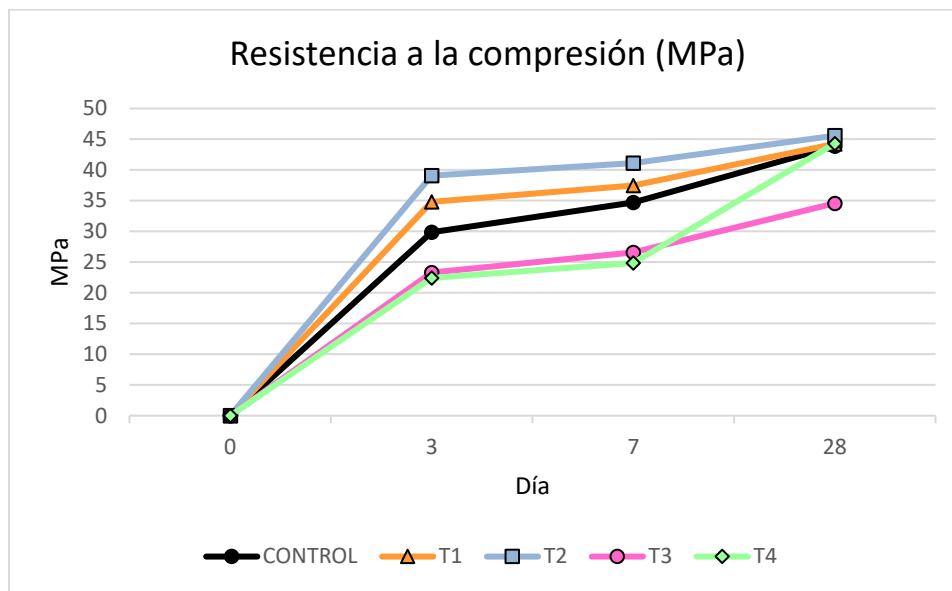
| Resistencia a la compresión (MPa) | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Control | T1 | T2 | T3 | T4 |
| 53,09 | 44,46 | 46,02 | 35,07 | 46,05 |
| 55,91 | 44,56 | 45,84 | 35,49 | 43,92 |
| 54,34 | 44,27 | 45,93 | 30,99 | 45,74 |
| 50,76 | 44,75 | 47,04 | 32,30 | 47,27 |
| 50,75 | 43,57 | 46,19 | 36,21 | 40,92 |
| 52,81 | 43,49 | 44,54 | 36,42 | 41,88 |
| | 44,56 | 43,88 | 35,51 | |
| | 44,27 | 45,16 | | |

En los resultados de la Tabla 4 se observan las variaciones más grandes, puesto que aunque los tratamientos 1 y 2 siguen la tendencia en similitud al control, los resultados se observan algo inferiores, esto sin llegar a ser inferiores que los resultados esperados según la Tabla 1. Los resultados correspondientes al tratamiento 4 alcanzaron resistencias igual de altas que los tratamientos 1 y 2, algo inesperado teniendo en cuenta lo bajo de sus resultados para los 3 y 7 días. Por su parte, los resultados del tratamiento 3 son inferiores a los de los demás tratamientos, así como a los del grupo control.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Figura 6

Comparación entre las resistencias a la compresión de cada tratamiento con la resistencia esperada del mortero de referencia



Nota. Las resistencias del grupo “CONTROL” son aquellas ofrecidas por la empresa productora, que se encuentran en la Tabla 1

Como se observa en la Figura 6, los tratamientos 1 y 2 superaron la resistencia a la compresión esperada del mortero en su fórmula tradicional para las 3 edades de falla, mientras que el tratamiento 3 no lo logró en ninguna de las edades, y el tratamiento 4 solo lo consiguió a los 28 días. Es posible que si los ensayos se extendieran en el tiempo hasta, por ejemplo, 90 días, los tratamientos rezagados (T3 y T4) llegaran a resistencias similares a las del mortero de referencia y los dos primeros tratamientos, pues las cenizas volantes tipo F promueven el desarrollo de resistencias tardías y estos dos tratamientos contienen la mayor concentración de las mismas.

Con los datos válidos relacionados en las anteriores tablas se realizó el análisis estadístico con el programa JASP.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Análisis estadístico

Debido a que se tienen varios grupos experimentales que deben ser comparados con el grupo control, se realizaron pruebas ANOVA de todos los grupos para las mediciones correspondientes a cada falla, es decir, 3. Esta prueba permite realizar las diversas comparaciones sin incurrir en un margen de error mayor al permitido de 5%, es decir que para que existan diferencias significativas, el valor p de las pruebas debe ser menor a 0,050; si es mayor o igual a este número, se considerará que no existen diferencias.

En algunas tablas se observa un asterisco (*) que marca las diferencias significativas. Cuando solo se observa un asterisco (*), quiere decir que el nivel de confianza es de aproximadamente el 95% ($p < 0,050$) que es aquel aceptable para los resultados, cuando se muestran dos asteriscos (**), el nivel de confianza es de aproximadamente el 99% ($p < 0,010$), y si se muestran tres asteriscos (***), significa que el nivel de confianza es de aproximadamente el 99,9% ($p < 0,001$).

Análisis estadístico a los 3 días

Se presentan los resultados del análisis ANOVA para los datos válidos obtenidos en cada tratamiento a los 3 días de falla.

Tabla 5
ANOVA de la resistencia a los 3 días

| Casos | Suma de Cuadrados | gl | Cuadrado Medio | F | p | ω^2 |
|-----------|-------------------|----|----------------|---------|--------|------------|
| GRUPO | 1678.007 | 4 | 419.502 | 306.626 | < .001 | 0.973 |
| Residuals | 39.676 | 29 | 1.368 | | | |

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

Teniendo en cuenta que el valor p es inferior a 0,001, se estima que sí existen diferencias significativas: $F(4, 29) = 306,626$, $p < 0,001$. Por lo tanto, el análisis debe seguir con la

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

comprobación de supuestos (ver Apéndice B, Tabla 2 y Figura 1 para la comprobación de supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad). El tamaño del efecto es grande, pues $\omega^2 = 0,973$.

Tabla 6
Comparaciones Post-hoc a los 3 días

| | | Diferencia de Medias | ET | t | pScheffe |
|---------|----|----------------------|-------|--------|-----------|
| CONTROL | T1 | 0.650 | 0.675 | 0.963 | 0.918 |
| | T2 | -3.600 | 0.632 | -5.698 | < .001*** |
| | T3 | 12.177 | 0.675 | 18.031 | < .001*** |
| | T4 | 13.082 | 0.632 | 20.709 | < .001*** |
| T1 | T2 | -4.250 | 0.632 | -6.727 | < .001*** |
| | T3 | 11.527 | 0.675 | 17.069 | < .001*** |
| | T4 | 12.432 | 0.632 | 19.680 | < .001*** |
| T2 | T3 | 15.776 | 0.632 | 24.975 | < .001*** |
| | T4 | 16.681 | 0.585 | 28.523 | < .001*** |
| T3 | T4 | 0.905 | 0.632 | 1.433 | 0.727 |

*** p < .001

Nota. Valor p ajustado para comparar una familia de 4

Según lo observado en la tabla, no existen diferencias significativas entre el grupo control y el grupo T1 (valor p = 0,918), de modo que la resistencia esperada se conserva. Entre el grupo control y el grupo T2 sí se observan estas diferencias (p < 0,001), sin embargo, la resistencia esperada no sólo se conserva en este caso, sino que aumenta de acuerdo con los resultados de la Tabla 2. Por otro lado, existen diferencias significativas entre el grupo control y los grupos T3 y T4 (p < 0,001), aunque estas se deben a una clara disminución de la resistencia respecto a la esperada. Se ha elegido el método estándar de pruebas post-hoc debido a que se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, y la prueba de corrección de Scheffe debido a que funciona bien con grupos de tamaño distinto.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Análisis estadístico a los 7 días

Se presentan los resultados del análisis ANOVA para los datos válidos obtenidos en cada tratamiento a los 7 días de falla.

Tabla 7
ANOVA de la resistencia a los 7 días

| Corrección de Homogeneidad | Casos | Suma de Cuadrados | gl | Cuadrado Medio | F | p | ω^2 |
|----------------------------|-----------|-------------------|--------|----------------|---------|--------|------------|
| Brown-Forsythe | GRUPO | 1798.881 | 4.000 | 449.720 | 58.702 | < .001 | 0.868 |
| | Residuals | 234.525 | 9.707 | 24.160 | | | |
| Welch | GRUPO | 1798.881 | 4.000 | 449.720 | 265.396 | < .001 | 0.868 |
| | Residuals | 234.525 | 15.771 | 14.871 | | | |

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

El valor p tanto para la prueba de Brown-Forsythe como para la de Welch es inferior a 0,001, de modo que existen diferencias significativas: Brown-Forsythe: $F(4,9) = 58,702$, $p < 0,001$. Welch: $F(4,15) = 265,396$, $p < 0,001$. En ambos casos se reporta un tamaño del efecto grande ya que $\omega^2 = 0,868$. Se procede con la verificación de supuestos (ver Apéndice B, Tabla 5 y Figura 2 para la verificación de supuestos). Se aplican las pruebas de corrección debido a que no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas (ver Apéndice B, Tabla 5 para comprobación de homogeneidad de varianzas).

Tabla 8
Comparaciones Post-hoc de Games-Howell a los 7 días

| Comparación | Diferencia de Medias | SE | t | df | pTukey |
|--------------|----------------------|-------|--------|--------|----------|
| CONTROL - T1 | 1.796 | 2.204 | 0.815 | 8.114 | 0.919 |
| CONTROL - T2 | -1.879 | 2.079 | -0.904 | 6.596 | 0.887 |
| CONTROL - T3 | 12.672 | 2.055 | 6.166 | 6.305 | 0.004 ** |
| CONTROL - T4 | 14.376 | 2.043 | 7.038 | 6.156 | 0.002 ** |
| T1 - T2 | -3.675 | 0.970 | -3.789 | 10.607 | 0.021 * |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| Comparación | Diferencia de Medias | SE | t | df | p _{Tukey} |
|-------------|----------------------|-------|--------|--------|--------------------|
| T1 - T3 | 10.876 | 0.917 | 11.861 | 8.948 | < .001*** |
| T1 - T4 | 12.580 | 0.889 | 14.156 | 8.011 | < .001*** |
| T2 - T3 | 14.551 | 0.556 | 26.185 | 12.677 | < .001*** |
| T2 - T4 | 16.255 | 0.508 | 32.016 | 10.430 | < .001*** |
| T3 - T4 | 1.704 | 0.397 | 4.286 | 12.677 | 0.007 ** |

* p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Nota. Resultados basados en medias sin corregir.

Basándose en los resultados de la tabla, se observa que no existen diferencias significativas entre el grupo control con los grupos T1 y T2 ($p = 0,919$ y $p = 0,887$, respectivamente), de modo que la resistencia a la compresión esperada se conserva, resultados consecuentes con los mostrados en la Tabla 3. Por el contrario, sí existen diferencias significativas entre el grupo control y los grupos T3 y T4 ($p = 0,004$ y $p = 0,002$, respectivamente), debiéndose estas a que las resistencias arrojadas por estos tratamientos son inferiores en comparación. Se selecciona la prueba post-hoc de Games-Howell debido a que no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, la cual utiliza la prueba de corrección de Tukey.

Análisis estadístico a los 28 días

Se presentan los resultados del análisis ANOVA para los datos válidos obtenidos en cada tratamiento a los 28 días de falla.

Tabla 9
ANOVA de la resistencia a los 28 días

| Corrección de Homogeneidad | Casos | Suma de Cuadrados | gl | Cuadrado Medio | F | p | ω^2 |
|----------------------------|-----------|-------------------|--------|----------------|--------|--------|------------|
| Brown-Forsythe | GRUPO | 1122.764 | 4.000 | 280.691 | 86.405 | < .001 | 0.917 |
| | Residuals | 86.374 | 17.247 | 5.008 | | | |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| Corrección de Homogeneidad | Casos | Suma de Cuadrados | gl | Cuadrado Medio | F | p | ω^2 |
|----------------------------|-----------|-------------------|--------|----------------|--------|--------|------------|
| Welch | GRUPO | 1122.764 | 4.000 | 280.691 | 59.239 | < .001 | 0.917 |
| | Residuals | 86.374 | 12.408 | 6.961 | | | |

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

El valor p tanto para la prueba de Brown-Forsythe como para la de Welch es inferior a 0,001, de modo que existen diferencias significativas. Brown-Forsythe: $F(4,17) = 86,405$, $p < 0,001$. Welch: $F(4,12) = 59,239$, $p < 0,001$. En ambos casos se reporta un tamaño del efecto grande ya que $\omega^2 = 0,917$. Se procede con la verificación de supuestos (ver Apéndice B, Tabla 8 y Figura 3 para la verificación de supuestos). Se aplican las pruebas de corrección debido a que no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas (ver Apéndice B, Tabla 8 para comprobación de homogeneidad de varianzas).

