

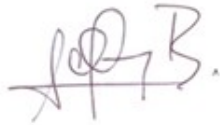
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR ESCORIA DE ALUMINIO Y EFECTO DE LA REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

DANIEL PARRA MOLINA

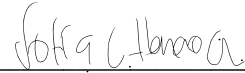
Nota de Aceptación

Certificamos que el presente Trabajo de Grado Satisface, en alcances y calidad, todos los requisitos que demanda un Trabajo de Grado de Maestría en Ingeniería Civil


Director



Jurado



Jurado

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de Magister en Ingeniería Civil.


HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias



JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali, 4 de julio de 2023



Acta de Correcciones al Documento de Trabajo de Grado

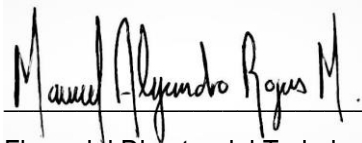
Santiago de Cali, 4 de julio de 2023

Autor: Daniel Parra Molina

Título del Trabajo de Grado: “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR ESCORIA DE ALUMINIO Y EFECTO DE LA REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA”

Director: Manuel Alejandro Rojas

Como indica el artículo 2.13 de las Directrices para Trabajo de Grado de Maestría, he verificado que el estudiante indicado arriba ha implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Trabajo de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Evaluación correspondiente.



Firma del Director del Trabajo de Grado

INFORMACION ESTUDIANTE

Daniel Parra Molina

Dirección: Cra 59ª # 7-35 apto 404ª

Cel: 312 290 4954

Correo: danielparra17@javerianacali.edu.co

Profesión: Ingeniero Civil

Universidad: Pontificia universidad javeriana Cali

Empresa: Constructora Bolívar Cali

Cargo: Ingeniero presupuestos



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS CON
SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR ESCORIA DE ALUMINIO Y EFECTO
DE LA REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil
Énfasis en Gerencia de Construcciones

Presentado por:

DANIEL PARRA MOLINA

Pontificia Universidad Javeriana Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Junio de 2023

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
	1.1. Definición del problema de investigación	3
	1.2. Objetivos del proyecto	5
	1.2.1 Objetivo general	5
	1.2.2 Objetivos específicos.....	5
	1.2.3 Alcance del trabajo de grado	5
	1.3 Justificación del trabajo de grado	6
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	9
	2.1 Procesos de producción del aluminio y el cemento.....	9
	2.2 Producción de dióxido de carbono y contaminación ambiental	12
	2.3 Generalidades de los morteros.....	13
	2.3.1 Estado fresco	14
	2.3.2 Estado endurecido	15
	2.4 Usos de escorias de aluminio en materiales a Base de Cemento.....	16
3.	METODOLOGÍA.....	23
	3.1 Preliminares	24
	3.1.1 Obtención y muestreo de la escoria de aluminio.....	24
	3.1.2 Proceso de apagado	25
	3.2 Caracterización de materiales	26
	3.2.1 Agregado Fino	26
	3.2.2 Cemento.....	28
	3.2.3 Escoria de aluminio	30
	3.3 Diseño de mezcla de mortero	33

3.4	Preparación de morteros y determinación de propiedades	36
3.4.1	Diseño experimental.....	36
3.4.2	Propiedades en estado fresco.....	39
3.4.3	Propiedades en estado endurecido.....	41
4.	ANALISIS Y RESULTADOS	45
4.1	Caracterización escoria de aluminio.....	45
4.1.1	Escoria sin lavar (E) y Escoria lavada sin moler (EL)	46
4.1.2	Escoria lavada y molida.....	50
4.2	Propiedades Físico - Mecánicas de morteros.....	57
4.2.1	Propiedades en estado fresco.....	57
4.2.2	Propiedades en estado endurecido.....	61
4.2.3	Correlaciones entre propiedades.....	74
5.	CONCLUSIONES.....	79
5.1	Recomendaciones para trabajos futuros	81
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
7.	GLOSARIO DE TERMINOS ESPECIALES.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de fabricación de aluminio (Farjana et al., 2019)	10
Figura 2 Proceso producción aluminio primario y secundario(Shinzato & Hypolito, 2005)	11
Figura 3. Proceso de producción cemento tomado de (Gessa Ana y Sancha Pilar, 2016)	12
Figura 4. Grafica adaptada de Farjana et al. (2019),de Kg de dióxido de carbono generado para la producción de 1Kg de aluminio material.....	13
Figura 5 Usos de la escoria de aluminio (Lemos et al., 2020).....	16
Figura 6. Esquema metodológico del proyecto, Fuente: Propia.....	23
Figura 7 Equipo tamizado mecánico, Fuente: (Orozco Erazo & Vega Báez, 2022).....	27
Figura 8 Curva granulométrica arena rio cauca, Fuente: Propia	27
Figura 9 Granulometría laser de cemento ART (Alta Resistencia Temprana).....	29
Figura 10 Equipo de tamizado mecánico, Fuente: Propia	31
Figura 11 Escorias tamizadas, Fuente: Propia.....	32
Figura 12 Equipo para SEM, Fuente: propia	33
Figura 13 Relación A/C, resistencia a la compresión y el módulo de finura, Fuente: (Sánchez de Guzmán, 2001).....	34
Figura 14 Fluidez vs relación A/C, Fuente: propia.....	34
Figura 15 (a)Proceso de mezclado mortero, (b)proceso de llenado formaletas, (c) curado de morteros y (d) Mortero endurecido, Fuente: Propia	38
Figura 16 Proceso de ensayo de fluidez, Fuente: Propia	40
Figura 17 Ensayo de densidad en estado fresco, Fuente: propia	41
Figura 18 Cubos para ensayo de compresión, Fuente: propia	42
Figura 19 Viga de mortero 16x4x4 Cm fallada, Fuente: Propia.....	42
Figura 20 Mitades de vigas ensayadas a compresión, Fuente: Propia.....	43

Figura 21 Cubos de mortero secados al horno, Fuente: Propia.....	43
Figura 22 comparación DRX escoria sin lavar y escoria lavada, Fuente: Propia.....	46
Figura 23 Toma SEM escoria aluminio sin lavar, Fuente: Propia.....	47
Figura 24 Toma SEM escoria aluminio lavada, Fuente: Propia.....	48
Figura 25 Granulometría laser escoria de aluminio, escoria sin apagar y moler, Fuente: Propia	49
Figura 26 granulometría laser de escoria aluminio lavada sin moler, Fuente: Propia.....	49
Figura 27 DRX Escoria gruesa, intermedia y fina apagadas y molidas, Fuente: Propia.....	51
Figura 28 Comparación DRX escoria lavada y los diferentes tamaños de partícula para escoria molida, Fuente: Propia.....	52
Figura 29 Escoria lavada y molida gruesa.....	53
Figura 30 Escoria lavada y molida intermedia.....	53
Figura 31 Escoria lavada y molida fina.....	54
Figura 32 Granulometría laser acumulada escoria aluminio, escoria apagada tamaño grueso	54
Figura 33 Granulometría laser acumulada escoria aluminio, escoria apagada tamaño grueso	55
Figura 34 Granulometría laser individual de escoria aluminio, escoria apagada tamaño intermedia.....	55
Figura 35 Granulometría laser acumulada escoria aluminio, escoria apagada tamaño Intermedia.....	55
Figura 36 Granulometría laser individual de escoria aluminio, escoria apagada tamaño fina	56
Figura 37 Granulometría laser acumulada escoria de aluminio, escoria apagada tamaño fina	56
Figura 38 Penetración vs contenido de agua, Fuente: propia.....	58

Figura 39 Penetración vs Tiempo, Fuente: Propia.....	59
Figura 40 Fluidez mezclas, Fuente: Propia.....	60
Figura 41 Resistencia a la compresión en cubos en MPa, Fuente: propia.....	62
Figura 42. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión respecto a mortero referencia, Fuente: propia	64
Figura 43 Resistencia a la compresión en mitades de vigas en MPa, Fuente: propia	66
Figura 44 Pérdida de resistencia a la compresión en mitades de viga respecto a mortero referencia, Fuente: propia	67
Figura 45 Resistencia a la flexión en vigas, Fuente: Propia	69
Figura 46 Pérdida de resistencia a la flexión en vigas respecto a mortero referencia, Fuente: propia	70
Figura 47 SEM diferentes muestras de mortero, Fuente: Propia.....	72
Figura 48 Absorción a los 28 Días, Fuente: Propia	74
Figura 49 Resistencia a la compresión de cubos vs resistencia a la flexión, Fuente: Propia	75
Figura 50 Resistencia a la compresión de mitades de viga vs resistencia a la flexión, Fuente: Propia.....	76
Figura 51 resistencia a la compresión en cubos vs absorción, Fuente: Propia	77
Figura 52 resistencia a la compresión en mitades de viga vs absorción, Fuente: Propia	77
Figura 53 Resistencia a la flexión en viga vs absorción, Fuente: Propia	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Resumen estado del arte	20
Tabla 2. Materiales utilizados para la fabricación de morteros con su respectiva fuente de obtención, Fuente: Propia	24
Tabla 3 Resumen de parámetros de la arena rio Cauca, Fuente: Propia.....	26
Tabla 4 Resumen propiedades cemento, Fuente: Propia	28
Tabla 5 Tamices para separación de escoria aluminio, Fuente: Propia.....	30
Tabla 6 Parámetros iniciales para diseño de mezcla, Fuente: Propia	33
Tabla 7. Valor de b según la consistencia y el módulo de finura, Fuente: (Sánchez de Guzmán, 2001).....	35
Tabla 8 Resumen diseño de mezcla para 1 m ³ de mortero, Fuente: propia.....	36
Tabla 9 Diseño experimental, Fuente: Propia.....	37
Tabla 10 Nomenclatura mezclas de mortero, Fuente: Propia.....	37
Tabla 11 ensayos estado endurecido según edades	41
Tabla 12 Granulometría laser, Fuente: Propia.....	50
Tabla 13 Granulometría laser, Fuente: Propia.....	57
Tabla 14 Tiempo de fraguado inicial para cada mezcla de cemento y escoria, Fuente: propia	59
Tabla 15 Ensayo de fluidez, Fuente: Propia	60
Tabla 16 Resistencia a la compresión en cubos, Fuente: Propia	61
Tabla 17 Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión en cubos respecto a mortero referencia, Fuente: Propia.....	63
Tabla 18 Resistencia a la compresión en mitades de viga, Fuente: Propia	65