Tabla 10
Comparaciones Post-hoc de Games-Howell a los 28 días

| Comparación | Diferencia de Medias | SE | t | df | p_{Tukey} |
|--------------|----------------------|-------|--------|--------|-------------|
| CONTROL - T1 | 8.702 | 0.840 | 10.355 | 5.403 | < .001*** |
| CONTROL - T2 | 7.368 | 0.897 | 8.215 | 6.854 | < .001*** |
| CONTROL - T3 | 18.373 | 1.140 | 16.118 | 10.799 | < .001*** |
| CONTROL - T4 | 8.647 | 1.313 | 6.583 | 9.567 | < .001*** |
| T1 - T2 | -1.334 | 0.391 | -3.411 | 9.901 | 0.042 * |
| T1 - T3 | 9.671 | 0.805 | 12.016 | 6.528 | < .001*** |
| T1 - T4 | -0.055 | 1.036 | -0.053 | 5.261 | 1.000 |
| T2 - T3 | 11.005 | 0.864 | 12.740 | 8.381 | < .001*** |
| T2 - T4 | 1.278 | 1.082 | 1.181 | 6.209 | 0.762 |
| T3 - T4 | -9.727 | 1.291 | -7.534 | 9.814 | < .001*** |

* $p < .05$, *** $p < .001$

Nota. Resultados basados en medias sin corregir.

A partir de la tabla, se observa que en este caso sí existen diferencias significativas entre el grupo control y todos los tratamientos ($p < 0,001$ para todos los casos), ya que el grupo control

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

arrojó resultados mayores en su resistencia, sin embargo, en el caso de los grupos T1, T2 y T4 las resistencias obtenidas se encuentran en el nivel de la resistencia esperada o son superiores, lo que concuerda con los datos de la Tabla 4. Este no es el caso del grupo T3, cuyas resistencias son inferiores a las de los demás grupos. No existen diferencias significativas entre el grupo T4 y los grupos T1 y T2 ($p = 1$ y $p = 0,762$, respectivamente), de modo que sorpresivamente los especímenes de este grupo lograron resistencias similares a los dos grupos con mejor desempeño, a pesar de la tendencia en las dos fallas anteriores. Se selecciona la prueba post-hoc de Games-Howell debido a que no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, la cual utiliza la prueba de corrección de Tukey.

Efecto en el costo de producción

En la Tabla 11 se muestra una comparación de precio por kilogramo entre el mortero SikaGrout-212 y sus homólogos en el mercado, así como su presentación. Los homólogos fueron seleccionados debido a que son del mismo tipo y cumplen la misma función que el producto. En el caso del homólogo MasterFlow 928, el precio solo está disponible en pesos mexicanos, siendo este de 521 MXN, por lo que se realiza la conversión a pesos colombianos, haciendo la aclaración de que esta conversión puede que no se ajuste al precio que colocaría la empresa productora debido a sus propios criterios, en el caso del Pro Grout 212 no ha sido posible encontrar un precio en el mercado.

Tabla 11

Nombres y precios de los morteros homólogos en el mercado

| Nombre | Empresa productora | Presentación (kg) | Precio (COP) | Precio por kilogramo (COP) |
|---------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| SikaGrout-212 | Sika | 30 | 192.900 | 6.430 |
| Hi Flow Grout | Toxement | 30 | 124.063 | 4.135 |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| | | | | |
|----------------|-----------|----|---------|-------|
| Mapefill GP | MAPEI | 25 | 154.900 | 6.196 |
| MasterFlow 928 | BASF | 25 | 114.884 | 4.595 |
| Pro Grout 212 | Provequin | 25 | - | - |

Según lo anterior, SikaGrout-212 es el mortero con un mayor precio por kilogramo, seguido del Mapefill GP, el MasterFlow 928 y finalmente el Hi Flow Grout.

En cuanto a costos de materias primas para la producción, Sika proporcionó los siguientes datos respecto a los costos de producción del producto sin hacer uso de cenizas volantes, y posteriormente haciendo uso de ellas. Se presentan los costos relacionando cada proporción de ceniza utilizada para cada tratamiento (10%, 18%, 26% y 34%).

Tabla 12
Fórmula actual de producto. Precio por componente

| Componente | Precio por kilogramo (COP) | Cantidad por tonelada (kg) | Precio por tonelada (COP) |
|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| ARGOS Cement concrete ART grey | 565 | 409 | 231.085 |
| Sand/CO Coarse 8-30 | 252 | 145 | 36.540 |
| Sand/CO arena tipo C | 87 | 385 | 33.495 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 3359 | 28 | 94.052 |
| Carbonato de calcio malla 150 | 322 | 33 | 10.626 |
| Total | - | 1.000 | 405.798 |

Nota. De izquierda a derecha se encuentran: los nombres de los componentes del producto, el precio de un kilogramo de cada uno de los componentes, los kilogramos necesarios de cada componente para producir una tonelada de producto y el precio de una tonelada de producto.

Como se observa en la Tabla 12, el costo de las materias primas para producir una tonelada de SikaGrout-212 con su fórmula tradicional es de 405.798 pesos colombianos.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Tabla 13

Fórmula del producto con reemplazo del 10% por ceniza volante. Precio por componente

| Componente | Precio por kilogramo (COP) | Cantidad por tonelada (kg) | Precio por tonelada (COP) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| ARGOS Cement concrete ART grey | 565 | 369 | 208.485 |
| Sand/CO Coarse 8-30 | 252 | 145 | 36.540 |
| Sand/CO arena tipo C | 87 | 385 | 33.495 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 3359 | 28 | 94.052 |
| Carbonato de calcio malla 150 | 322 | 33 | 10.626 |
| Ceniza volante | 264 | 40 | 10.560 |
| Total | - | 1.000 | 393.668 |

Según la Tabla 13, al añadir la ceniza volante en un porcentaje del 10%, el costo de materias primas para producir una tonelada de producto es de 393.668 pesos colombianos, es decir, 12.130 pesos menos, una reducción del 3%.

Tabla 14

Fórmula del producto con reemplazo del 18% por ceniza volante. Precio por componente

| Componente | Precio por kilogramo (COP) | Cantidad por tonelada (kg) | Precio por tonelada (COP) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| ARGOS Cement concrete ART grey | 565 | 336 | 189.840 |
| Sand/CO Coarse 8-30 | 252 | 145 | 36.540 |
| Sand/CO arena tipo C | 87 | 385 | 33.495 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 3359 | 28 | 94.052 |
| Carbonato de calcio malla 150 | 322 | 33 | 10.626 |
| Ceniza volante | 264 | 73 | 19.272 |
| Total | - | 1.000 | 383.825 |

Al agregar ceniza volante con un porcentaje de reemplazo del 18%, el costo de las materias primas para producir una tonelada de mortero es 383.825, tal como muestra la tabla.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Este costo es 21.973 pesos inferior al original, esto significa que el costo se reduce 5,5% respecto a la fórmula tradicional.

Tabla 15

Fórmula del producto con reemplazo del 26% por ceniza volante. Precio por componente

| Componente | Precio por kilogramo (COP) | Cantidad por tonelada (kg) | Precio por tonelada (COP) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| ARGOS Cement concrete ART grey | 565 | 302 | 170.630 |
| Sand/CO Coarse 8-30 | 252 | 145 | 36.540 |
| Sand/CO arena tipo C | 87 | 385 | 33.495 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 3359 | 28 | 94.052 |
| Carbonato de calcio malla 150 | 322 | 33 | 10.626 |
| Ceniza volante | 264 | 107 | 28.248 |
| Total | - | 1.000 | 373.591 |

Según la Tabla 15, cuando se añade ceniza volante en un porcentaje de reemplazo del 26%, el costo de materias primas para producir una tonelada de producto es de 373.591 pesos colombianos, 32.207 pesos menos que con la fórmula tradicional, consiguiendo una disminución del 7,9% en costos.

Tabla 16

Fórmula del producto con reemplazo del 34% por ceniza volante. Precio por componente

| Componente | Precio por kilogramo (COP) | Cantidad por tonelada (kg) | Precio por tonelada (COP) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| ARGOS Cement concrete ART grey | 565 | 269 | 151.985 |
| Sand/CO Coarse 8-30 | 252 | 145 | 36.540 |
| Sand/CO arena tipo C | 87 | 385 | 33.495 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 3359 | 28 | 94.052 |
| Carbonato de calcio malla 150 | 322 | 33 | 10.626 |
| Ceniza volante | 264 | 140 | 36.960 |
| Total | - | 1.000 | 363.658 |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Siguiendo la Tabla 16, al agregar ceniza volante en un porcentaje de reemplazo del 34%, el costo de materias primas para producir una tonelada de mortero es 363.658 pesos colombianos, 42.140 pesos menos que el precio de la fórmula tradicional, es decir, el costo se reduce un 10,4%.

Tomando en cuenta los resultados del apartado anterior y el presente, se determina que la mejor alternativa entre las propuestas es el tratamiento 2, puesto que es aquel que mantuvo la resistencia a la compresión esperada según la empresa productora y el que más se asemejó a los resultados obtenidos del grupo control. Este tratamiento se considera superior al tratamiento 1 debido a que la reducción en costos de producción de este último es de apenas 3%, mientras el T2 ofrece un 5% de disminución. También se considera superior al tratamiento 4 debido a que si bien es la alternativa económicamente más benéfica y este demostró alcanzar la resistencia esperada a los 28 días, su comportamiento durante las anteriores fallas a las edades de 3 y 7 días fue deficiente, haciéndolo una alternativa impredecible y generando duda razonable en las investigadores, esto a pesar de que la literatura sugiere que los porcentajes de reemplazo óptimos que suelen utilizarse están entre el 15% y 35% (Xicotécatl-Valle, 2024).

Por los motivos anteriores, el tratamiento 2 con un porcentaje de reemplazo del 18% se posiciona como el más recomendable. Al aplicar estos cambios y reducir el costo, el precio por kilogramo del producto podría disminuir de 6.430 pesos colombianos a 6.076 pesos, por lo cual ya no sería el más costoso del mercado, pues quedaría detrás del Mapefill GP.

Efecto en el medio ambiente

El cálculo de la huella de carbono del producto (HCP), expresada como dióxido de carbono equivalente (CO₂e) es la unidad usada para indicar los gases de efecto invernadero

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

(GEI) que se liberan a la atmósfera durante el ciclo de vida de un producto y que contribuyen al calentamiento global (ICONTEC, 2021). El cálculo de la HCP se realizó a través de la sumatoria de los productos de la cantidad de cada uno de los componentes del mortero, en la fórmula original y con cada uno de los tratamientos, por el factor de emisión (FE) correspondiente, tal como lo establece la norma NTC-ISO 14067:2021 establecida por ICONTEC (2021).

$$HCP = \sum_1^n \text{Componente} \times FE$$

Por lo tanto:

Tabla 17

Factor de emisión de GEI para cada componente del mortero

| Componente | Factor de emisión (FE) |
|--------------------------------|------------------------|
| ARGOS Cement concrete ART grey | 0,507 |
| Sand/CO Coarse 8-30 | 0,009 |
| Sand/CO arena tipo C | 0,009 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | --- |
| Carbonato de calcio malla 150 | 0,300 |
| Ceniza volante | 0,007 |

En la Tabla 17 se muestran los FE para cada componente del mortero, de su observación se desprende que el cemento es el elemento que mayor contribución hace a la HCP y la ceniza volante es el que menos aporta.

Tabla 18

Huella de carbono del mortero en su fórmula original y con cada uno de los tratamientos

| Componente | Huella de carbono en kilogramos de CO ₂ e | | | | |
|--------------------------------|--|--------|--------|--------|--------|
| | Fórmula original | T1 | T2 | T3 | T4 |
| ARGOS Cement concrete ART grey | 207,36 | 187,08 | 170,35 | 153,11 | 136,38 |
| Sand/CO Coarse 8-30 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,31 |
| Sand/CO arena tipo C | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,47 |
| Carbonato de calcio malla 150 | 10,90 | 10,90 | 10,90 | 10,90 | 10,90 |
| Ceniza volante | - | 0,28 | 0,51 | 0,75 | 0,98 |

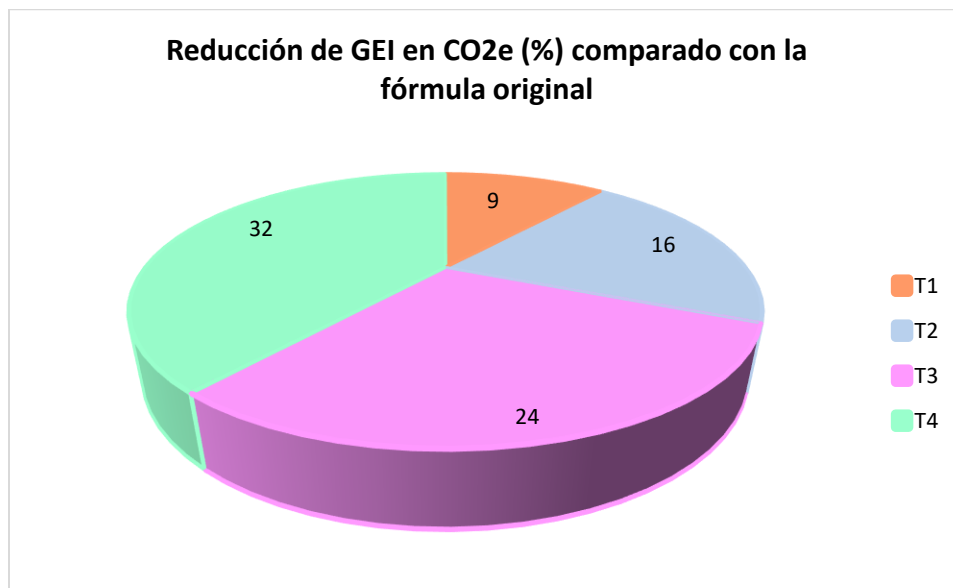
Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| | | | | | |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Premezcla SikaGrout-212 CO | - | - | - | - | - |
| Total | 212,03 | 202,03 | 185,53 | 168,53 | 152,03 |

Esta tabla muestra el valor de la HCP del mortero en su fórmula original, así como con cada uno de los tratamientos experimentales, los valores están expresados en kilogramos de CO₂e para la producción de una tonelada de Sika Grout-212.

Tomando como referencia los 212,03 kg de CO₂e de la fórmula original, se puede deducir que el T1 ofrece una reducción del 9,01% en los GEI emitidos a la atmósfera, el T2 reduciría en 16,44% los GEI, el T3 representa una disminución del 24,01% de los mismos y el T4 por su parte contribuye con un 31,53% a este propósito, lo anterior se muestra en la Figura 7.

Figura 7
Porcentaje de reducción de emisión de GEI por tratamiento



Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Figura 8

Porcentajes de reemplazo por tratamiento



La Figura 8 muestra los porcentajes de reemplazo descritos ya en numerosas ocasiones. 10% para el T1, 18% para el T2, 26% para el T3 y 34% para el T4. Fueron graficados de la misma forma que los porcentajes de disminución de CO_{2e} de la Figura 7 para facilitar la comparación visual entre ellas.

Si se analiza de forma aislada el efecto de la utilización de cenizas volantes tipo F en la producción del mortero mediante el reemplazo de un porcentaje de material cementante en la mitigación del impacto ambiental, se puede asegurar que a mayor porcentaje de reemplazo hay mayor efecto en la reducción de GEI emitidos a la atmósfera como consecuencia de las materias primas utilizadas. Esto se observa al comparar las Figuras 7 y 8, puesto que los valores de reemplazo y de reducción son muy similares entre sí.

Finalmente y para facilitar el análisis, la Tabla 19 muestra el consolidado de los resultados en las tres variables dependientes para cada tratamiento.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Tabla 19

Consolidado de resultados para cada tratamiento

| Tratamiento | Porcentaje de reemplazo | Resistencia a la compresión (MPa) | Costo de materias primas (COP) | Huella de carbono (kg de CO_{2e}) |
|--------------------|------------------------------------|--|---|--|
| T1 | 10% | 44,24 | 393.668 | 202,03 |
| T2 | 18% | 45,57 | 383.825 | 185,53 |
| T3 | 26% | 34,57 | 373.591 | 168,53 |
| T4 | 34% | 44,30 | 363.658 | 152,03 |

Nota. La tabla muestra el porcentaje de reemplazo de cemento por cenizas volantes para cada tratamiento, su resistencia a la compresión promedio en la falla a los 28 días, el costo de las materias primas para su producción en pesos colombianos y la huella de carbono en kilogramos de dióxido de carbono equivalente.

Realizando el análisis integral del mortero SikaGrout-212 con los distintos tratamientos planteados y tomando en cuenta los resultados del reemplazo en las características físico-mecánicas, en el costo de producción y el impacto en el medio ambiente, se ratifica que el tratamiento 2 (T2) que corresponde a una sustitución del 18% de cemento por cenizas volantes tipo F, es el que satisface los requisitos planteados.

La hipótesis de que el reemplazo del material cementante por el material alternativo en la mezcla mejoraría la resistencia a la compresión del mortero queda probada para el tratamiento seleccionado como el mejor (T2) puesto que en todas las edades de ensayo y de forma consistente se superaron los valores de resistencia ofrecidos por Sika y en el peor de los casos se mantuvo.

Del mismo modo, se cumple con la meta de lograr una reducción en el costo de producción, puesto que con todos los tratamientos se consiguió que los materiales componentes tuviesen un costo menor. En el caso del tratamiento seleccionado (T2), la reducción es del 5,5%, con lo cual el producto aumenta su competitividad, ya que deja de ser el más costoso en el segmento de mercado donde se desempeña.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Finalmente, el T2 satisfizo los dos primeros requisitos a la vez que el tercero, pues con esta intervención, la emisión de GEI se reduce en un 16,44%, es decir que el reemplazo contribuye también a minimizar el impacto ambiental al impedir que dichos gases se liberen en la atmósfera, demostrando el compromiso con el medio ambiente y alineándose con las expectativas que organizaciones como la ONU tienen de las corporaciones en la actualidad.

La norma NTC 3493:2023 “Cenizas del carbón y puzolanas naturales calcinadas o crudas, para el uso en el concreto”, establece 3 tipos de estos materiales: Clase N que son puzolanas naturales, y Clase F y Clase C que son cenizas del carbón. Entre estas dos últimas la diferencia en cuanto a los requisitos químicos radica en el porcentaje de óxido de calcio (CaO), que en la Clase F es máximo 18% y en la Clase C debe ser mayor de 18%, en los requisitos físicos no hay diferencia alguna (ICONTEC, 2023).

Esta diferencia química hace que las cenizas tipo F tengan propiedades puzolánicas y que las tipo C tengan propiedades cementantes además de las puzolánicas, como lo establece la misma norma. Esto significa que las tipo F pueden desarrollar compuestos con propiedades cementantes cuando el CaO reacciona químicamente en presencia de agua, por el contrario, las cenizas tipo C se consideran en sí mismas materiales cementantes suplementarios porque favorece las propiedades en una mezcla cementante al reaccionar con agua, lo anterior según lo define la norma NTC 385:2019 “Terminología relativa al concreto y sus agregados” de ICONTEC (2019).

Esto explica que los resultados de la resistencia a la compresión obtenidos estén apenas por encima de lo especificado en la ficha técnica del mortero SikaGrout-212 sin gran diferencia, mientras que si se hubiese usado ceniza tipo C quizá se hubiesen logrado valores mayores en esta por las características cementantes que poseen.

6. Discusión y recomendaciones

Los resultados obtenidos en la presente investigación muestran los efectos del reemplazo de material cementante por cenizas volantes en cuanto a la resistencia a la compresión, el costo de materias primas, y la emisión de GEI, habiendo compatibilidad entre los hallazgos de este estudio y aquellos que se encuentran en la literatura.

Se escogieron 4 tratamientos o porcentajes de reemplazo, además de un grupo control con el fin de fortalecer la validez de los resultados, similar a lo reportado por Xicoténcatl-Valle (2024) y Abdulhasan et al., (2018). Asimismo, los porcentajes de reemplazo utilizados se asemejan a aquellos de estudios previos, sugiriéndose por lo general porcentajes mínimos del 5% y máximos del 35% (Hsu et al., 2018), siendo así que los porcentajes de 10%, 18%, 26% y 34% se encuentran dentro de dicho rango. De este modo se cumplieron unas características básicas de replicabilidad, facilitando la comparación entre hallazgos.

Se encontró que los tratamientos 1 y 2 correspondientes a los reemplazos de 10% y 18% fueron aquellos que se acercaron más al comportamiento del mortero de referencia, manteniendo el 83% y el 86% de la resistencia obtenida en este a los 28 días de falla, resultado considerado aceptable para su uso y dentro de los márgenes esperados, que son de mínimo entre el 75% (Patil et al., 2021) y el 80% (Moses et al., 2020) de la resistencia original. El tratamiento 2 (18%) obtuvo el mejor desempeño, acercándose dicho porcentaje de sustitución al 20% reportado por Mahdi-Olewi (2021) y Patil et al., (2021) como el que mejor mantiene las propiedades físico-mecánicas en su estudio, por lo que es posible que si se hubiere realizado los ensayos con este porcentaje se consiguiesen resistencias más altas, esto sin desconocer que el comportamiento del tratamiento igual resultó ser satisfactorio.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Respecto al tratamiento 4 (34%), cuyo desempeño fue deficiente en las fallas a los 3 y 7 días, pero que logró resistencias a la compresión equiparables con los dos primeros tratamientos a los 28 días, esto puede deberse a que por efecto de la actividad puzolánica derivada de las cenizas volantes, son comunes las demoras en el desarrollo de la resistencia a la compresión (Qadir et al., 2019). Además, el porcentaje de reemplazo en este tratamiento se asemeja también a los porcentajes ideales de 30% y 35% reportados en otras fuentes (Moses et al., 2020). En el caso del tratamiento 3 cuyos resultados fueron insatisfactorios para todas las fallas, es posible que desarrollase su resistencia a una velocidad incluso inferior a la del tratamiento 4, lo cual podría comprobarse al extender los ensayos hasta, por ejemplo, 90 días. También es posible que el error humano haya afectado los resultados.

Con los tratamientos aplicados de cenizas volantes se obtuvo una disminución en los costos de materiales para la producción de hasta el 10%, lo cual posibilita la baja del precio de venta, posicionando el producto de forma estratégica en el mercado al quitarle el título de más costoso del segmento, o, aumentaría el margen de ganancias en caso de que dicha disminución al precio de venta no ocurriese. Este hallazgo es congruente con estudios previos donde se analizó también el costo de los materiales luego de reemplazar parcialmente el material cementante, como aquel llevado a cabo por Zafar (2022), donde se obtuvo porcentajes de disminución de costos del 22,1% y 21,5% en dos alternativas de tratamiento. La razón por la que estos porcentajes son mayores a los encontrados en esta investigación es que en el estudio citado se utilizaron porcentajes de reemplazo de 50% y 60%, y se realizó el reemplazo de la arena de río por desechos de cantera.

Por otro lado, Bala et al., (2024) concluyeron que con el reemplazo de material cementante por cenizas volantes del 15% se logra una disminución significativa del costo de

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

producción, y que cualquier disminución de costos con un porcentaje de reemplazo mayor es mínima, puesto que se comprometen las propiedades de durabilidad del producto, de modo que los resultados obtenidos concuerdan, puesto que con tratamientos como el 3 y 4 cuyo porcentaje de reemplazo es mayor, la reducción de costos va de la mano con la de la resistencia del mortero.

La sustitución parcial realizada en cada tratamiento consiguió minimizar el impacto ambiental de la producción del mortero a través de la disminución en la emisión directa de GEI en términos de CO₂ equivalente hasta en 32%, siendo del 16% para el tratamiento seleccionado como el mejor. Un resultado inesperado fue que el porcentaje de reemplazo y su respectivo porcentaje de reducción de emisión de GEI son casi idénticos, sin embargo, este hallazgo es similar a aquel hecho por Razi et al., (2016), que encontraron una reducción máxima en la emisión de GEI del 56% cuando el porcentaje de reemplazo era de 60%. Además, descubrieron que el uso de cenizas volantes en morteros reduce la toxicidad del suelo de entre 5% y 27% debido a que no son desechadas.

De modo similar, Navaratnam et al., (2023) determinaron que un mortero con contenido de cenizas volantes del 15% tiene un impacto ambiental menor, particularmente en la salud humana, el ecosistema y los recursos naturales, dado que utiliza menos cemento a la vez que aprovecha un residuo producido por la mayoría de las industrias, por lo cual los tratamientos realizados en la presente investigación no sólo impactan de forma directa las emisiones ya mencionadas, sino que indirectamente reducen su influencia en dichos indicadores. El estudio indica además que el reemplazo del 15% de material cementante por cenizas volantes en morteros a nivel mundial podría generar un ahorro monetario de hasta 87,74 billones de dólares.

Para futuras investigaciones se recomienda en cuanto a los aspectos metodológicos la elaboración de un presupuesto para el estudio, ya que si bien puede que no se incurra en gastos

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

monetarios, particularmente cuando se tiene acceso a materiales e instalaciones por cuenta de una institución o empresa, puede que inesperadamente sea necesaria la realización de ensayos o trámites adicionales que impliquen una inversión.

Asimismo, se recomienda la elaboración de una matriz de referencias donde se consigne la literatura estudiada incluyendo los datos de identificación más relevantes para cada estudio, así como clasificaciones o descripciones de la temática de los mismos con relación al vacío de conocimiento que subsanan. Otra recomendación importante va encaminada hacia el registro de la información del proceso experimental por medio de fotografías ordenadas cronológicamente, esto permite recordar u observar detalles que tal vez no son identificados durante la realización de los ensayos así como corroborar datos sobre los que puedan surgir dudas.

Referente al progreso del campo de investigación, se expanden los intereses hacia la búsqueda de más alternativas para la sustitución total o parcial de materiales tradicionales más allá del cemento. Entre las alternativas que junto con las cenizas volantes están ganando popularidad están el bagazo de caña, la cascarilla de arroz, el vidrio molido, la nanocelulosa, entre otros. Otro subcampo en desarrollo es aquel de las mezclas híbridas de dos o más materiales no convencionales, similares a los ya existentes como, por ejemplo, cenizas volantes y escoria de alto horno, pero implementando aquellos materiales de origen natural ya mencionados.