Tabla 19 Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión en mitades de viga respecto a mortero de referencia, Fuente: Propia	67
Tabla 20 Resistencia a la flexión en vigas, Fuente: Propia	68
Tabla 21 Porcentaje de pérdida de resistencia a la flexión en vigas respecto a mortero referencia, Fuente: Propia.....	70
Tabla 22 Porcentaje de absorción total a los 28 días, Fuente: propia.....	73
Tabla 23 Aumento de absorción de los morteros frente al mortero de referencia, Fuente: Propia.....	74

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 determinación del factor n	35
Ecuación 2 determinación cemento (kg/m ³).....	35
Ecuación 3 Determinación agua (L/ m ³).....	36
Ecuación 4 determinación agua (kg/ m ³).....	36
Ecuación 5 Calculo de la fluidez del mortero.....	39
Ecuación 6 cálculo de densidad en estado fresco	40
Ecuación 7 Calculo de densidad bulk (a), densidad bulk saturada (b), densidad aparente (c) y porcentaje absorcion (c).....	44

RESUMEN

Debido al crecimiento económico y los procesos de expansión de las ciudades, la demanda de vivienda ha incrementado y el sector de la construcción ha tenido que esforzarse por satisfacerla generando más proyectos a fines, lo cual conlleva también a un aumento en la necesidad de materia prima y por consiguiente en las emisiones de contaminantes en toda la línea de producción de este sector económico. Como lo es el caso de la producción de aluminio, el cual consta de dos diferentes procesos de producción uno que se enfoca en la transformación de materia prima como la bauxita la cual es extraída bajo procesos de excavación y posterior transformación en industrias (producción primaria) y un segundo proceso de producción el cual consiste básicamente en el reusó de aluminio presente en insumos de cocina, hogar, construcción entre otros (producción secundaria).

Los residuos de los procesos de producción de aluminio se clasifican según su contenido de aluminio, al igual que su composición química general, la cual varía según el proceso del cual provienen. Estas escorias se consideran residuos peligrosos por sus componentes químicos, debido a que estos residuos poseen componentes inflamables, irritantes y corrosivos, entre otros (Li et al., 2021).

En el presente trabajo de grado se estudió la inclusión de escoria de aluminio como sustituto del cemento en la preparación de morteros, evaluando los efectos del tamaño de partícula (fina $<75\mu\text{m}$, intermedio $(75-150\mu\text{m})$ y tamaño grueso $(150-300\mu\text{m})$ y el porcentaje de sustitución (5% ,10% y 20%) por cemento en el comportamiento mecánico de estos morteros.

Como resultados se obtuvo que al realizar un proceso de lavado con agua a la escoria de aluminio este no elimina totalmente AIN de la escoria el cual posiblemente influye en las propiedades mecánicas de las diferentes mezclas de mortero debido a que probablemente genere amonio al entrar en contacto con el agua de la mezcla. Por otro lado se encontró que los morteros con inclusión de escoria de aluminio presentaron aumento de las propiedades mecánicas (compresión y flexión) con el paso del tiempo como las demás mezclas con componentes cementicos y de igual manera su correlación inversa con la absorción. Finalmente se encontró que los morteros con escoria fina con tamaño de partícula $<75\mu\text{m}$ y un porcentaje de sustitución 5% del cemento presento una menor disminución en las propiedades mecánicas respecto al mortero de referencia con diseño de mezcla para 28MPa.

Abstract

Due to economic growth and the expansion processes of cities, the demand for houses has increased and the construction sector must try to satisfy the request. which also leads to an increase in the need for raw material, and therefore in pollutant emissions throughout the production line of this economic sector. As is the case of aluminum production, which consists of two different production processes, one that focuses on the transformation of raw material such as bauxite, which is extracted under excavation processes and subsequent transformation in industries (primary production), and a second processes that involve the reuse of aluminum present in kitchen, household, and construction supplies, among others (secondary production).

Waste from aluminum production is classified according to its aluminum content and general chemical composition, which varies according to the manufacturing process. These drosses are considered hazardous waste due to their chemical components that are flammable, irritating, and corrosive, among others (Li et al., 2021).

In the present work, the inclusion of aluminum dross as a substitute for cement in the preparation of mortars is studied, evaluating the effects of particle size (fine $<75\mu\text{m}$, intermediate (75-150 μm) and coarse size (150-300 μm). and the substitution percentage (5%, 10% and 20%) by cement in the mechanical behavior of these mortars.

As a result, it was obtained that when carrying out a water washing process on the aluminum slag, it does not eliminate completely AlN from the slag, which possibly affects the mechanical properties of the different mortar mixtures because it probably generates ammonia upon contact with the mixing water. On the other hand, it was found that the mortars with the inclusion of aluminum dross showed an increase in mechanical properties (compression and flex) with the passage of time like the other mixtures with cement components. The mortars also has an inverse relation in the mechanical properties with the absorption of this. Finally, it was found that the mortars with fine slag with a particle size $<75\mu\text{m}$ and a substitution percentage of 5% of the cement presented a smaller decrease in the mechanical properties with respect to the reference mortar with a mix design for 28MPa.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de implementar medidas sostenibles en todos los aspectos del hogar, la industria, la agricultura, entre otros, ha surgido a partir de problemáticas como el hambre, la pobreza extrema, el cambio climático, la pérdida de la biodiversidad, entre otros, presentados por la ONU (2015), y como resultado del cual se plantearon los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Los objetivos número 9 de “Industria innovación e infraestructura”, número 12 de “Producción y consumo responsables” y número 13 “Acción por el clima”, tienen como propósito el de implementar medidas que permitan eliminar la pobreza, proteger el medio ambiente y mejorar las condición de vida de las personas (ONU, 2015) además que se han relacionado con la economía circular, la cual es definida por el Dane (2020) como *“Sistema de producción y consumo que promueve la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas y el uso circular de los flujos de materiales a través de la implementación de innovaciones tecnológicas, alianzas y colaboraciones entre los actores, y el impulso de nuevos modelos de negocio que respondan a los fundamentos del desarrollo sostenible”*.

En Colombia muchos habitantes han migrado a las ciudades debido al crecimiento económico y a los acelerados procesos de urbanización resultado del desplazamiento forzado por la violencia y la búsqueda de oportunidades. Como consecuencia de lo anterior, la demanda de vivienda se ha incrementado y el sector de la construcción ha tenido que trabajar por satisfacerla, generándose un aumento en las emisiones de contaminantes en toda la cadena de producción de este sector económico, lo cual a su vez lleva a que se produzcan residuos debido a la obtención y transformación de los materiales de construcción.

Por otro lado, la transformación de minerales y metales generan emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero y produce residuos que han sido poco estudiados en el país. El aluminio es uno de ellos, el cual es un material altamente usado a nivel mundial en diferentes industrias como es el caso de la construcción.

La producción de aluminio se realiza a partir de dos procesos, uno llamado producción primaria, que se puede considerar poco efectivo debido a que para la producción de 1 kg aluminio es necesario utilizar 4 kg de bauxita (Sistema español de inventario de emisiones, 2019); de este

proceso se genera la llamada escoria blanca que tiene un alto contenido de aluminio; El segundo proceso de producción de aluminio consiste en la fundición de residuos generados en diferentes industrias y uso de residuos domésticos, tales como: elementos de cocina, cableados, perfilería, entre otros. En este proceso se utilizan sales fundentes para facilitar la transformación del material. Durante la fabricación de aluminio se generan escorias salinas, llamadas también tortas de sal, las cuales tienen un alto contenido de sales fundentes; además, se produce durante este proceso escoria negra que cuenta con un bajo contenido de aluminio.

Los residuos de los procesos de producción de aluminio se clasifican según su contenido de aluminio, al igual que su composición química general, la cual varía según el proceso del cual provienen. Estas escorias se consideran residuos peligrosos por sus componentes químicos, debido a que estos residuos poseen componentes inflamables, irritantes y corrosivos, entre otros (Li et al., 2021).

Según David & Kopac (2013), la escoria negra y la torta de sal terminan comúnmente en rellenos sanitarios, siendo agentes contaminantes sólidos y se estima que la producción global de escoria de aluminio en los procesos primarios y secundarios son más de cuatro millones de toneladas y un millón de toneladas, respectivamente (Li et al., 2021).

La escoria de aluminio es un residuo peligroso, porque al entrar en contacto con el agua se genera amonio según Li et al. (2021), este componente tiene un olor desagradable y riesgoso para la salud de las personas dado su carácter irritante y corrosivo. Otro componente que también se puede producir es el metano, el cual debido a su carácter inflamable puede provocar incendios en espacios no adecuados para su disposición. En el caso de que la escoria se disponga en rellenos sanitarios, puede ocurrir lixiviación, generando acumulación de metales pesados en el suelo, plantas e incluso presentarse en el agua, afectando negativamente la salud de las personas y los recursos naturales asociados.

Como una alternativa para disminuir el efecto nocivo en el medio ambiente de la escoria de aluminio, en este proyecto se estudió el efecto de utilizar este material como sustituto parcial de cemento en morteros y su impacto en las propiedades mecánicas de los mismos. Para ello se realizaron mezclas en diferentes proporciones de escoria en reemplazo de cemento (i.e. 5, 10 y 20%) y variando el tamaño de partícula (i.e. fina, intermedia y gruesa), donde la sustitución del 5% para los diferentes tamaños de partícula superan el diseño de mezcla objetivo. Todo lo anterior

con el propósito de buscar una alternativa para reducir la disposición de la escoria en rellenos sanitarios o zonas no aptas para ello y de esta manera mitigar los riesgos medio ambientales que este puedan ocasionar. De igual manera, se busca impulsar su uso en la industria cementera e incentivar la disminución de la producción de cemento.

1.1. Definición del problema de investigación

El aluminio es un material utilizado en diferentes industrias productivas a nivel mundial, es usado en la fabricación de: perfiles metálicos extruidos, laminados, material moldeado por procesos de fundición y también para producción de alambres, cableados, entre otros (CRU International Limited, 2018).

Según Mahinroosta & Allahverdi (2018) para el año 2020 se esperaba una demanda global de 97 millones de toneladas de aluminio.

Por otro lado, el proceso de producción de aluminio se puede realizar de las siguientes dos formas:

- Producción primaria: la cual consiste en la transformación de bauxita extraída en procesos mineros, la cual posteriormente se transforma en alúmina mediante el proceso Hall-Heroult. Finalmente este material se refina mediante un proceso electroquímico para la obtención de aluminio.
- Producción secundaria: consiste en el reciclaje de chatarra de aluminio, la cual es fundida y reutilizada (David & Kopac, 2013; Farjana et al., 2019; Shinzato & Hypolito, 2005).

La escoria de aluminio es un residuo inevitable, generado durante el proceso de fundición de aluminio, debido a la reacción de la superficie del aluminio líquido con la atmósfera.

Las escorias se clasifican en tres tipos dependiendo de la técnica de producción: escorias blancas, negras y torta de sal (David & Kopac, 2013). Las blancas se generan durante la producción de aluminio primario, su nombre se debe a su color claro. En la producción secundaria se produce la escoria negra y la torta de sal, donde la segunda se produce por lo general en plantas de extrusión, plantas de laminación y fundiciones, además de que corresponde con la que se estudiará en este proyecto de investigación.

Según David & Kopac (2013), la escoria negra y la torta de sal terminan comúnmente en rellenos sanitarios y se estima que la producción global de escoria de aluminio de los procesos primarios y secundarios son más de cuatro millones de toneladas y un millón de toneladas, respectivamente (Li et al., 2021).

Li et al. (2021) establecen que la acumulación de escoria de aluminio obtenida del proceso secundario es peligrosa, debido a que si hay humedad en el ambiente la escoria reacciona con el agua y se pueden producir gases como amonio (NH_3) y metano (CH_4).

El amonio tiene un olor desagradable y es considerado peligroso, debido a su efecto irritante y corrosivo. El metano es un material inflamable. Además de amonio y el metano, se pueden generar otros productos que se lixivian en los rellenos y generan la acumulación de metales pesados en el suelo y vegetales que conllevan un riesgo para la salud humana y animal.

En la actualidad, uno de los mayores retos de la industria de la construcción es plantear viviendas sostenibles, especialmente en relación con los materiales. La demanda de grandes cantidades de materiales de construcción ha incrementado conforme el crecimiento económico y se aceleran los procesos de urbanización en las ciudades; por tal motivo, se busca obtener el uso de este residuo de procesos industriales, como lo es la escoria de aluminio, para disminuir sus efectos en la contaminación y aportar en la generación de viviendas sostenibles.

Este proyecto de investigación estudió la posibilidad de utilizar la escoria generada, como reemplazo del cemento Portland en la fabricación de morteros, buscando dar uso a un residuo industrial, disminuyendo así su disposición en rellenos sanitarios, y la generación de condiciones peligrosas por su acumulación e incorporando este residuo a la cadena productiva del sector de los materiales de construcción.

De esa forma se convertiría la escoria en un subproducto útil, permitiendo la generación de una economía circular, además de evitar su disposición final y mitigar los riesgos ambientales por su acumulación en rellenos sanitarios y de sus componentes que afectan la salud. Por otro lado, se busca disminuir la utilización del cemento en la fabricación de materiales cementicios y por lo tanto reducir la explotación de recursos naturales y su uso en la fabricación de morteros y la consiguiente emisión de gases de efecto invernadero producto de su producción y uso.

Partiendo del anterior planteamiento se buscó incorporar la escoria de aluminio en los morteros como sustituto del cemento, con el fin de encontrar un uso para la escoria y que esta no sea depositada en rellenos sanitarios, para ello se buscó abordar esta problemática a partir de la siguiente pregunta de investigación.

¿Cómo la incorporación de escoria de aluminio y el tamaño de partícula afecta las propiedades mecánicas de morteros?

1.2 Objetivos del proyecto

A continuación, se describen los objetivos que se pretenden desarrollar con esta investigación.

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del tamaño de partícula y sustitución parcial del cemento con escoria de aluminio en la preparación de morteros, para validar su uso como material de construcción

1.2.2 Objetivos específicos

El objetivo general se pretende alcanzar cuando se desarrollen los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar los materiales para la elaboración del diseño de mezcla del mortero estructural.
- Determinar las propiedades mecánicas de morteros con reemplazos parciales de cemento por escoria de aluminio.
- Evaluar la influencia del tamaño de partícula y cantidad de reemplazo de escoria de aluminio por cemento, en las propiedades físicas y mecánicas de morteros estructurales.

1.2.3 Alcance del trabajo de grado

Esta investigación evalúo el impacto en las propiedades mecánicas y físicas del tamaño de partículas y la sustitución parcial del cemento por escoria de aluminio en la preparación de morteros. Para ello se elaboraron muestras de laboratorio controladas y se evaluaron las

propiedades físico-mecánicas como flexión y compresión; a partir de esto se analizó la validez de incorporar la escoria de aluminio en la fabricación de morteros.

Es importante aclarar, que los resultados serán aplicables a los materiales seleccionados, los cuales fueron los disponibles en la ciudad de Cali para la fabricación de morteros, así como para la escoria estudiada, estos materiales pueden ser utilizados también como referente para futuras investigaciones a desarrollar, por ejemplo, incorporar escoria de aluminio en concretos.

1.3 Justificación del trabajo de grado

En septiembre del año 2015 la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) establecieron una serie de objetivos de desarrollo sostenible, enfocados en la solución de problemáticas tales como: el hambre, la pobreza extrema, el cambio climático, entre otros que permitan el desarrollo económico de los países y los cuales tendrán como objetivo ser implementados para el año 2030 (ONU, 2015).

Uno de estos objetivos corresponde con el objetivo número 12, el cual trata sobre la producción y el consumo responsable. La ONU (2020) establece que para el año 2050, si la población llega a un estimado de 9600 millones de habitantes, sería necesaria aproximadamente tres veces la capacidad actual del planeta para producción de recursos, al igual que se estima un incremento en la población de la clase media. Este aumento significa que se espera una mejora de las condiciones de calidad de vida y economía de la población, lo cual permita la transferencia de poblaciones de clase baja a media y aumento de la existente, teniendo como resultado de este incremento un fuerte aumento de la demanda con la consecuente producción de insumos y bienes de consumo.

Según lo expresado por Adedoyin *et al.*(2020), los procesos de industrialización se relacionan directamente con la producción de dióxido de carbono (CO₂) que causa contaminación, incremento de la temperatura mundial y el cambio climático. Por tal motivo, el objetivo número 13 de la ONU complementa esta visión, buscando medidas para enfrentar el cambio climático, donde uno de sus propósitos es la reducción de las emisiones de dióxido de carbono asociado al aumento de la demanda y producción de recursos junto al uso de otras fuentes de energía.

Como es bien sabido, la industrialización se relaciona directamente con el incremento del PIB y de acuerdo con la Cámara Colombiana de la Construcción (2020) en las estadísticas recogidas

se puede calcular que el sector de la construcción cuenta con una participación promedio del 5% en el PIB nacional. dicha actividad está fuertemente relacionada con la industria manufacturera metálica (acero, aluminio, entre otros) y por tal motivo el incremento general de proyectos de construcción implica también una mayor demanda de esta industria de producción y otros.

Partiendo de la idea anterior, en Colombia, debido al crecimiento económico y los procesos de expansión de las ciudades, ocasionado por el desplazamiento forzado por violencia y mayor búsqueda de oportunidades, muchos colombianos han migrado a las ciudades. Por tal motivo la demanda de vivienda ha incrementado y el sector de la construcción ha tenido que trabajar por satisfacerla generando más proyectos, lo cual conlleva también a un aumento la necesidad de materia prima y por consiguiente de las emisiones de contaminantes en toda la cadena de producción de este sector económico.

La empresa CRU International Limited (2018) expresa que para el año 2017 la producción de aluminio secundario (reciclado) equivalía, para esa época, al 28% de la demanda internacional y el restante de 72% provenía de producción primaria a partir de bauxita, la cual es extraída del suelo. Como relación para la producción de una tonelada de alúmina es necesario el uso de 2,9 toneladas de bauxita (Farjana et al., 2019), donde la alúmina es el material básico para la producción de aluminio en sus distintas presentaciones de acuerdo con su uso. El subproducto de este proceso es considerado tóxico y radiactivo en algunas ocasiones, lo cual ha generado problemas de disposición de estos a nivel global, pues debido a esto se ha negado su vertimiento en rellenos como lo es el caso de Europa. La producción “red mud” (subproducto de obtención de alúmina) varía entre 1 y 1,6 toneladas por tonelada de alúmina (Tsakiridis, 2012), lo cual representa entre el 35% y 56% del material base que es la bauxita.