7. Conclusiones

Esta investigación se propuso el reemplazo de cemento por cenizas volantes en un mortero de reparación tipo Grout, esto para comprobar la hipótesis de que la adición de cenizas volantes tipo F como material sustituto del cemento en la fórmula de dicho mortero mejoraría su resistencia a la compresión. Adicionalmente, plantearon las hipótesis de que con la alternativa: el impacto sobre los costos de producción, en términos de materias primas y el impacto ambiental, en términos de emisión directa de GEI a la atmósfera por cuenta también de las materias primas, sea favorable.

Los resultados comprobaron el cumplimiento parcial de la hipótesis dado que la resistencia a la compresión evaluada a los 28 días fue mayor o cuando menos igual que la resistencia que ofrece el producto con la fórmula actual para la consistencia fluida. Esto demuestra que las cenizas volantes son una buena alternativa en este aspecto; adicionalmente, los costos de la nueva fórmula propuesta se redujeron en comparación con la vigente y en el aspecto ambiental la emisión directa de GEI hacia la atmósfera disminuyó en un porcentaje muy cercano al del reemplazo.

Para el campo de estudio de materiales de construcción sostenibles esta investigación contribuye al demostrar que la utilización de cenizas volantes en la fabricación de morteros es viable desde el punto de vista de la tecnología de materiales, puesto que propiedades físicas y mecánicas como la consistencia y la resistencia a la compresión no se vieron afectadas significativamente. El conocimiento genera nuevo conocimiento lo que es beneficioso para los investigadores y académicos que pueden conocer que en el campo de los morteros tipo Grout, poco explorado hasta el momento, también se puede usar materiales alternativos sin que se vean afectadas las reacciones químicas y las prestaciones del producto desarrollado.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Respecto a la industria de la construcción más allá de lo académico, los morteros tipo Grout por sus características específicas como la capacidad de ser vertido sin que sus componentes se separen o segreguen, se utilizan en una variedad de aplicaciones que requieren alta resistencia, adherencia y estabilidad volumétrica, como la cimentación de columnas prefabricadas de acero o concreto o de equipos sometidos a vibraciones por cargas dinámicas; el anclaje de pernos para sujeción de estructuras; rellenos de nivelación para cimentación de neoprenos o aisladores sísmicos de vigas en puentes y equipos y maquinaria industrial; también para reparaciones que requieran inyecciones de mortero estructural como resane de hormigueros, reparación estructural de concreto; elaboración de concreto sin contracción para rellenos estructurales, etc. Con la nueva fórmula estos usos se potencian porque debido a la finura de las cenizas, cabe la posibilidad que el mortero tenga menor permeabilidad lo que contribuye a la durabilidad de las obras.

Desde el punto de vista empresarial también es viable la incorporación de cenizas volantes en la composición del mortero tipo Grout puesto que la hipótesis de trabajo fue comprobada. Para los productores de morteros como MAPEI, BASF, Toxement, por mencionar algunos y por supuesto Sika, contar con estudios como este es beneficioso porque los hallazgos suponen implicaciones prácticas en sus procesos productivos, ya que indican que los costos de las materias primas disminuyen. Y no solo esto, sino que también demuestra que es posible desarrollar nuevos productos en este segmento con menor cantidad de cemento, que es el material más costoso en este tipo de fórmulas, lo que impacta en las ganancias de la compañía y posiciona el producto estratégicamente entre los homólogos fabricados por sus competidores en este sector.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

En la misma línea empresarial, el hecho que lo encontrado en esta investigación contribuya a la sostenibilidad ambiental, también implica que los productores de morteros pueden ser beneficiarios de las subvenciones o incentivos tributarios que los gobiernos conceden por las acciones tendientes a contrarrestar el cambio climático.

Continuando con dicha sostenibilidad ambiental, la hipótesis también es comprobada, ya que la presencia de cenizas volantes disminuyó la huella de carbono, lo que colabora activamente con el propósito de las empresas de disminuir los GEI que se emiten a la atmósfera cuantificados como CO₂e, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por la ONU y con las políticas corporativas de Sika, máxime cuando las especificaciones del producto se mantienen.

Por todo lo anterior, la incorporación de cenizas volantes en la composición de los morteros de reparación es una buena opción desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, lo que contribuye a la innovación en el desarrollo de materiales para la construcción.

Derivado de este estudio se abre la puerta a nuevas indagaciones científicas como el uso de materiales con cualidades puzolánicas similares a las de las cenizas volantes de forma individual o mezclados con otros residuos de los procesos industriales.

Referencias

- Abdalla, A., & Mohammed, A. (2022). Surrogate Models to Predict the Long-Term Compressive Strength of Cement-Based Mortar Modified with Fly Ash. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(5), 4187-4212. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09734-7>
- Abdulhasan, A., Idan, F., & Zuboon, K. (2018). Effect the Local Fly Ash on Cement Mortar Properties. *Journal of University of Babylon, Engineering Sciences*, 26(5), 383-394. <https://www.iasj.net/iasj/download/87e0d6c96f8fc1b9>
- Alvarado, A., Patiño, V., Balladares, M., & Patiño, W. (2018). Mucosa nasal y determinación de alteraciones psicopatológicas por exposición al cemento. *Dominio de las Ciencias*, 3(4), 602-612. <https://doi.org/2477-8818>
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2016). *Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)*. ASTM: <https://www.astm.org/standards/c939>
- Angulo, V., & Aguilar, O. (2021). Influence of the Addition of 2%, 3%, and 5% of Fly Ash on the Physical-Mechanical Properties of Cement Mortar [Conference]. *Prospective and trends in technology and skills for sustainable social development. Leveraging emerging technologies to construct the future: Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.142>
- Arias, J. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. Editorial ENFOQUES CONSULTING EIRL.
- Asociación de Productores de Cemento [ASOCEM]. (2019). *Panorama mundial de la industria del cemento*. ASOCEM: <http://www.asocem.org.pe/archivo/files/Vision%20General%20de%20la%20Industria%20del%20Cemento%20y%20sus%20Principales%20Actores.pdf>
- Bala, A., Gupta, S., & Shelote, K. (2024). Durability and Cost Analysis of High-Volume Fly Ash Blended Self-Compacting Mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(3). <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-16780>
- Becerra, O. (2019). Análisis de la aplicación de procesos de mejora para reducir la contaminación en la salud de la población y el medio ambiente por polución de cemento en empresas concreteras. *Repositorio Universidad del Norte*.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

- Cámara Colombiana del Cemento y del Concreto [PROCEMCO]. (2021). *Hoja de Ruta Colombia Industria del Cemento*. <https://procem.co/pdf/hoja-de-ruta/hr-colombia-final-11032021.pdf>
- Campdesuñer, C., Alena, B., & Antúnez, A. F. (2015). La contaminación ambiental, problemática del desarrollo sostenible en la producción de cemento. *Cub@: Medio Ambiente Y Desarrollo*, 15(29), 4. <https://doi.org/https://cmad.ama.cu/index.php/cmada/article/view/214>
- Cedeño-Valdiviezo, A. (2011). Aglomerantes, morteros y aplanados adecuados para proteger el medioambiente. *Revista de Arquitectura*, 13, 106-117. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=125121298012>
- Chandías, M. (1992). *Introducción a la construcción de edificios*. Librería y editorial Alsina.
- Cyprowski, M., Zapór, L., Marciniak, L., Golofit-Szymczak, M., Ławniczek-Wałczyk, A., Stobnicka-Kupiec, A., & Górny, R. (2023). 93 Microbial Contaminants and Pro-Inflammatory Properties of Organic Dust From Different Occupational Settings. *Annals of Work Exposures and Health*, 67(1). <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac087.067>
- Davidovits, J. (1978). *Geopolymer: Chemistry and Applications*.
- Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2021). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia*.
- Du, S., Zhao, Q., & Shi, X. (2023). Quantification of the reaction degree of fly ash in blended cement systems. *Cement and Concrete Research*, 167, 107-121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107121>
- Ebid, A. M., Onyelowe, K. C., Kontoni, D.-P. N., Quintana Gallardo, A., & Hanandeh, S. (2023). Heat and mass transfer in different concrete structures: a study of self-compacting concrete and geopolymer concrete. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 18, 404-411. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad022>
- Florez-Moreno, W. (2024). Comunicación personal.
- Free Software Foundation. (2007). *GNU Affero General Public License*. GNU: <https://www.gnu.org/licenses/agpl-3.0.html>
- Galarza, C. (2020). Los alcances de una investigación. *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 9(3), 1-6.
- García, L. (2021). *Crisis ambiental en Colombia*. Universidad Central: <https://www.ucentral.edu.co/noticentral/crisis-ambiental-colombia>

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

- Gessa, A., & Sancha, M. (2016). Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la producción de cemento. Propuesta de un modelo de evaluación. *Innovar*, 26(60), 51-66. <https://doi.org/10.15446/innovar.v26n60.55532>
- Gjorv, O. (2014). *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century*. (S. Koji, Ed.) CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482272215>
- Global Concrete and Cement Association [GCCA]. (2021). *Key Facts*. GCCA: <https://gccassociation.org/key-facts/>
- Gobierno de Colombia. (2005). *Decreto 4741 de 2005*. Ministerio de Ambiente: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718>
- Gobierno de Colombia. (2022). *Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono*.
- Godínez, D., Rodríguez, A., González, O., & Caparrós, Y. (2022). Evaluación ambiental en la comercializadora de cemento Camagüey. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 49, 17-20. <https://doi.org/ISSN:2684-0073>
- Gómez, M. (2009). *Introducción a la metodología de la investigación científica* (Segunda ed.). Brujas.
- González, A. (2014). Comportamiento frente a la durabilidad de morteros de reparación de cemento modificados con polímeros. *Repositorio Universidad Politécnica de Madrid*. <http://purl.org/dc/dc/mitype/Text>
- Goss-Sampson, M. A. (2022). *Statistical Analysis in JASP. A Guide for Students* (Quinta ed.). JASP. <https://jasp-stats.org/wp-content/uploads/2022/04/Statistical-Analysis-in-JASP-A-Students-Guide-v16.pdf>
- Grimmeissen, L., Jensen, A., & Wehner, S. (2020). *Hoja de ruta para el desarrollo de bajas emisiones en la Industria Chilena del Cemento*. Proyecto Mecanismos y Redes de Transferencia de Tecnología Relacionada con el Cambio Climático en América Latina y el Caribe.
- Gutiérrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Universidad Nacional de Colombia.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta ed.). McGraw-Hill.
- Hsu, S., Chi, M., & Huang, R. (2018). Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar. *Construction and Building Materials*, 176, 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.060>

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

- Huaquisto Cáceres, S., & Belizario Quispe, G. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Journal of High Andean Research*, 20(2), 225-234. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.366>
- IBM. (2024). *ANOVA de un factor: Contrastes Post-hoc*. <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/saas?topic=anova-one-way-post-hoc-tests>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC]. (2019). *NTC 385: 2019 Terminología relativa al concreto y sus agregados*. ICONTEC: <https://tienda.icontec.org/gp-terminologia-relativa-al-concreto-y-sus-agregados-ntc385-2019.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC]. (2021). *NTC 121:2021 Especificación de desempeño para cemento hidráulico*. ICONTEC: <https://tienda.icontec.org/gp-especificacion-de-desempeno-para-cemento-hidraulico-ntc121-2021.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC]. (2021). *NTC-ISO 14067:2021 Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos. Requisitos y directrices para cuantificación*. ICONTEC: <https://tienda.icontec.org/catalog/product/view/id/23444/s/gp-ntc-iso-gases-de-efecto-invernadero-huella-de-carbono-de-productos-requisitos-y-directrices-para-cuantificacion-ntc-iso14067-2021/category/2/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC]. (2024). *NTC 220: 2024 Método de ensayo para determinar la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm (2 pulgadas) de lado*. ICONTEC: <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-me-a-todo-de-ensayo-para-determinar-la-resistencia-de-morteros-de-cemento-hidre-aulico-a-la-compresie-a-n-usando-cubos-de-50-mm-2-pulgadas-de-lado-ntc220-2024.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (2023). *NTC 3493:2023 Cenizas de carbón y puzolanas naturales calcinadas o crudas, para uso en el concreto*. ICONTEC: <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-cenizas-de-carbon-y-puzolanas-naturales-calcinadas-o-crudas-para-uso-en-el-concreto-ntc3493-2023.html>
- Jaimes, C., & Montaña, L. (2022). Análisis ambiental de los efectos del uso del cemento basado en estudios a nivel mundial. *Repositorio Universidad Mariana*.
- JASP Team. (2024). *JASP (Version 0.19.1) [Computer software]*. <https://jasp-stats.org/>
- Jiménez-Becerra, I. (2020). *El triángulo lógico: una ecuación didáctica emergente para aprender metodología de la investigación*. Universidad de la Sabana.
- Kurbetci, S., Nas, M., & Sahin, M. (2022). Durability properties of mortars with fly ash containing recycled aggregates. *Advances in Concrete Construction*, 13(1), 101-111. <https://doi.org/10.12989/acc.2022.13.1.101>