Según los datos de Farjana, Huda y Mahmud (2019), en la producción de 2,9 toneladas de bauxita se generarían 229,1 kg de dióxido de carbono los cuales impactan el cambio climático. Adicionalmente en la industria de la construcción, la producción de cemento es uno de los principales productores de CO₂ en el mundo, con una participación del 8% en la producción de CO₂, donde el 70% proviene de la calcinación de la piedra caliza (Negrão et al., 2021).

Por tal motivo, si se establecen opciones de sustitución de cemento parcial con material de la escoria de aluminio, se contribuiría en la reducción de disposición de productos nocivos para el medio ambiente (escoria de aluminio) en rellenos sanitarios y se reduciría la producción de

cemento, contribuyendo en la reducción de explotación de materias primas para su fabricación y disminución de generación de CO₂.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación, se presenta la revisión del estado del arte en torno al cual se realizó el proyecto de investigación. Se comenzará presentando los materiales principales y se explicarán las propiedades de los morteros, sus procesos de producción y de la escoria como subproducto de la producción de aluminio. Posteriormente, se exponen los distintos tipos de escoria de aluminio generadas como residuo de los procesos de producción y finalmente, se revisan las condiciones estudiadas que afectan el potencial uso de la escoria de aluminio en morteros y concretos. En este capítulo se consultaron referencias y se citaron aspectos relevantes que expone la literatura especializada sobre el tema en investigación.

2.1 Procesos de producción del aluminio y el cemento

El proceso de fabricación del aluminio se puede realizar de dos maneras, una de ellas a partir del material base de obtención de aluminio, el cual corresponde con la transformación de bauxita extraída en procesos mineros, donde esta produce alúmina, la cual se refina para la obtención de aluminio, este proceso se conoce como producción primaria (Farjana et al., 2019).

En la Figura 1 se presenta básicamente el proceso primario de transformación de un material base.

El segundo proceso se conoce como producción secundaria, consiste básicamente en el reciclaje de chatarra compuesta de aluminio para la obtención del material y su posterior transformación. Durante este proceso se realiza la fundición de chatarra de aleaciones de aluminio y para ello se utilizan hornos con altas temperaturas, de los cuales se producen lingotes y cilindros para extrusión, entre otros.

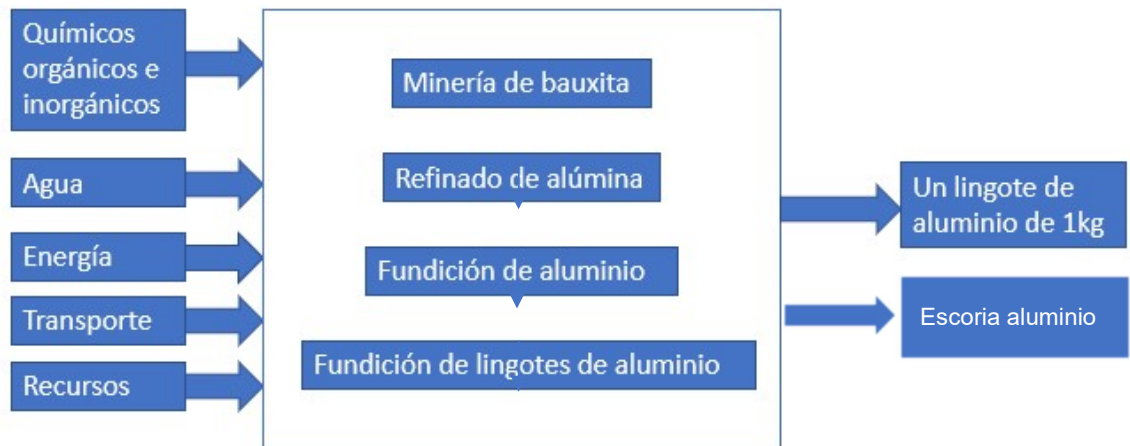


Figura 1. Proceso de fabricación de aluminio (Farjana et al., 2019)

Uno de los residuos del proceso de producción de aluminio es la escoria, que se clasifica de acuerdo con el contenido de Al en: Escoria con alto contenido de metal (escoria blanca), escoria con bajo contenido de metal (escoria negra) y residuos no metálicos (torta de sal). Los usos de esos serán mostrados más adelante. Como se observa en la Figura 1, el proceso de producción primario utiliza recursos no renovables, extraídos del suelo, como complemento los procesos primarios y secundarios realizan consumo de grandes cantidades de energía ya sea eléctrica o calórica, las cuales están asociados a la producción de dióxido de carbono.

Como lo presenta el Instituto Internacional de Aluminio (IAI) para el año 2022 se produjeron 68,461 millones de toneladas de aluminio a nivel mundial reportado por las empresas miembros, donde la región de China produjo un estimado del 59,1% de este, seguido por los países como Bahrain, Oman, Qatar, Arabia Saudita y los Emiratos Árabes, quienes produjeron alrededor del 8.9% de este (International Aluminium Institute, 2022), para el año 2016 Colombia producía alrededor de 52 200 toneladas de aluminio al año (Quintero, 2016).

En la Figura 2 se presenta el proceso general de producción de aluminio para los métodos primarios y secundarios.

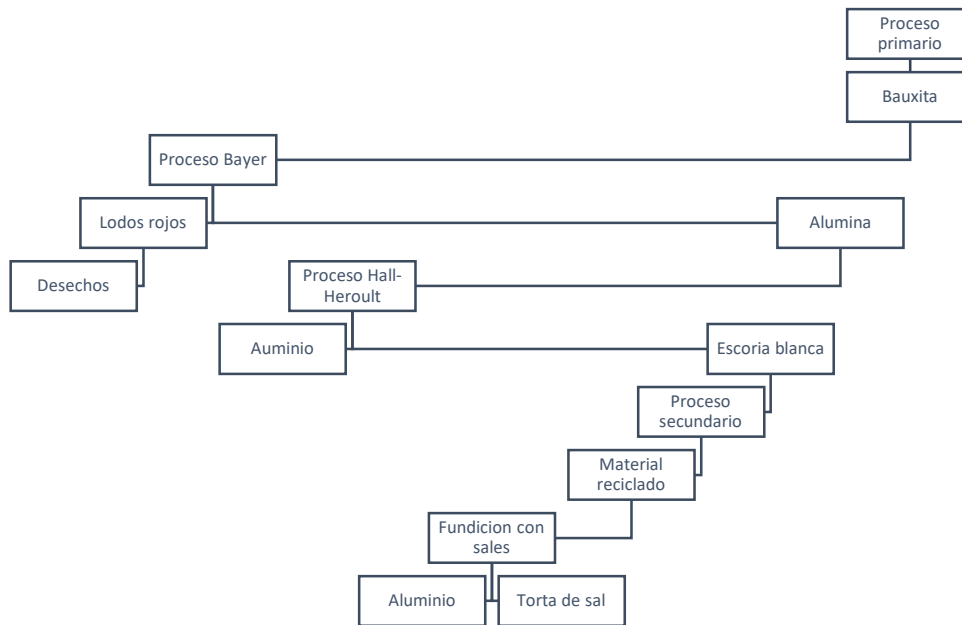


Figura 2 Proceso producción aluminio primario y secundario(Shinzato & Hypolito, 2005)

Por otra parte, para la producción de cemento se realiza el uso de materiales tales como, piedras calizas, arcillas, minerales de hierro y yeso, los cuales cuentan con altos contenido de cal, silicio y aluminio, respectivamente. El proceso inicial corresponde con la extracción de piedra caliza y arcillas de canteras para el cual se realiza uso de maquinaria pesada y explosivos, estos productos son posteriormente transportados y triturados para ser procesados. Ambientalmente este proceso requiere grandes intervenciones ambientales debido a que durante este se realiza la modificación de terrenos, producción de altos niveles de ruido, producción de agentes contaminantes como polvo y humos nocivos para la respiración.

En el proceso de producción del cemento se tritura el mineral pétreo, posteriormente se muelen con el fin de reducir su tamaño a un material bastante fino, el cual es quemado en hornos los cuales alcanzan temperaturas de 1200 y 1450 °C, (Mohamad et al., 2021), esto con el fin de descomponer la piedra caliza cuyo componente es el trióxido de calcio CaCO_3 , convirtiéndolo luego en óxido de calcio CaO . Durante este proceso se genera contaminación por la producción gases como el dióxido de carbono CO_2 resultado del uso de combustibles fósiles para incrementar la temperatura en los hornos (Sousa & Bogas, 2021), la Figura 3 resume el proceso de producción cementero.

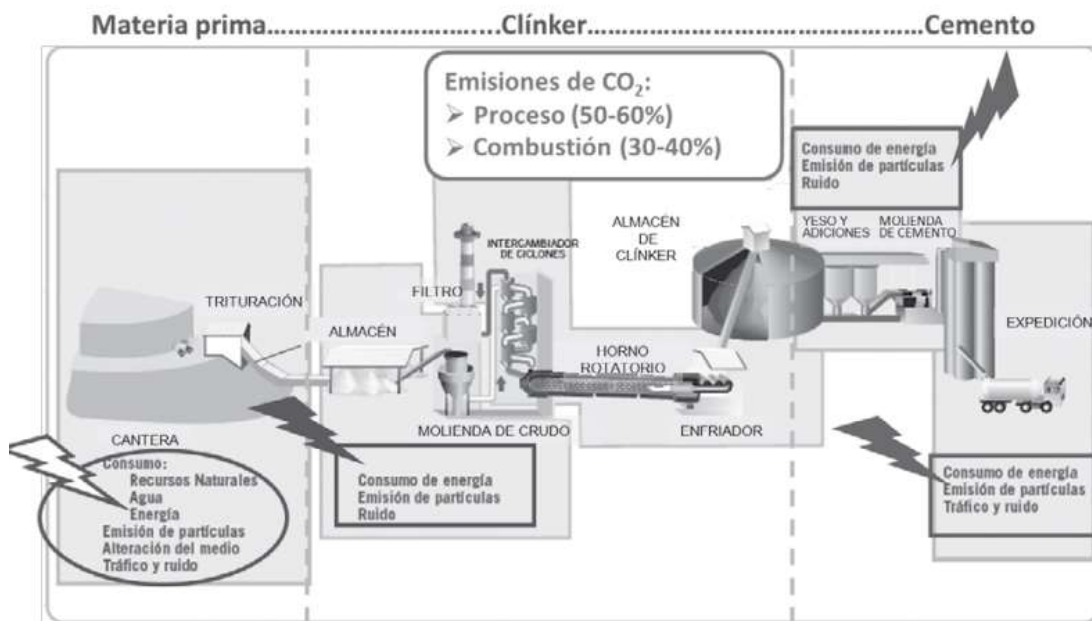


Figura 3. Proceso de producción cemento tomado de (Gessa Ana y Sancha Pilar, 2016)

Para el año 2019, a nivel mundial, el sector industrial (acero, cemento y químicos) fue responsable de la producción de 8,5 Gt CO₂, de los cuales el 70% corresponde con la quema de combustibles fósiles (Cozzi et al., 2020).

2.2 Producción de dióxido de carbono y contaminación ambiental

La generación de dióxido de carbono en la producción de aluminio deriva principalmente del uso de equipos eléctricos y equipos de fundición que consumen combustibles fósiles. De igual manera para el caso de la industria del cemento, a continuación, se presentan algunas estadísticas a nivel mundial.

La información reunida por Farjana et al. (2019) adaptada en la Figura 4, expone cuales son los consumos requeridos para la producción de bauxita, alúmina y aluminio, considerando la producción de 1 kg de cada material. Teniendo en cuenta esta relación y contando con la producción de aluminio de estos años se puede estimar que para el año 2017 se produjo un total de 61 Kg de dióxido de carbono junto a otros gases de efecto invernadero a nivel mundial por cada kilogramo de aluminio producida; esto sin considerar los procesos previos, adicionalmente como

otro aspecto relevante del proceso es que se producen 1.38 toneladas de basuras como desperdicios por kilogramo producido.

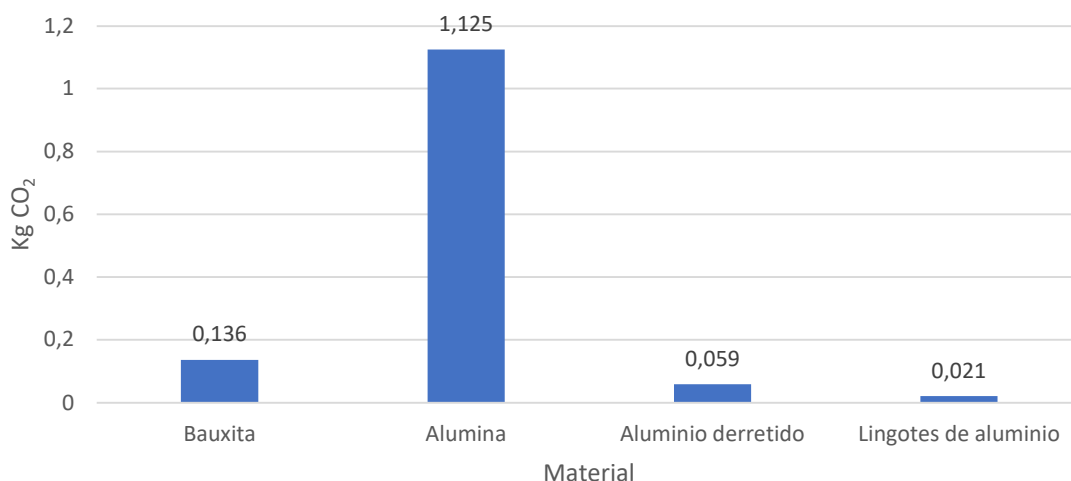


Figura 4. Grafica adaptada de Farjana et al. (2019), de Kg de dióxido de carbono generado para la producción de 1Kg de aluminio material

Adicional al panorama del aluminio, según Sousa & Bogas (2021), la producción de cemento es considerada el tercer generador de dióxido de carbono en el mundo, por debajo del consumo de combustibles fósiles y los cambios en la superficie terrestre producto de la quema de materiales.

Para el año 2018, la producción de CO₂ a nivel mundial corresponde con 1,50 GTon, donde la producción de cemento cuenta con una participación del 8% de las cuales el 70% proviene de la calcinación de la piedra caliza (Negrão et al., 2021).

2.3 Generalidades de los morteros

Los morteros se definen como mezclas de materiales conglomerantes, agregados finos y agua, los cuales son utilizados en construcción para pega de mampostería, recubrimientos en fachada y acabados, entre otros usos (Sanchez de Guzman, 2001); Según el autor, estos se pueden clasificar de diferentes maneras, a continuación se presentará una clasificación de acuerdo con los materiales que lo conforman.

- Morteros calcáreos: son aquellos que están compuestos por cal, arena y agua. Sus capacidades de mecánicas son bajas.

- Morteros de cal y cemento Portland: Son aquellos que están compuestos por cemento, arena y cal; cuyo uso principal es la pega de mampostería donde se destaca su prolongado uso entre la preparación, colocación y el proceso de endurecimiento en la construcción de muros por su trabajo manual.
- Morteros de cemento: son aquellos que están compuestos de arena y cemento. Estos se destacan por tener altas resistencias y una similitud a los concretos, en cuanto a propiedades mecánicas, dependiendo de la relación de agua y cemento utilizada.

Entre los componentes principales de los morteros se encuentran:

- Cemento Portland: este corresponde con un aglomerante inerte, el cual otorga las propiedades físicas y mecánicas de los morteros y concretos dependiendo del grado de hidratación. Entre sus componentes principales se encuentran el calcio (Ca), el Oxígeno (O), Silicio (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), entre otros estos se presentan como silicato tricálcico (Ca_3S forma abreviada), Silicato dicálcico (Ca_2S forma abreviada), Aluminato tricálcico (Ca_3A forma abreviada) y Ferro aluminato tetracálcico (Ca_4AlF forma abreviada) (Yang & Li, 2022).
- Arena o agregado fino: Este material corresponde con un material pétreo natural o artificial que funciona principalmente de relleno y soporte.
- Agua: Corresponde con el líquido que reacciona con el cemento hidratándolo e inicia el proceso de aglutinación y endurecimiento de este.

A continuación, se presentarán algunas propiedades de los morteros en estado fresco y endurecido

2.3.1 Estado fresco

Se entiende como estado fresco aquel estado del mortero en el cual el cemento, la arena y el agua se encuentran mezclados, hasta el tiempo inicial de fraguado, cuando deja de comportarse como un fluido y pasa a comportarse como un sólido. A continuación, se listan algunas de sus propiedades:

- *Manejabilidad o fluidez*: consiste en la capacidad del mortero de ser manipulado durante su aplicación y no segregarse durante su manejo. La verificación de su calidad

se realiza en la mesa de flujo, el cual está explicado en la norma ASTM C1437 o su adaptación a la normativa colombiana en la norma NTC 5784.

- *Tiempo de fraguado*: corresponde al tiempo en el cual el mortero inicia su proceso de endurecimiento (fraguado inicial) y su endurecimiento total (fraguado final). La verificación de la calidad de tiempo de fraguado se realiza mediante el ensayo de penetración con aguja de Vicat. La norma que explica el desarrollo de este ensayo corresponde con la ASTM C807 o su adaptación a la normativa colombiana en la norma NTC 4088.
- *Masa unitaria en estado fresco*: es un procedimiento consistente en conocer la masa unitaria del mortero en estado fresco. La metodología está explicada en la norma NTC 1926 para concreto, donde se llena un recipiente de volumen conocido y este será pesado con el fin de conocer la masa unitaria.

2.3.2 Estado endurecido

Se entiende como estado endurecido aquel estado del mortero que ya presenta un estado sólido y desarrolla propiedades mecánicas. A continuación, se listan algunas de sus propiedades:

- *Adherencia*: Esta propiedad corresponde a la capacidad del mortero de resistir esfuerzos de tensión entre el mortero y la superficie en la que se encuentra ubicado la norma colombiana para medir esta propiedad corresponde con la NTC 3849.
- *Resistencia*: Esta propiedad corresponde a la resistencia del mortero ante esfuerzos de compresión. La norma aplicada para su medición de calidad es la ASTM C109 y la correspondiente colombiana NTC 220, para evaluar esfuerzos de flexión se usa la norma ASTM C348 y correspondiente colombiana NTC 120 en la cual se mide la flexión a distintas cargas.
- *Durabilidad*: Corresponde con la resistencia del mortero ante el ataque de agentes externos. Esta propiedad se encuentra relacionada con su porosidad y permeabilidad.

De igual manera, como todos los materiales, los morteros cuentan con propiedades físicas tales como densidad, absorción de líquidos, porosidad, color y textura, entre otros.

2.4 Usos de escorias de aluminio en materiales a Base de Cemento

En el estado del arte mostrado por Lemos et al. (2020), se anexan los usos de las escorias de aluminio presentados en la Figura 5.