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

- León, A., & Guillén, V. (2020). Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación el cemento en Ecuador. *Ambiente Construido*, 20(3), 611-625. <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/91532>
- Lerma, H. (2016). *Metodología de la investigación: propuesta, anteproyecto y proyecto* (Quinta ed.). ECOE.
- Mahdi-Olewi, S. (2021). Compressive Strength of Mortar with Partial Replacement of Cement by Fly Ash and GGBFS. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 14(4), 147-156. <https://doi.org/10.24237/djes.2021.14412>
- Matallana, R. (2019). *El concreto. Fundamentos y nuevas tecnologías*. Corona. <https://doi.org/978-958-57497-4-0>
- Mironyuk, I., Tatarchuk, T., Paliychuck, N., Heviuk, I., Horpynko, A., Yarema, O., & Mykytyn, I. (2021). Effect of surface-modified fly ash on compressive strength of cement mortar. *Materials Today: Proceedings*, 35(4), 534-537. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.016>
- Molina Bas, O. (2018). La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Pórtland en la durabilidad del hormigón. *Universidad Politécnica de Madrid*. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.1139>
- Moscoso, I., Abarca, R., Cruz, R., & Aceituno, C. (2022). *Rompiendo paradigmas en la investigación científica*. Atenea Editoras.
- Moses, P., Chockalingam, M., Venkatakrishnaiah, R., & Dayakar, P. (2020). Strength Aspects of Fly Ash in Cement Mortar. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Techonology [IJARET]*, 11(1), 38-44. <https://doi.org/10.34218/IJARET.11.1.2020.006>
- Mutlu, S., Atici, Ö., & Gülen, Y. (2013). Cement dust pollution induces toxicity or deficiency of some essential elements in wild plants growing around a cement factory. *Toxicology and Industrial Health*, 29(5), 474-480. <https://doi.org/10.1177/0748233712442727>
- Narváez, O., & Villegas, L. (2014). *Introducción a la investigación: guía interactiva*. Universidad Veracruzana.
- Navaratnam, S., Tushar, Q., Jahan, I., & Zhang, G. (2023). Environmental Sustainability of Industrial Waste-Based. *Sustainability*, 1873(15). <https://doi.org/10.3390/su15031873>
- Neville, A. (2013). *Tecnología del concreto* (Cuarta ed.). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

- Nihalani, S. A., Mishra, Y. D., & Meeruty, A. R. (2020). Handling and Utilisation of Fly Ash from Thermal Power Plants. En S. K. Ghosh, & V. Kumar, *Circular Economy and Fly Ash Management* (págs. 1-11). Springer.
- O'Brien, K. R., Ménaché, J., & O'Moore, L. M. (2019). Impact of fly ash content and fly ash transportation distance on embodied greenhouse gas emissions and water consumption in concrete. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *14*(7), 621-629.
<https://doi.org/10.1007/s11367-009-0105-5>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2022). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. ONU: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Población*. ONU: <https://www.un.org/es/global-issues/population#:~:text=El%2015%20de%20noviembre%20de,a%208000%20millones%20de%20habitantes.>
- Patil, C., Manjunath, M., Hosamane, S., Bandekar, S., & Athani, R. (2021). Pozzolonic activity and strength activity index of bagasse ash and fly ash blended cement mortar. *Materials Today: Proceedings*, *42*(2), 1456-1461. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.251>
- Poletanovic, B., Dragas, J., Ignjatovic, I., Komljenovic, M., & Merta, I. (2020). Propiedades físicas mecánicas del alk reforzado con fibra de cáñamo. *Materiales de Construcción y Construcción*, *259*(119). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119677>
- Predicatori, F., Intini, B., Frontero, P., Martinelli, C., Culmone, L. R., Brunelli, S., . . . & Mattiolo, G. (2009). Influence of a cement industry on the fine and ultrafine particles composition in a rural area. *Radiation Protection Dosimetry*, *137*(3-4), 288-293.
<https://doi.org/10.1093/rpd/ncp224>
- Qadir, W., Ghafor, K., & Mohammed, A. (2019). Characterizing and Modeling the Mechanical Properties of the Cement Mortar Modified with Fly Ash for Various Water-to-Cement Ratios and Curing Times. *Advances in Civil Engineering*, *2019*(1).
<https://doi.org/10.1155/2019/7013908>
- Ramjan, S., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., Chee, C., Jitsangiam, P., & Suwan, T. (2021). Influence of Cement Replacement with Fly Ash and Ground Sand with Different Fineness on Alkali-Silica Reaction of Mortar. *Materials*, *14*(6).
<https://doi.org/10.3390/ma14061528>
- Razi, P. Z., Razak, H. A., & Khalid, N. H. (2016). Sustainability, Eco-Point and Engineering Performance of Different Workability OPC Fly-Ash Mortar Mixes. *Materials*, *341*(9).
<https://doi.org/10.3390/ma9050341>

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

- Rivera, J., Trejos, C., & Quevedo, J. (2021). Evaluación financiera de la industria del cemento, cal y yeso en Colombia (2014-2019). *Revista Activos*, 19(1).
<https://doi.org/10.15332/25005278.6687>
- Rivva, E. (2000). *Naturaleza y materiales del concreto*. Capítulo Peruano ACI.
- Salirrosas, J. (2020). Geopolímeros en la industria de la construcción: aplicaciones con ceniza volante y puzolana natural. *Pontificia Universidad Católica del Perú*.
https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/17208/SALIRROSAS_TANTA_JORGE_GEOPOL%C3%8DMEROS_INDUSTRIA_CONSTRUCCI%C3%93N.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Los%20geopol%C3%ADmeros%20son%20materiales%20cementicios,de%20contaminantes%2
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (Quinta ed.). Bhandar Editores Ltda.
- Sukumar, B., Nagamani, K., & Srinivasa-Raghavan, R. (2008). Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1394-1401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.005>
- Taylor, P., & Tait, R. (1999). Effects of fly ash on fatigue and fracture properties of hardened cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, 21(3), 223-232.
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00005-0)
- Thuy, N., & Lam, N. T. (2023). Investigation of Potential Alkali-Silica Reaction of Different Types of Aggregate in Mortar with and Without Fly Ash. En R. V. Rao, S. Khatir, & T. Cuong-Le, *Recent Advances in Structural Health Monitoring and Engineering Structures* (págs. 279-285). Springer Nature.
- Xiao, M., Xi, J., Qiu, P., Deng, C., Lii, F., Wei, J., . . . Yu, Q. (2024). Evaluation of tensile properties and cracking potential evolution of fly ash-cement mortar at early age based on digital image correlation method. *Construction and Building Materials*, 412.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134855>
- Xicoténcatl-Valle, J. (2024). Uso sustentable de las cenizas volantes para la fabricación de hormigón y reducción de emisiones de CO₂. *Universidad Autónoma del Estado de Morelos*.
- Xu, A., Sarkar, S. L., & Nilsson, L. O. (1993). Effect of fly ash on the microstructure of cement mortar. *Materials and Structures*, 26, 414-424. <https://doi.org/10.1007/BF02472942>
- Yu, Y., Yu, J., & Ge, Y. (2016). Water and chloride permeability reserach on ordinary cement mortar and concrete with compound admixture and fly ash. *Construction and Builind Materials*, 127, 556-564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.103>

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Zafar, I. (2022). Sustainable Alternatives for Green Mortar: Quarry Waste and Ultra High Fly Ash Utilization. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1026.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1026/1/012034>

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Apéndices

Apéndice A. Formatos de recolección de datos

| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | | | | | | | |
|--|---------------|------|---------------|--------------------------------------|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | | | | | | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 1 | | | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 | | | | |
| Fecha (día-mes-año): <u>8/02/2024</u> | | | | | | | | |
| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 0 | B1C13D | 3 | 50 | 32,42 | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1227 | 40,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 0 | 0 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 0 | B1C17D | 7 | 50 | 44,25 | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1227 | 40,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 0 | 0 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 0 | B1C128D | 28 | 50 | 48,39 | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1227 | 40,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 0 | 0 | | | | | | |

Observaciones:

Tipo de falla

1

2

3

4

5

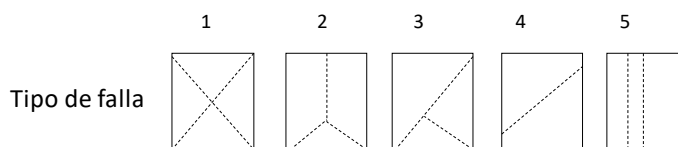
Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Fecha (día-mes-año): 8/02/2024






| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla |
|--|------|------|---------------|---------|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 0 | B2C13D | 3 | 50 | 36,41 | 35,2 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1227 | 40,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B2C23D | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 0 | 0 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 0 | B2C17D | 7 | 50 | 31,8 | 30,8 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1227 | 40,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B2C27D | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 0 | 0 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 0 | B2C128D | 28 | 50 | 54,34 | 43,33 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1227 | 40,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B2C228D | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 0 | 0 | | | | | | |

Observaciones:

| |
|--|
| |
| |



Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | | | | | | | | |
|--|---------------|-----------|---------------|--------------------------------------|---|--|---|---|---|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | | | | | | | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 3 | | | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 | | | | | |
| Fecha (día-mes-año): | | 8/02/2024 | | | | | | | |
| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 0 | B3C13D | 3 | 50 | 34 | | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | B3C23D | | 50 | 30,07 | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1227 | 40,9 | | B3C33D | | 50 | 35,38 | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 0 | 0 | | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 0 | B3C17D | 7 | 50 | 40,12 | | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | B3C27D | | 50 | 37,1 | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1227 | 40,9 | | B3C37D | | 50 | 29,82 | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 0 | 0 | | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 0 | B3C128D | 28 | 50 | 50,7462687 | | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | B3C228D | | 50 | 44,880597 | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1227 | 40,9 | | B3C328D | | 50 | 52,8059701 | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 0 | 0 | | | | | | | |
| Observaciones: | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Tipo de falla | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |  |  |  |  |  |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout






| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | | | | | | | |
|--|---------------|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | | | | | | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 4 | | | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 | | | | |

Fecha (día-mes-año): 8/02/2024

| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla |
|--|------|------|---------------|-----------|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 1 | B1C13DT1 | 3 | 50 | 31,51 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1107 | 36,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B1C23DT1 | | 50 | 39,90 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 120 | 4 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 1 | B1C17DT1 | 7 | 50 | 39,46 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1107 | 36,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B1C27DT1 | | 50 | 41,18 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 120 | 4 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 1 | B1C128DT1 | 28 | 50 | 46,02 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1107 | 36,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B1C228DT1 | | 50 | 45,84 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 120 | 4 | | | | | | |
| | | | | B1C328DT1 | | 50 | 37,33 | 1 |

Observaciones:

Tipo de falla

| | | | | |
|---|--|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|  |  |  |  |  |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | | | | | | | |
|--|---------------|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | | | | | | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 5 | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 | | | | | | |

Fecha (día-mes-año): 8/02/2024

| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla |
|--|------|------|---------------|-----------|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 1 | B2C13DT1 | 3 | 50 | 31,09 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1107 | 36,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B2C23DT1 | | 50 | 35,99 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 120 | 4 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 1 | B2C17DT1 | 7 | 50 | 35,84 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1107 | 36,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B2C27DT1 | | 50 | 36,30 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 120 | 4 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 1 | B2C128DT1 | 28 | 50 | 44,75 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1107 | 36,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B2C228DT1 | | 50 | 43,57 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 120 | 4 | | | | | | |
| | | | | B2C328DT1 | | 50 | 43,49 | 1 |

Observaciones:

1 2 3 4 5

Tipo de falla

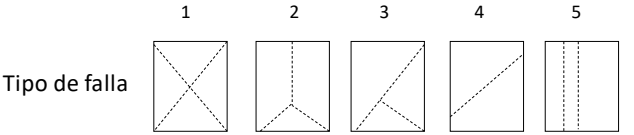
Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | |
|--|---------------|--------------------------------------|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 6 | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 |

Fecha (día-mes-año): 8/02/2024

| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla |
|--|------|------|---------------|-----------|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 1 | B3C13DT1 | 3 | 50 | 34,05 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1107 | 36,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B3C23DT1 | | 50 | 33,09 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 120 | 4 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 1 | B3C17DT1 | 7 | 50 | 36,12 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1107 | 36,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B3C27DT1 | | 50 | 34,73 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 120 | 4 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 1 | B3C128DT1 | 28 | 50 | 39,12 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1107 | 36,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B3C228DT1 | | 50 | 44,56 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 120 | 4 | | | | | | |
| | | | | B3C328DT1 | | 50 | 44,27 | 1 |

Observaciones:



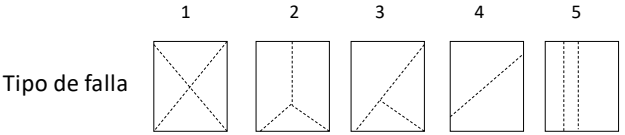
Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | |
|--|---------------|--------------------------------------|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 7 | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 |

Fecha (día-mes-año): 8/02/2024

| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla |
|--|------|------|---------------|-----------|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 2 | B1C13DT2 | 3 | 50 | 31,51 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1008 | 33,6 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B1C23DT2 | | 50 | 39,90 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 219 | 7,3 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 2 | B1C17DT2 | 7 | 50 | 39,46 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1008 | 33,6 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B1C27DT2 | | 50 | 41,18 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 219 | 7,3 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 2 | B1C128DT2 | 28 | 50 | 46,02 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1008 | 33,6 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B1C228DT2 | | 50 | 45,84 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 219 | 7,3 | | | | | | |
| | | | | B1C328DT2 | | 50 | 37,33 | 1 |