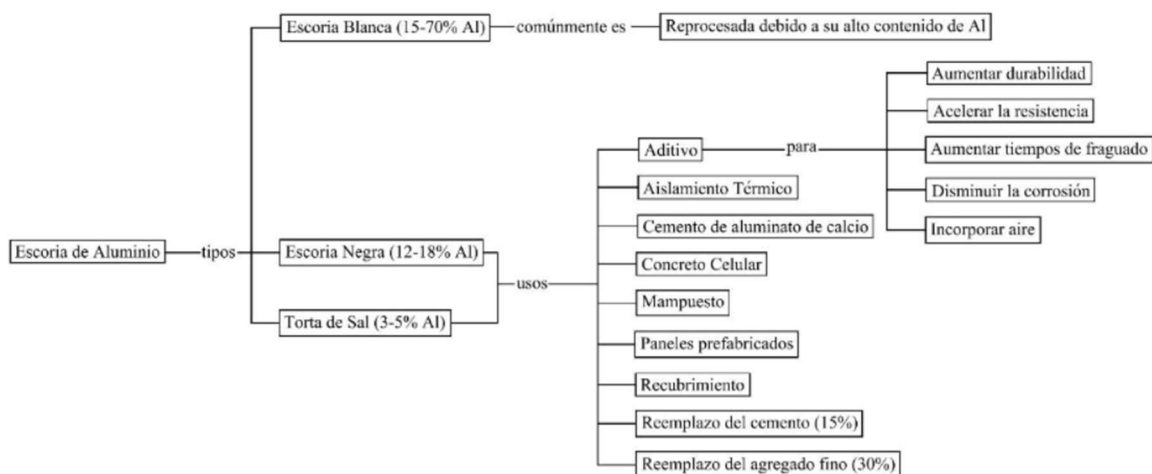


Figura 5 Usos de la escoria de aluminio (Lemos et al., 2020)

Ewais et al. (2009) estudiaron la preparación de cemento de aluminato de calcio preparado a partir de lodos de aluminio (45 a 50%), escoria de aluminio (37,5 a 41,25%) y alúmina (12,5 – 13,75%), este cemento se destaca por su capacidad a soportar grandes temperaturas sin presentar pérdida de sus capacidades físico-mecánicas, el desarrollo del 80% de su capacidad se presenta a las 24 horas. Son morteros resistentes a químicos y otros elementos.

Reddy & Neeraja (2016) estudiaron la incorporación de escoria secundaria en la preparación de concreto; para ello realizaron la sustitución de cemento por escoria, teniendo como resultado que la sustitución del 15 % del cemento en los concretos permite obtener concretos con las mismas capacidades que el convencional; pero con las ventajas de una mejor manejabilidad por la aceleración del proceso de curado.

Mailar et al. (2016), proponen la producción de concretos con una sustitución del 20% del cemento para la preparación, los beneficios en los morteros corresponden con un retraso en el proceso de fraguado, lo cual en ciertas condiciones de alta temperatura es favorable.

Pereira et al. (2000), estudió la incorporación de escorias salinas con contenido de óxidos de aluminio, realizando una sustitución parcial de arena y una sustitución parcial de cemento en estudios separados, donde estableció que la sustitución de cemento debe ser de un 10% del peso

del cemento para no afectar significativamente las propiedades del mortero, y de igual manera establece que una sustitución del 30 al 50% del peso de la arena es posible para preparación de morteros, con menor impacto en los costos de producción.

Song (1997), Araújo y Tenório (2005) estudiaron la producción de concreto celular realizando la sustitución de polvo de aluminio con escoria de aluminio, donde afirman la viabilidad de esta sustitución y sus beneficios económicos, haciendo hincapié en que es necesario conocer la reactividad química de dicha escoria de aluminio al igual que el tamaño de partículas a utilizar para conocer el volumen de gas generado para la producción de estos concretos. Como complemento, Borhan & Hussein (2016) establecieron que, al incrementar la temperatura de los morteros, estos poseen una menor reducción de su resistencia a la compresión, debido a que disminuye la conductividad térmica del mortero y mejora el comportamiento mecánico de este.

Liu et al (2017) estudiaron de igual manera sustituir la incorporación de polvo de aluminio por polvillo de aluminio, este último corresponde con el residuo del proceso de recuperación de aluminio de la escoria blanca. Para realizar esta recuperación, la escoria es molida y separada en un componente grueso con alto contenido de aluminio y un componente fino que corresponde con el polvillo y tiene contenido metálico de aluminio menor al 10%. En este estudio encontraron que se puede reemplazar 1g de polvo de aluminio por 15,6 g de polvillo de aluminio, con el fin de conservar la misma producción de gas utilizado en los concretos celulares; sin embargo, la expansión del concreto y su densidad no varía tanto como con el polvo de aluminio, pero es un sustituto más económico como agente espumoso en estos concretos.

Vijayalakshmi, R y Rajeswari (2018) presentaron un estudio de la incorporación de escoria de aluminio y también de polvo de aluminio en concretos aligerados que usan cemento Portland ordinario, para la producción de estos concretos se identificó que el hidróxido de calcio presente en la matriz de concreto reacciona con el polvo de aluminio, por tanto buscaron reemplazar el polvo por escoria de aluminio, con el fin de obtener el mismo efecto y otorgar un uso a la escoria para evitar su disposición. A partir de este estudio concluyeron que:

- La adición de escoria o del polvo de aluminio disminuye la densidad del concreto a medida que se incrementa su contenido en la mezcla
- La densidad del concreto disminuye a medida que se genera hidrógeno cuando el aluminio se adiciona a la mezcla

- La resistencia a la compresión disminuyó a medida que aumentó el porcentaje de vacíos
- El porcentaje máximo de sustitución de escoria de aluminio corresponde al 10% del cemento.

Panditharadhy, Mulangi, & Shankar (2019) estudiaron el impacto en la trabajabilidad y el tiempo de fraguado al añadir escoria secundaria a la pasta de cemento y a los concretos con cemento Portland ordinario; para ello prepararon mezclas donde reemplazaron el cemento por escoria de aluminio con los siguientes porcentajes 5%, 10%, 15% y 20%, donde encontraron que, al aumentar el contenido de escoria de aluminio en las pastas de cemento, estas requieren de más agua para tener una consistencia normal; también al aumentar el contenido de escoria se retarda el tiempo en el que inicia el fraguado de la mezcla al igual que el tiempo final, también se evidencio en los concretos tiempos de fraguado en el intervalo de 4 a 6 horas; La trabajabilidad de los concretos aumenta al retardarse las reacciones puzolánicas, lo cual permite su uso en zonas de altas temperaturas para su aplicación.

Panditharadhy et al. (2019) presentaron el impacto de la adición de escoria de aluminio secundaria en concretos usando cemento Portland con puzolana. Al igual que el anterior estudio, utilizaron los siguientes porcentajes 5%, 10%, 15% y 20% para sustituir el cemento, para estos concretos se encontró que al aumentar el porcentaje de escoria a la mezcla, esta requería de más agua para mantener una consistencia normal. También encontraron que a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución de escoria el tiempo de fraguado inicial aumentaba, pero el tiempo de fraguado final disminuía, caso contrario con su anterior estudio con cemento ordinario Portland, por tanto su trabajabilidad es menor. Para el caso de las propiedades mecánicas determinaron que a medida que aumentó el porcentaje de sustitución, disminuía la resistencia a la compresión, tensión y flexión de los concretos, aspecto que se puede asociar también al incremento de vacíos en la mezcla por la adición de escoria.

Sun & Yang (2019) investigaron el uso de escoria de aluminio como agente de curado en los concretos, para ello realizaron nueve mezclas diferentes que tenían componentes y porcentajes de yeso, activador A (Al_2O_3 , CaO , C_4A_3 y C_2S), ceniza de carbón, activador B (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) ceniza volcánica y escoria de aluminio. Encontraron que al incorporar la escoria de aluminio a la mezcla se mejora la resistencia al agua y a sulfatos, de igual manera funciona como

agente retardante pero debe tener una relación agua/cemento aproximadamente de 0,45, ya que si cuenta con una relación menor, la hidratación de las partículas de cemento no será la adecuada.

Elseknidy et al. (2020) estudiaron el uso de la escoria de aluminio como sustituto del cemento para concretos enfocados en el uso de la ingeniería de valor (VE por sus siglas en ingles), a partir de esta metodología concluyeron que para concretos con cemento Portland ordinario se puede sustituir hasta un 20% por escoria de aluminio. Sin embargo, encontraron un incremento en las propiedades mecánicas de los concretos con sustitución del 10% y 15%. También mostraron que a medida que aumentaba el contenido de escoria se reducía la trabajabilidad del concreto. Finalmente concluyeron que se puede investigar incluir otros materiales cementicos suplementarios con el fin de aumentar el porcentaje de escoria añadida a la mezcla, ya que la sustitución de la escoria es una actividad que fomenta la sostenibilidad debido a que disminuye la emisión de carbono a partir de la reducción la energía utilizada en la producción de cemento, la reducción de la contaminación y el costo de trabajo total.

Panditharadhya et al (2023) continuó con la investigación de la adición de escoria de aluminio en concretos. Sin embargo, esta vez estudió las propiedades mecánicas del concreto para su uso como pavimento, para ello utilizó los siguientes porcentajes 5%, 10%, 15% y 20% de sustitución. Como referencia utilizaron un concreto M40 (resistencia a la compresión de 49 MPa) al igual que los anteriores autores, encontró un aumento en el tiempo inicial de fraguado y una reducción en la trabajabilidad de los concretos. También concluyó que la sustitución máxima de escoria de aluminio es del 15% para cumplir con la resistencia a la compresión, tensión y flexión del concreto M40. Finalmente, sometió las mezclas de concreto a una prueba de fatiga a flexión (IRC 58) donde encontró que estos presentaban resultados muy por encima a los estándares de la norma para concretos convencionales M40 según la IRC (India Road Congress).