Observaciones:



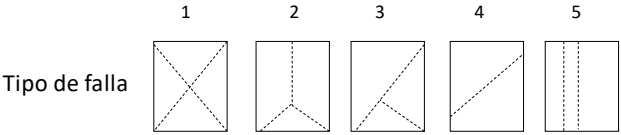
Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | |
|--|---------------|--------------------------------------|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 8 | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 |

Fecha (día-mes-año): 8/02/2024

| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla |
|--|------|------|---------------|-----------|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 2 | B2C13DT2 | 3 | 50 | 38,09064 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1008 | 33,6 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B2C23DT2 | | 50 | 38,76096 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 219 | 7,3 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 2 | B2C17DT2 | 7 | 50 | 40,06044 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1008 | 33,6 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B2C27DT2 | | 50 | 45,59254 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 219 | 7,3 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 2 | B2C128DT2 | 28 | 50 | 45,93064 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1008 | 33,6 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B2C228DT2 | | 50 | 47,04392 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 219 | 7,3 | | | | | | |
| | | | | B2C328DT2 | | 50 | 46,19328 | 1 |

Observaciones:





Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout


| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | | | | | | | |
|--|---------------|-----------|---------------|--------------------------------------|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | | | | | | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 9 | | | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 | | | | |
| Fecha (día-mes-año): | | 8/02/2024 | | | | | | |
| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 2 | B3C13DT2 | 3 | 50 | 40,87 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1008 | 33,6 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 219 | 7,3 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 2 | B3C17DT2 | 7 | 50 | 42,34 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1008 | 33,6 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 219 | 7,3 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 2 | B3C128DT2 | 28 | 50 | 44,54 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 1008 | 33,6 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 219 | 7,3 | | | | | | |


Observaciones:


Tipo de falla

1







2


3







4


5


Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | | | | | | | | |
|--|----------------|-----------|---------------|--------------------------------------|---|--|---|---|---|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | | | | | | | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 10 | | | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 | | | | | |
| Fecha (día-mes-año): | | 8/02/2024 | | | | | | | |
| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 3 | B1C13DT3 | 3 | 50 | 24,19 | 1 | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | B1C23DT3 | | 50 | 23,94 | 1 | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 907,2 | 30,24 | | B1C33DT3 | | 50 | 24,39 | 1 | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 319,8 | 10,66 | | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 3 | B1C17DT3 | 7 | 50 | 26,10 | 1 | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | B1C27DT3 | | 50 | 26,28 | 1 | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 907,2 | 30,24 | | B1C37DT3 | | 50 | 25,50 | 1 | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 319,8 | 10,66 | | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 3 | B1C128DT3 | 28 | 50 | 35,07 | 1 | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | B1C228DT3 | | 50 | 31,55 | 1 | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 907,2 | 30,24 | | B1C328DT3 | | 50 | 35,49 | 1 | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 319,8 | 10,66 | | | | | | | |
| Observaciones: | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Tipo de falla | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |  |  |  |  |  |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | | | | | | | | |
|--|----------------|-----------|---------------|--------------------------------------|---|--|---|---|---|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | | | | | | | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 11 | | | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 | | | | | |
| Fecha (día-mes-año): | | 8/02/2024 | | | | | | | |
| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 3 | B2C13DT3 | 3 | 50 | 25,71 | 1 | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 907,2 | 30,24 | | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B2C23DT3 | | 50 | 28,01 | 1 | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 319,8 | 10,66 | | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 3 | B2C17DT3 | 7 | 50 | 26,96 | 1 | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 907,2 | 30,24 | | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B2C27DT3 | | 50 | 28,45 | 1 | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 319,8 | 10,66 | | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 3 | B2C128DT3 | 28 | 50 | 30,99 | 1 | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 907,2 | 30,24 | | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B2C228DT3 | | 50 | 34,22 | 1 | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 319,8 | 10,66 | | | | | | | |
| Observaciones: | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Tipo de falla | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |  |  |  |  |  |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout






| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | | | | | | | |
|--|----------------|--|--|--------------------------------------|--|--|--|--|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | | | | | | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 12 | | | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 | | | | |

Fecha (día-mes-año): 8/02/2024

| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla |
|--|-------|-------|---------------|-----------|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 3 | B3C13DT3 | 3 | | 22,31 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 907,2 | 30,24 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B3C23DT3 | | | 22,16 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 319,8 | 10,66 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 3 | B3C17DT3 | 7 | | 26,22 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 907,2 | 30,24 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B3C27DT3 | | | 22,96 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 319,8 | 10,66 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 3 | B3C128DT3 | 28 | | 36,21 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 907,2 | 30,24 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B3C228DT3 | | | 36,42 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 319,8 | 10,66 | | | | | | |
| | | | | B3C328DT3 | 35,51 | 1 | | |

Observaciones:

Tipo de falla


| | | | | |
|---|--|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|  |  |  |  |  |


Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout


| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | | | | | | | |
|--|----------------|-----------|---------------|--------------------------------------|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | | | | | | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 13 | | | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 | | | | |
| Fecha (día-mes-año): | | 8/02/2024 | | | | | | |
| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 4 | B1C13DT4 | 3 | 50 | 23,99 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | B1C23DT4 | | 50 | 23,41 | 1 |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 807 | 26,9 | | B1C33DT4 | | 50 | 22,78 | 1 |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 420 | 14 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 4 | B1C17DT4 | 7 | 50 | 24,92 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | B1C27DT4 | | 50 | 26,12 | 1 |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 807 | 26,9 | | B1C37DT4 | | 50 | 24,97 | 1 |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 420 | 14 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 4 | B1C128DT4 | 28 | 50 | 46,05 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | B1C228DT4 | | 50 | 43,92 | 1 |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 807 | 26,9 | | B1C328DT4 | | 50 | 38,54 | 1 |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 420 | 14 | | | | | | |


Observaciones:


Tipo de falla

1







2


3


4


5


Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------------------------------|---------------|-----------|---|--|---|---|---|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | | | | | | | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 14 | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 | | | | | | | |
| Fecha (día-mes-año): | | 8/02/2024 | | | | | | | |
| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 4 | B2C13DT4 | 3 | 50 | 22,35 | 1 | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | B2C23DT4 | | 50 | 21,35 | 1 | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 807 | 26,9 | | B2C33DT4 | | 50 | 21,50 | 1 | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 420 | 14 | | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 4 | B2C17DT4 | 7 | 50 | 27,14 | 1 | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | B2C27DT4 | | 50 | 24,73 | 1 | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 807 | 26,9 | | B2C37DT4 | | 50 | 23,73 | 1 | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 420 | 14 | | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 4 | B2C128DT4 | 28 | 50 | 45,74 | 1 | |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | B2C228DT4 | | 50 | 47,27 | 1 | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 807 | 26,9 | | B2C328DT4 | | 50 | 41,81 | 1 | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | | | | | | |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 420 | 14 | | | | | | | |
| Observaciones: | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Tipo de falla | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |  |  |  |  |  |

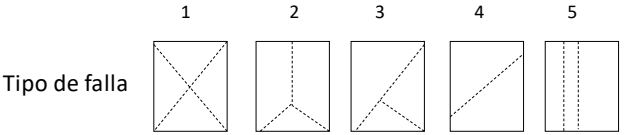
Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

| EVALUACIÓN DE MORTEROS | | |
|--|----------------|--------------------------------------|
| Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación SikaGrout-212. | | |
| Referencia: F-01 | Ensayo No.: 15 | Fecha de modificación: 02/2024 v.1.0 |

Fecha (día-mes-año): 8/02/2024

| Materiales | g | % | Tratamiento # | Cubo | Edad de falla (días) | Lado (mm) | Resultado Mpa | Tipo de falla |
|--|------|------|---------------|-----------|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 4 | B3C13DT4 | 3 | 50 | 21,99 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 807 | 26,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B3C23DT4 | | 50 | 21,75 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 420 | 14 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 4 | B3C17DT4 | 7 | 50 | 24,92 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 807 | 26,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B3C27DT4 | | 50 | 24,59 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 420 | 14 | | | | | | |
| Sand/CO Arena Tipo C (granel) | 1155 | 38,5 | 4 | B3C128DT4 | 28 | 50 | 40,92 | 1 |
| Premezcla SikaGrout-212 CO | 84 | 2,8 | | | | | | |
| Argos Cement Concrete ART grey (granel) | 807 | 26,9 | | | | | | |
| Sand/CO coarse 8-30 Barranquilla(granel) | 435 | 14,5 | | B3C228DT4 | | 50 | 46,12 | 1 |
| Carbonato de Calcio Malla 150 (saco) | 99 | 3,3 | | | | | | |
| Ceniza volante tipo F | 420 | 14 | | | | | | |
| | | | | B3C328DT4 | | 50 | 41,78 | 1 |

Observaciones:



Apéndice B. Análisis con JASP

Procedimiento prueba ANOVA para la falla a los 7 días

Tabla 1

ANOVA de la resistencia a los 3 días

| Casos | Suma de Cuadrados | gl | Cuadrado Medio | F | p | ω^2 |
|-----------|-------------------|----|----------------|---------|--------|------------|
| GRUPO | 1678.007 | 4 | 419.502 | 306.626 | < .001 | 0.973 |
| Residuals | 39.676 | 29 | 1.368 | | | |

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

Teniendo en cuenta que el valor p es inferior a 0,001, se estima que sí existen diferencias significativas, por lo cual el análisis continúa. $F(4, 29) = 306,206$, $p < 0,001$. El tamaño del efecto es grande, pues $\omega^2 = 0,973$.

Tabla 2

Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

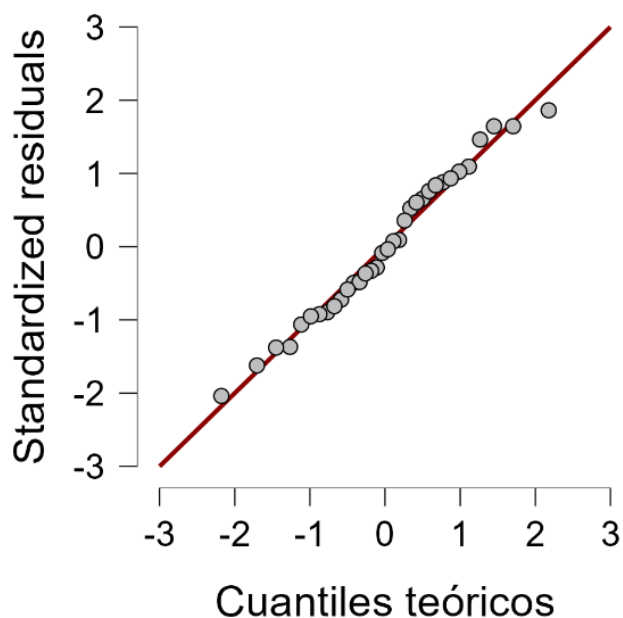
| F | gl1 | gl2 | p |
|-------|-------|--------|-------|
| 0.419 | 4.000 | 29.000 | 0.793 |

El valor p es 0,793, por lo tanto, se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, es decir, no existen diferencias significativas entre las medias de los grupos. $F(4,29) = 0,419$, $p = 0,643$.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Figura 1

Gráfico Q-Q



Según el Gráfico Q-Q de la figura 1, los datos se comportan de forma paramétrica, así que se cumple el supuesto de normalidad.

Tabla 3

Comparaciones Post-hoc a los 3 días

| | | Diferencia de Medias | ET | t | pScheffe |
|---------|----|----------------------|-------|--------|-----------|
| CONTROL | T1 | 0.650 | 0.675 | 0.963 | 0.918 |
| | T2 | -3.600 | 0.632 | -5.698 | < .001*** |
| | T3 | 12.177 | 0.675 | 18.031 | < .001*** |
| | T4 | 13.082 | 0.632 | 20.709 | < .001*** |
| T1 | T2 | -4.250 | 0.632 | -6.727 | < .001*** |
| | T3 | 11.527 | 0.675 | 17.069 | < .001*** |
| | T4 | 12.432 | 0.632 | 19.680 | < .001*** |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Comparaciones Post-hoc a los 3 días

| | | Diferencia de Medias | ET | t | pScheffe |
|----|----|----------------------|-------|--------|-----------|
| T2 | T3 | 15.776 | 0.632 | 24.975 | < .001*** |
| | T4 | 16.681 | 0.585 | 28.523 | < .001*** |
| T3 | T4 | 0.905 | 0.632 | 1.433 | 0.727 |

*** p < .001

Nota. Valor p ajustado para comparar una familia de 4

Según lo observado en la Tabla 3, no existen diferencias significativas entre el grupo control y el grupo T1 (valor p = 0,918), de modo que la resistencia esperada se conserva. Entre el grupo control y el grupo T2 (p < 0,001) sí se observan estas diferencias, sin embargo, la resistencia esperada no sólo se conserva en este caso, sino que aumenta de acuerdo con los resultados de la Tabla 2 del documento principal. Por otro lado, existen diferencias significativas entre el grupo control y los grupos T3 y T4 (p < 0,001), aunque estas se deben a una clara disminución de la resistencia respecto a la esperada. Se ha elegido el método estándar de pruebas post-hoc debido a que se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, y la prueba de Scheffe debido a que funciona bien con grupos de tamaño distinto.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Procedimiento prueba ANOVA para la falla a los 7 días

Tabla 4

ANOVA de la resistencia a los 7 días

| Corrección de Homogeneidad | Casos | Suma de Cuadrados | gl | Cuadrado Medio | F | p | ω^2 |
|----------------------------|-----------|-------------------|--------|----------------|---------|--------|------------|
| Brown-Forsythe | GRUPO | 1798.881 | 4.000 | 449.720 | 58.702 | < .001 | 0.868 |
| | Residuals | 234.525 | 9.707 | 24.160 | | | |
| Welch | GRUPO | 1798.881 | 4.000 | 449.720 | 265.396 | < .001 | 0.868 |
| | Residuals | 234.525 | 15.771 | 14.871 | | | |

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

El valor p tanto para la prueba de Brown-Forsythe como para la de Welch es inferior a 0,001, de modo que existen diferencias significativas. Brown-Forsythe: $F(4,9) = 58,702$, $p < 0,001$. Welch: $F(4,15) = 265,396$, $p < 0,001$. En ambos casos se reporta un tamaño del efecto grande ya que $\omega^2 = 0,868$.