Dai (2012) investigó el desarrollo de materiales basados en el uso de escoria de aluminio para aplicaciones de ingeniería, realizó para ello una matriz experimental de sustitución parcial de cemento en concretos usando escoria de aluminio de dos tipos. Una con el material como se recibe, que llama AR y otra con el material lavado, llamado ARW; el ensayo presenta los resultados para tamaños de partícula menores a 150 μm , entre 150 μm a 300 μm y entre 300 μm a 600 μm , con porcentajes de sustitución que varían entre el 10% y 20%. Dentro de sus conclusiones está que al realizar las sustituciones pueden producirse porosidades en el concreto, sin embargo, el mortero

con escoria ARW tipo 1, con tamaño de partícula menor a 150 μm , tiene un mejor desempeño en cuanto a sus propiedades físico-mecánicas como son compresión y flexión, no solo frente a las otras sustituciones sino también frente a la muestra de referencia sin sustitución de manera consecuente, concluye que esto puede deberse principalmente a 3 razones:

1. Alta rigidez y forma del agregado
2. Poros finos uniformes
3. Relación agua-cemento.

Como se presentó anteriormente, incorporar escoria de aluminio en morteros o concretos es un tema de investigación que se ha desarrollado a lo largo de los últimos años, en la Tabla 1 se encuentra un resumen de las principales características de la literatura encontrada.

Esta investigación pretende generar conocimiento adicional para evaluar la inclusión de escoria de aluminio como sustitución del cemento y posteriormente en la fabricación de concreto, y en caso de ser viable que permita desarrollar una línea de investigación que contribuya a desarrollar materiales más amigables ambientalmente y que logren promover adicionalmente la economía circular en la industria de la construcción.

Tabla 1 Resumen estado del arte

Autor	Año	Características principales
Ewais et al. (2009).	2009	Preparación cemento de aluminato de calcio destaca por su capacidad a soportar grandes temperaturas sin presentar pérdida de sus capacidades físico-mecánicas.
Reddy y Neeraja.	2016	Incorporaron escoria aluminio secundaria (15%) permitió conservar capacidades con mejor manejabilidad.
Mailar et al.	2016	Preparación concretos con sustitución del 20%, beneficio en el retraso del tiempo de fraguado.
Pereira et al. (2000).	2000	Preparación morteros sustituyendo el cemento 10% o del 30 al 50% de la arena, para no afectar significativamente las propiedades.
Song (1997), Araújo y Tenório (2005), Borhan & Hussein (2016).	1997, 2005, 2016	Preparación concreto celular con escoria aluminio, determinaron que es necesario conocer la reactividad de la escoria y tamaño de partícula para conocer volumen de gas generado, al añadir la escoria la pérdida de Resistencia por aumento de temperatura es menor.

Autor	Año	Características principales
Liu et al.	2017	Estudiaron preparar concreto celular con polvillo aluminio (residuo escoria blanca) en vez de polvo de aluminio, donde se puede reemplazar 1 g de polvo de aluminio con 15.6 g de polvillo de aluminio para conservar la producción de gas como sustituto más económico.
Vijayalakshmi, R y Rajeswari.	2018	Estudiaron la adición de escoria de aluminio en concretos aligerados con valor Max aceptable de 10%, la adición de escoria de aluminio disminuye la densidad del concreto y aumenta la producción hidrogeno gaseoso y por ende la absorción, la adición también disminuye la Resistencia a la compresión con el aumento de vacíos.
Panditharadhya, Mulangi, y Shankar.	2019	Encontraron que la adición de escoria a pastas de cemento provoca un retraso en el tiempo de fraguado inicial , aumento de la cantidad de agua para tener una consistencia normal y mejora en la trabajabilidad.
Panditharadhya, et al.	2019	Estudio la adición de escoria en concretos usando cemento portland con puzolana, encontró un retraso en el tiempo de fraguado inicial pero una disminución en el tiempo de fraguado final, para las propiedades mecánicas encontraron el mismo patrón que en su estudio anterior.
Sun y Yang.	2019	Estudio la incorporación de escoria de aluminio como agente de curado, a partir del cual encontraron una mejoría en la Resistencia frente al agua y sulfatos por parte de los concretos.
Liu et al.	2017	Estudiaron preparar concreto celular con polvillo aluminio (residuo escoria blanca) en vez de polvo de aluminio, donde se puede reemplazar 1 g de polvo de aluminio con 15.6 g de polvillo de aluminio para conservar la producción de gas como sustituto más económico.
Vijayalakshmi, R y Rajeswari.	2018	Estudiaron la adición de escoria de aluminio en concretos aligerados con valor Max aceptable de 10%, la adición de escoria de aluminio disminuye la densidad del concreto y aumenta la producción hidrogeno gaseoso y por ende la absorción, la adición también disminuye la Resistencia a la compresión con el aumento de vacíos.
Panditharadhya, Mulangi, y Shankar.	2019	Encontraron que la adición de escoria a pastas de cemento provoca un retraso en el tiempo de fraguado inicial , aumento de la cantidad de agua para tener una consistencia normal y mejora en la trabajabilidad.
Elseknidy et al.	2020	Estudiaron la adición de escoria de aluminio desde el uso mediante el análisis de valor agregado, donde proponen una sustitución máxima de 20%, además de proponer estudiar la adición de materiales cementicios suplementarios con el fin de aumentar los porcentajes de sustitución.
Panditharadhya et al.	2023	Estudio el efecto de añadir escoria de aluminio para concretos de uso vehicular M40 (Resistencia a la compresión 49MPa), donde propone una sustitución máxima de 15% según los estándares del concreto M40, además al realizar ensayos de fatiga a estos, encontró que superaban bastante por encima los estándares de este mismo concreto de referencia.

Autor	Año	Características principales
Dai.	2012	<p>Estudio el efecto de añadir escoria de aluminio y comparar los efectos de preparar morteros con escoria sin lavar y lavada con agua, diferentes tamaños de partícula y % de sustitución, donde encontró que al realizar un proceso de lavado se obtenían mejores resultados de resistencias y al igual que también mejoraban las condiciones con menor tamaño.</p> <p>Como conclusión los resultados de la incorporación de la escoria se deben a la alta rigidez y forma de la escoria , porosidades más uniformes y diferencia en la relación agua-cemento.</p>

3. METODOLOGÍA

En la Figura 6 se presenta la metodología general bajo la cual se desarrollaron la investigación y los ensayos respectivos. En cada fase se amplían los subprocesos de las etapas. En la primera fase se determinó la cantidad de materia prima estimada para la elaboración de los diferentes ensayos, al igual que la obtención de la escoria de aluminio y su posterior apagado. Como segunda fase se caracterizaron los materiales (agregado fino, cemento y escoria de aluminio) para la elaboración del diseño de mezcla de mortero. Posterior a ello se realizó el diseño de mezclas según la metodología de propuesta por Sánchez de Guzmán (2001). Como cuarta fase se elaboraron los morteros y los ensayos para evaluar las propiedades en estado fresco y endurecido. Finalmente se realizó el análisis de los datos y resultados obtenidos y selección del mortero que mejor desempeño presentó como resultado del diseño de mezcla propuesto.

En la Figura 6 se presenta el esquema general bajo el cual se desarrolló la investigación y los ensayos. En cada fase se amplían los subprocesos de cada etapa.

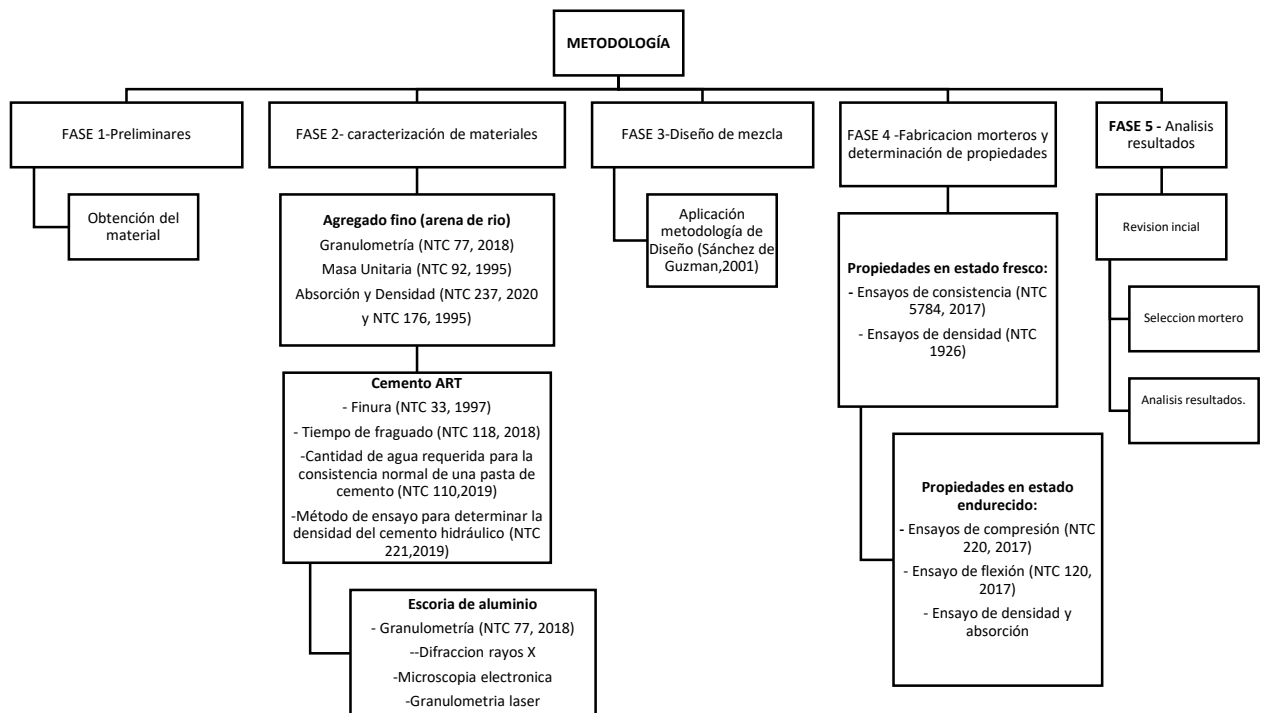


Figura 6. Esquema metodológico del proyecto, Fuente: Propia

A continuación, se describe en detalle cada una de las etapas, excepto la fase 5 que corresponde al capítulo de análisis de resultados.