Tabla 5

Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

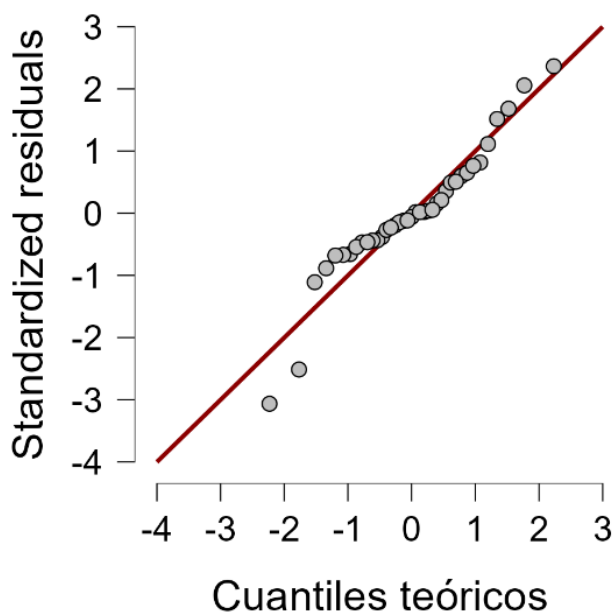
| F | gl1 | gl2 | p |
|--------|-------|--------|--------|
| 15.882 | 4.000 | 34.000 | < .001 |

Como se observa en la tabla, no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, ya que el valor p es menor a 0,001. Por lo tanto, se aplican las pruebas de corrección ya observadas en la tabla previa.

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Figura 2

Gráfico Q-Q



Según el Gráfico Q-Q de la figura 2, los datos se comportan de forma paramétrica, así que se cumple el supuesto de normalidad.

Tabla 6

Comparaciones Post-hoc de Games-Howell a los 7 días

| Comparación | Diferencia de Medias | SE | t | df | p _{Tukey} |
|--------------|----------------------|-------|--------|--------|--------------------|
| CONTROL - T1 | 1.796 | 2.204 | 0.815 | 8.114 | 0.919 |
| CONTROL - T2 | -1.879 | 2.079 | -0.904 | 6.596 | 0.887 |
| CONTROL - T3 | 12.672 | 2.055 | 6.166 | 6.305 | 0.004 ** |
| CONTROL - T4 | 14.376 | 2.043 | 7.038 | 6.156 | 0.002 ** |
| T1 - T2 | -3.675 | 0.970 | -3.789 | 10.607 | 0.021 * |
| T1 - T3 | 10.876 | 0.917 | 11.861 | 8.948 | < .001*** |
| T1 - T4 | 12.580 | 0.889 | 14.156 | 8.011 | < .001*** |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Comparaciones Post-hoc de Games-Howell a los 7 días

| Comparación | Diferencia de Medias | SE | t | df | p _{Tukey} |
|-------------|----------------------|-------|--------|--------|--------------------|
| T2 - T3 | 14.551 | 0.556 | 26.185 | 12.677 | < .001*** |
| T2 - T4 | 16.255 | 0.508 | 32.016 | 10.430 | < .001*** |
| T3 - T4 | 1.704 | 0.397 | 4.286 | 12.677 | 0.007 ** |

* p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Nota. Resultados basados en medias sin corregir.

Basándose en los resultados de la tabla, se observa que no existen diferencias significativas entre el grupo control con los grupos T1 y T2 ($p = 0,919$ y $p = 0,887$, respectivamente), de modo que la resistencia a la compresión esperada se conserva, resultados consecuentes con los mostrados en la Tabla 3 del documento principal. Por el contrario, sí existen diferencias significativas entre el grupo control y los grupos T3 y T4 ($p = 0,004$ y $p = 0,002$, respectivamente), debiéndose estas a que las resistencias arrojadas por estos tratamientos son inferiores en comparación. Se selecciona la prueba post-hoc de Games-Howell debido a que no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, la cual utiliza la prueba de corrección de Tukey.

Procedimiento prueba ANOVA para la falla a los 28 días

Tabla 7

ANOVA de la resistencia a los 28 días

| Corrección de Homogeneidad | Casos | Suma de Cuadrados | gl | Cuadrado Medio | F | p | ω^2 |
|----------------------------|-------|-------------------|-------|----------------|--------|--------|------------|
| Brown-Forsythe | GRUPO | 1122.764 | 4.000 | 280.691 | 86.405 | < .001 | 0.917 |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

ANOVA de la resistencia a los 28 días

| Corrección de Homogeneidad | Casos | Suma de Cuadrados | gl | Cuadrado Medio | F | p | ω^2 |
|----------------------------|-----------|-------------------|--------|----------------|--------|--------|------------|
| | Residuals | 86.374 | 17.247 | 5.008 | | | |
| Welch | GRUPO | 1122.764 | 4.000 | 280.691 | 59.239 | < .001 | 0.917 |
| | Residuals | 86.374 | 12.408 | 6.961 | | | |

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

El valor p tanto para la prueba de Brown-Forsythe como para la de Welch es inferior a 0,001, de modo que existen diferencias significativas. Brown-Forsythe: $F(4,17) = 86,405$, $p < 0,001$. Welch: $F(4,12) = 59,239$, $p < 0,001$. En ambos casos se reporta un tamaño del efecto grande ya que $\omega^2 = 0,917$.

Tabla 8

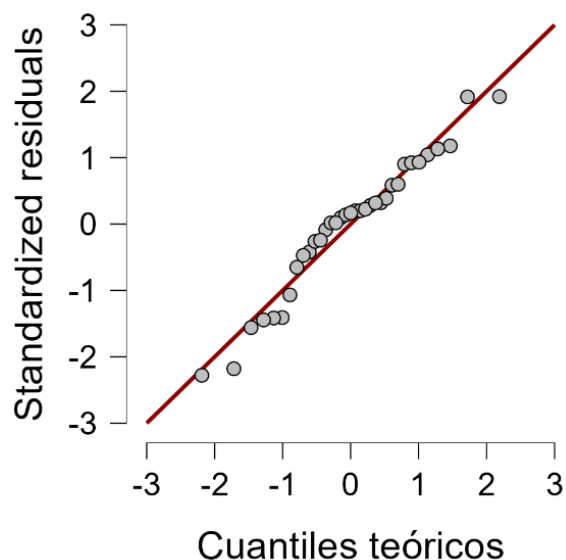
Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

| F | gl1 | gl2 | p |
|-------|-------|--------|-------|
| 4.647 | 4.000 | 30.000 | 0.005 |

Como se observa en la tabla, no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, ya que el valor p es menor a 0,001. Por lo tanto, se realizan las pruebas de corrección ya observadas en la tabla previa.

Figura 3

Gráfico Q-Q



Según el Gráfico Q-Q de la figura 3, los datos se comportan de forma paramétrica, así que se cumple el supuesto de normalidad.

Tabla 9

Comparaciones Post-hoc de Games-Howell a los 28 días

| Comparación | Diferencia de Medias | SE | t | df | p _{Tukey} |
|--------------|----------------------|-------|--------|--------|--------------------|
| CONTROL - T1 | 8.702 | 0.840 | 10.355 | 5.403 | < .001*** |
| CONTROL - T2 | 7.368 | 0.897 | 8.215 | 6.854 | < .001*** |
| CONTROL - T3 | 18.373 | 1.140 | 16.118 | 10.799 | < .001*** |
| CONTROL - T4 | 8.647 | 1.313 | 6.583 | 9.567 | < .001*** |
| T1 - T2 | -1.334 | 0.391 | -3.411 | 9.901 | 0.042 * |
| T1 - T3 | 9.671 | 0.805 | 12.016 | 6.528 | < .001*** |
| T1 - T4 | -0.055 | 1.036 | -0.053 | 5.261 | 1.000 |
| T2 - T3 | 11.005 | 0.864 | 12.740 | 8.381 | < .001*** |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Comparaciones Post-hoc de Games-Howell a los 28 días

| Comparación | Diferencia de Medias | SE | t | df | p _{Tukey} |
|-------------|----------------------|-------|--------|-------|--------------------|
| T2 - T4 | 1.278 | 1.082 | 1.181 | 6.209 | 0.762 |
| T3 - T4 | -9.727 | 1.291 | -7.534 | 9.814 | < .001*** |

* p < .05, *** p < .001

Nota. Resultados basados en medias sin corregir.

A partir de la tabla, se observa que en este caso sí existen diferencias significativas entre el grupo control y todos los tratamientos ($p < 0,001$ para todos los casos), ya que el grupo control arrojó resultados mayores en su resistencia, sin embargo, en el caso de los grupos T1, T2 y T4 las resistencias obtenidas se encuentran en el nivel de la resistencia esperada o son superiores, lo que concuerda con los datos de la Tabla 4 del documento principal. Este no es el caso del grupo T3, cuyas resistencias son inferiores a las de los demás grupos. No existen diferencias significativas entre el grupo T4 y los grupos T1 y T2 ($p = 1$ y $p = 0,762$, respectivamente), de modo que sorpresivamente los especímenes de este grupo lograron resistencias similares a los dos grupos con mejor desempeño, a pesar de la tendencia en las dos fallas anteriores. Se selecciona la prueba post-hoc de Games-Howell debido a que no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, la cual utiliza la prueba de corrección de Tukey

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Apéndice C. Certificado de calibración de la prensa de compresión

| | | | | | | | | |
|--|---|--|-------------------|-------|-------------------|--------|---|------------|
|  MEDICIÓN CONFIABLE |  ISO/IEC 17025:2017 14-LAC-055 | CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN CALIBRATION CERTIFICATE | | | | | | |
| | | <table border="1"><tr><td>NÚMERO: Number</td><td>2397F</td></tr><tr><td>PÁGINAS: Pages</td><td>1 de 4</td></tr><tr><td>FECHA DE EXPEDICIÓN: Expedition date</td><td>2023-10-03</td></tr></table> | NÚMERO: Number | 2397F | PÁGINAS: Pages | 1 de 4 | FECHA DE EXPEDICIÓN: Expedition date | 2023-10-03 |
| NÚMERO: Number | 2397F | | | | | | | |
| PÁGINAS: Pages | 1 de 4 | | | | | | | |
| FECHA DE EXPEDICIÓN: Expedition date | 2023-10-03 | | | | | | | |
| INSTRUMENTO: Instrument | MAQUINA DE ENSAYO A COMPRESION | | | | | | | |
| FABRICANTE DEL MARCO: Frame Manufacturer | KRAUQUER | | | | | | | |
| MODELO DEL MARCO: Frame Model | NO PORTA | | | | | | | |
| NÚMERO DE SERIE DEL MARCO: Frame Serial Number | NO PORTA | | | | | | | |
| CÓDIGO DEL MARCO: Frame Code | 6667-7249 | | | | | | | |
| CAPACIDAD MÁXIMA: Maximum Capacity | 20000 kgf → 196,133 kN | | | | | | | |
| SOLICITANTE: Customer | SIKA COLOMBIA S.A.S | | | | | | | |
| DIRECCIÓN, CIUDAD: Address | CARRETERA ORIENTAL KILOMETRO 2 - 23 VIA MALAMBO - PARQUE INDUSTRIAL BELLAVISTA / BARRANQUILLA - ATLANTICO | | | | | | | |
| SITIO DE CALIBRACIÓN: Site calibration | LABORATORIO | | | | | | | |
| FECHA DE CALIBRACIÓN: Date of calibration | 2023-09-04 (aaaa-mm-dd) | | | | | | | |
| NÚMERO DE PÁGINAS DEL CERTIFICADO INCLUYENDO ANEXOS: Cuatro(4) Number of pages of this certificate and Documents Attached | | | | | | | | |
| Este certificado se expide de acuerdo con los requisitos de la norma ISO/IEC 17025:2017. This certificate is issued in accordance with the requirements of the ISO/IEC 17025:2017 standard. | | | | | | | | |
| Los resultados incluidos en este certificado, se relacionan únicamente con el ítem suministrado por el cliente, momento y condiciones de la calibración. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de estos resultados. The results included in this certificate relate only to the item supplied by the customer, time and conditions of the calibration. The laboratory that issues it is not responsible for the damages that may arise from the inappropriate use of these results. | | | | | | | | |
| El laboratorio no fue responsable de la etapa de muestreo, por lo tanto, los resultados se aplican al ítem como se recibió. The laboratory was not responsible for the testing stage, therefore the results apply to the item as received. | | | | | | | | |
| El laboratorio es responsable de toda la información suministrada en el certificado, excepto cuando ésta sea suministrada por el cliente. The laboratory is responsible for all the information provided in the certificate, except when it is provided by the client. | | | | | | | | |
| El presente certificado no puede ser reproducido parcialmente sin la aprobación escrita de CONCRELAB S.A.S., con el fin de asegurar que partes del mismo, no se saquen de contexto. This certificate may not be partially reproduced without the written approval of CONCRELAB S.A.S., in order to ensure that parts of it are not taken out of context. | | | | | | | | |
| FIRMAS AUTORIZADAS : Authorized signatures | | | | | | | | |
| Metrólogo  Revisado por - Checked By | Firmado digitalmente por CRISTIAN ENRIQUE SANABRIA LOPEZ Fecha: 2023.10.03 20:27:46 -05'00' | Metrólogo JORDAN FELIPE ROJAS GARCIA Firmado digitalmente por JORDAN FELIPE ROJAS GARCIA Fecha: 2023.10.03 20:32:28 -05'00' | | | | | | |
|  Sede Bogotá Calle 63D No 71A - 51 PBX: (571) 223 5656 www.concrelab.com Código: F-443 / Versión: 08 / Actualización: 2022-11-23 | | | | | | | | |

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

concrelab
MEDICIÓN CONFIABLE



ISO/IEC 17025:2017
14-LAC-055

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN CALIBRATION CERTIFICATE

| | |
|--|------------|
| NÚMERO: Number | 2397F |
| PÁGINAS: Pages | 4 de 4 |
| FECHA DE EXPEDICIÓN: Expedition date | 2023-10-03 |

4. TRAZABILIDAD AL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (S.I.):

El laboratorio de metrología de Concrelab S.A.S establece y mantiene la trazabilidad metrológica de los resultados de sus mediciones, por medio de una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, realizadas por laboratorios acreditados o institutos nacionales de metrología, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medición, vinculándose con la referencia apropiada nacional o internacional y asegurando que los resultados de la medición son trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI).

| TRAZABILIDAD METROLÓGICA | | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------|-----------|-------------|---------------|
| CAPACIDAD DE MEDICIÓN | SERIE | MODELO | CLASE | CERTIFICADO | VIGENTE HASTA |
| (20 a 200) kN | 121030065 / INV. 12161 | Z4A | 0,5 | 5227 | 2023-12-14 |
| (2 a 20) kN | 070730135 / INV. 16114 | Z4A | 0 | 5211 | 2023-12-06 |
| (15 a 40) °C | 0322 / INV N° 000575 | 445815 | NO APLICA | TA-08475 | 2024-09-24 |

5. OBSERVACIONES:

1. La máquina de ensayo debe ser calibrada inmediatamente después de cualquier reparación del sistema eléctrico o mecánico ya que esto afecta la operación del sistema de medida.
2. CONCRELAB S.A.S., puede abstenerse de expedir un certificado cuando por características técnicas que considere que el equipo no es apto para ser calibrado.
3. Fuente de los factores de conversión NIST 811.
4. Factor de conversión un kilogramo fuerza (kgf) = kilonewton (kN) 9,80665E-03

--FIN DEL CERTIFICADO--

Metrología

Sede Bogotá | Calle 63D No 71A - 51 | PBX: (571) 223 5656 | www.concrelab.com

Código: F-443 / Versión: 08 / Actualización: 2022-11-23

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

concrelab
EDICIÓN CONFIABLE



ISO/IEC 17025:2017
14-LAC-055

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
CALIBRATION CERTIFICATE

| | |
|--|------------|
| NÚMERO: Number | 2397F |
| PÁGINAS: Pages | 3 de 4 |
| FECHA DE EXPEDICIÓN: Expedition date | 2023-10-03 |

| IND (kN) | Errores calculados e incertidumbre (% de lectura) | | | | | | Errores calculados e incertidumbre (kN) | | | | | | k |
|-------------|--|--------|-------|----|-----|-------|---|--------|-------|----|-----|-------|------|
| | a* | q* | b* | v* | Acc | U | a* | q* | b* | v* | Acc | U | |
| 19,61 | 5,00E-02 | -0,44 | 0,29 | - | - | 0,17 | 9,807E-03 | -0,087 | 0,057 | - | - | 0,034 | 2,00 |
| 20,00 | 4,903E-02 | -0,463 | 0,049 | - | - | 0,080 | 9,807E-03 | -0,093 | 0,010 | - | - | 0,016 | 2,00 |
| 20,00 | 4,90E-02 | -0,52 | 0,05 | - | - | 0,12 | 9,807E-03 | -0,105 | 0,010 | - | - | 0,024 | 2,00 |
| 39,23 | 2,50E-02 | -0,44 | 0,30 | - | - | 0,20 | 9,807E-03 | -0,171 | 0,119 | - | - | 0,078 | 2,00 |
| 58,84 | 1,67E-02 | -0,13 | 0,12 | - | - | 0,12 | 9,807E-03 | -0,079 | 0,072 | - | - | 0,071 | 2,00 |
| 78,45 | 1,25E-02 | -0,21 | 0,04 | - | - | 0,12 | 9,807E-03 | -0,168 | 0,030 | - | - | 0,094 | 2,00 |
| 98,07 | 1,00E-02 | -0,38 | 0,18 | - | - | 0,12 | 9,81E-03 | -0,37 | 0,18 | - | - | 0,12 | 2,00 |
| 117,68 | 8,33E-03 | -0,43 | 0,23 | - | - | 0,14 | 9,81E-03 | -0,51 | 0,27 | - | - | 0,17 | 2,00 |
| 137,29 | 7,14E-03 | -0,37 | 0,30 | - | - | 0,19 | 9,81E-03 | -0,51 | 0,41 | - | - | 0,25 | 2,00 |
| 156,91 | 6,250E-03 | -0,71 | 0,36 | - | - | 0,21 | 9,81E-03 | -1,12 | 0,56 | - | - | 0,34 | 2,00 |
| 176,52 | 5,56E-03 | -0,52 | 0,17 | - | - | 0,12 | 9,81E-03 | -0,92 | 0,29 | - | - | 0,21 | 2,00 |
| 196,13 | 5,00E-03 | -0,35 | 0,21 | - | - | 0,13 | 9,81E-03 | -0,68 | 0,41 | - | - | 0,26 | 2,00 |
| <i>fo</i> | 0,00 | | | | | | <i>fo</i> | 0,000 | | | | | |

Notas:

- a*: Resolución Relativa
- q*: Error relativo de Exactitud
- Acc : Accesorios
- v*: Error Relativo de Reversibilidad
- fo*: Error Relativo de Cero (%)
- b*: Error Relativo de Repetibilidad
- U: Incertidumbre Expandida
- K: Factor de Cobertura
- IND: Indicación del Mensurando

2. TEMPERATURA DURANTE LA CALIBRACIÓN (°C):

| | Lectura 1 (L1) | Lectura 2 (L2) | Lectura 3 (L3) | Lectura Accesorios (L4) | Lectura (L2') |
|-------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|---------------|
| °C. Inicial | 21,8 | 22,2 | 22,4 | - | - |
| °C. Final | 22,0 | 22,2 | 22,6 | - | - |

3. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN:

La incertidumbre expandida de la medición reportada se establece como la incertidumbre estándar de medición multiplicada por el factor de cobertura "k" y la probabilidad de cobertura, la cual debe ser aproximada al 95% y no menor a este valor.



Sede Bogotá | Calle 63D No 71A - 51 | PBX: (571) 223 5656 | www.concrelab.com

Código: F-443 / Versión: 08 / Actualización: 2022-11-23

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

concrelab
MEDICIÓN CONFIABLE



ISO/IEC 17025:2017
14-LAC-055

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
CALIBRATION CERTIFICATE

| | |
|--|------------|
| NÚMERO: Number | 2397F |
| PÁGINAS: Pages | 2 de 4 |
| FECHA DE EXPEDICIÓN: Expedition date | 2023-10-03 |

| MARCO NORMATIVO | |
|--|----------------------------|
| MÉTODO DE MEDICIÓN Method of measurement: | Fuerza Indicada Constante |
| NORMA TÉCNICA Standard : | NTC/ISO 7500-1: 2007-07-25 |
| INTERVALO CALIBRADO Calibration Interval: | 19,6133 kN a 196,133 kN |

| INDICADOR DEL MENSURANDO | |
|---|-----------|
| TIPO DE INDICACIÓN (Type): | DIGITAL |
| FABRICANTE (Manufacturer): | TRUMAX |
| MODELO (Model): | MATRIX |
| NÚMERO DE SERIE (Serial Number): | CS191088 |
| CÓDIGO (Code): | 6667-7249 |

| TRANSDUCTOR DEL MENSURANDO | |
|---|-----------|
| FABRICANTE (Manufacturer): | GEFRAM |
| MODELO (Model): | NO PORTA |
| NÚMERO DE SERIE (Serial Number): | NO PORTA |
| CÓDIGO (Code): | 6667-7249 |

1. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN:

| Dirección de Carga: | COMPRESIÓN | | | Resolución: | 0,0098 kN | |
|---|--|----------------|----------------|-------------------------|---------------|-----------|
| Indicación del Mensurando kN | Indicación del Instrumento Patrón (unidades) | | | | | Promedio |
| | Lectura 1 (L1) | Lectura 2 (L2) | Lectura 3 (L3) | Lectura Accesorios (L4) | Lectura (L2') | |
| 19,6133 | 19,7048 | 19,6703 | 19,7273 | - | - | 19,70076 |
| 20,0000 | 20,0970 | 20,0950 | 20,0871 | - | - | 20,09301 |
| 20,0000 | 20,1093 | 20,1073 | 20,0994 | - | - | 20,10535 |
| 39,2266 | 39,3681 | 39,3531 | 39,4731 | - | - | 39,39811 |
| 58,8399 | 58,9533 | 58,8813 | 58,9213 | - | - | 58,91865 |
| 78,4532 | 78,6076 | 78,6201 | 78,6376 | - | - | 78,62180 |
| 98,0665 | 98,4365 | 98,3515 | 98,5329 | - | - | 98,44029 |
| 117,6798 | 118,2317 | 118,0344 | 118,3007 | - | - | 118,18894 |
| 137,2931 | 137,9855 | 137,5713 | 137,8596 | - | - | 137,80545 |
| 156,9064 | 158,2858 | 157,7235 | 158,0885 | - | - | 158,03262 |
| 176,5197 | 177,5839 | 177,2880 | 177,4655 | - | - | 177,44580 |
| 196,1330 | 196,8068 | 196,6095 | 197,0239 | - | - | 196,81341 |
| Indicación residual de la máquina kN | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | - | - | |



Sede Bogotá | Calle 63D No 71A - 51 | PBX: (571) 223 5656 | www.concrelab.com

Código: F-443 / Versión: 08 / Actualización: 2022-11-23

Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout

Apéndice D. Autorización de Sika para adelantar el trabajo de investigación

Octubre 1 del 2023 Malambo -Atlántico

Respetuosamente

Señores

SIKA COLOMBIA S.A.S.

Por medio de la presente. Isaura Guzman Pérez, identificada con documento de identidad número 1.129.521157, y Claudia Ximena Granados Muñoz identificada con documento de identidad número 34.570.176, requerimos su autorización de manera expresa , para llevar a cabo la realización de las pruebas y ensayos dentro de las instalaciones de su empresa , con sede en Malambo –Atlántico, para la tesis titulada "Sustitución de parte de material cementante por cenizas volantes tipo F en la producción del mortero de reparación tipo Grout".

El objetivo de esta autorización es permitir que Isaura Guzman perez y Claudia Ximena Granados Muñoz puedan recopilar información, realizar corridas de ensayos en sus laboratorios, con sus materias primas, y cualquier otra actividad necesaria para la culminación exitosa del trabajo de investigación con un alcance netamente académico. Así mismo, solicitamos que nos brinden toda la colaboración necesaria, facilitando el acceso a la información requerida y proporcionando el apoyo necesario durante el desarrollo de la tesis.

Agradecemos de antemano la disposición de Sika Colombia S.A.S para colaborar en este proyecto académico y quedamos a su disposición para cualquier consulta o coordinación que sea necesaria.

Sin otro particular, quedamos a la espera de recibir su firma al pie de esta carta como confirmación de la aceptación de esta autorización.

Atentamente,



Isaura Guzman Pérez
1.129.521.157

Claudia Ximena Granados Muñoz
34.570.176

Visto bueno Sika Colombia S.A.S.

Ing. Carlos García
Líder de tecnología Morteros
Sika Colombia S.A.S