3.1 Preliminares

Corresponde a la obtención de una muestra de materia prima suficiente para la elaboración de los distintos tipos de morteros y a la realización de cálculos preliminares del material a utilizar.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los materiales utilizados para fabricar los morteros con su respectiva fuente.

Tabla 2. Materiales utilizados para la fabricación de morteros con su respectiva fuente de obtención, Fuente: Propia

INSUMO	FUENTE
Arena	Arena de rio Cauca
Cemento	Alta Resistencia Temprana (ART)
Escoria	Residuo de proceso de recuperación aluminio de proceso primario en empresa de la ciudad de Cali
Agua	Convencional

Los materiales utilizados como arena y cemento fueron comprados a proveedores locales y no contaron con tratamiento adicional. Sin embargo, a continuación, se describe el proceso mediante el cual se recolectó la escoria de aluminio y su proceso de apagado.

3.1.1 Obtención y muestreo de la escoria de aluminio

La escoria de aluminio utilizada fue suministrada por una empresa de producción de perfilería de aluminio y otros insumos en la ciudad de Cali. Esta empresa realiza obtención de aluminio por procesos primarios y secundarios; por tal motivo, cuentan con escoria blanca, negra y torta de sal como residuo de sus procesos de producción.

La empresa realiza la recolección de la escoria de aluminio en el proceso de fundición, para ello retira el material que se encuentra en la superficie del aluminio fundido puesto que este reacciona con el oxígeno y contiene también parte de las sales fundentes utilizadas.

Una vez es retirada la escoria, esta es almacenada; pero no cuenta con una separación basada en la aleación de aluminio preparada, por tal motivo la escoria utilizada posee una alta variabilidad, además, de que esta no corresponde con la escoria de una aleación específica.

Para el proceso de recolección se accedió al lugar donde está depositada la escoria y se recogió material aleatoriamente con el propósito de obtener muestras representativas del material almacenado, este se tamizó por una malla de 2 mm. El material pasante corresponde al utilizado en el proyecto y es denominada polvillo de escoria de aluminio; sin embargo, en este trabajo, por facilidad, se le llamará simplemente escoria de aluminio. Para los ensayos se recogieron 25 Kg de este material, esta metodología corresponde con la establecida por Meneses Núñez et al.(2021).

3.1.2 Proceso de apagado

La escoria es considerado un residuo peligroso, debido a que entre sus compuestos se encuentra el nitruro de aluminio (AlN), el cual al entrar en contacto con el agua reacciona para formar gas de amonio (NH₃) y Al₂O₃ (Shinzato & Hypolito, 2005), según la siguiente reacción:



Antes de realizar cualquier proceso de mezcla la escoria debe ser lavada. este proceso se llama apagado y consiste en provocar la reacción del nitrógeno presente en la escoria antes de realizar su adición en la preparación de las mezclas de mortero.

Con el fin de eliminar, o al menos disminuir el AlN lo máximo posible, se realizó a la escoria un proceso de apagado, para ello se siguió el siguiente procedimiento.

- Se extendieron los 25 Kg de la escoria de aluminio en una bandeja que pueda contener agua.
- Se agregaron 20 Litros de agua diarios sobre la escoria, durante un periodo de 5 días.
- Se realizó un proceso de secado en horno a una temperatura entre 115 C° y 120 C° posterior a los 5 días.

La escoria utilizada en este trabajose clasificó en función del tratamiento recibido:

- Escoria de aluminio sin lavar: residuo del proceso de producción secundario de aluminio, almacenado únicamente y con alto contenido de amonio.

- Escoria de aluminio lavada sin triturar: material sumergido durante tiempo prolongado en agua y al sol con el fin de eliminar toxinas, finalmente, es secada en horno.
- Escoria de aluminio lavada y molida: corresponde al material molido en equipo de los ángeles y luego tamizado.

3.2 Caracterización de materiales

Esta fase corresponde a la descripción y proceso de caracterización de los diferentes materiales que componen los morteros: arena, cemento y escoria de aluminio. De manera general, se realizó el proceso de caracterización según las recomendaciones de las normas técnicas colombianas (ICONTEC). A continuación, se presentan los procesos de ensayo de los diferentes materiales.

3.2.1 Agregado Fino

El agregado fino o arena, proveniente del Rio Cauca, y fue caracterizado para determinar las propiedades granulométricas, masa unitaria, absorción y densidad. Estas propiedades fueron utilizadas posteriormente para realizar el diseño de mezcla y para evaluar su viabilidad según los criterios de la misma normativa. Estos parámetros fueron usados para la elaboración de un mortero de 4000 Psi (28 MPa), como punto de partida para evaluar el efecto del tamaño de partícula de escoria de aluminio y el porcentaje de sustitución de cemento en las propiedades mecánicas.

A continuación, en la Tabla 3, se presenta un resumen de las características obtenidas

Tabla 3 Resumen de parámetros de la arena rio Cauca, Fuente: Propia

PARÁMETROS ARENA	UNIDAD	VALOR
Densidad SSS arena	g/cm ³	2,680
Tamaño máximo nominal	Tamiz	No 4
Absorción	%	2,560
Humedad natural	%	8,500
Módulo de Finura arena		2,310

3.2.1.1 Granulometría

Con el fin de obtener la distribución la granulometría que presenta el agregado fino, se realizó un proceso de tamizado aplicando la norma NTC 77 (2018); para ello se efectuó el uso de los diferentes tamices, relacionados en la norma y la tamizadora de la Figura 7; finalmente se obtuvo

la curva de granulometría presentada en la Figura 8, en donde se observa que el material se encuentra un poco por fuera de los límites de la norma, pero dado que esta es la comúnmente utilizada en la región, fue aceptada para el presente proyecto.



Figura 7 Equipo tamizado mecánico, Fuente: (Orozco Erazo & Vega Báez, 2022)

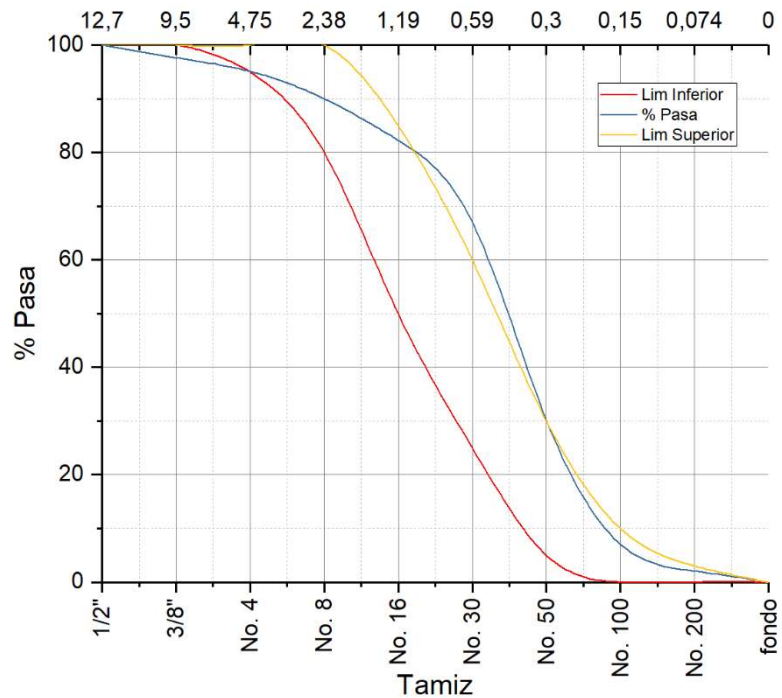


Figura 8 Curva granulométrica arena rio cauca, Fuente: Propia

3.2.1.2 Masa unitaria

Se realizó esta caracterización con el uso de la norma NTC 92 (1995), la cual tiene como objeto determinar la masa unitaria en condición compactada o suelta de finos y el cálculo de los vacíos entre las partículas de agregados finos que no exceden los 150 mm de tamaño máximo nominal.

3.2.1.3 Absorción y peso específico

La determinación de la densidad aparente y nominal se realizó usando el procedimiento establecido por la norma NTC 237(2020b) y la absorción del agregado fino para futuras correcciones de humedad en la mezcla de mortero.

3.2.2 Cemento

El cemento utilizado para los ensayos es ART (Alta Resistencia Temprana), las propiedades a caracterizar del cemento utilizado son las siguientes: finura, tiempo de Fraguado, consistencia y densidad.

De estas propiedades para el diseño de mezcla únicamente se utilizó la consistencia debido a que corresponde a un parámetro de entrada para el diseño. El resto de los ensayos fueron realizados para determinar, según las normativas, las propiedades del cemento. Como parámetro adicional, se evaluó el efecto de la adición de escoria de aluminio, para ello se realizó la comparación del tiempo de fraguado y el efecto del tamaño de diferentes partículas de escoria como sustituto, el cual se presenta en la sección de resultados.

A continuación, se presenta en la Tabla 4 el resumen de las características obtenidas

Tabla 4 Resumen propiedades cemento, Fuente: Propia

PARÁMETROS CEMENTO	UNIDAD	VALOR
Tiempo de fraguado inicial	min	53
Densidad o Peso específico	g/cm ³	2,880

3.2.2.1 Finura

Se usó para la caracterización la norma NTC 33 (2019d), esta permite determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire y expresada en términos de la superficie específica.

3.2.2.2 Consistencia normal

Esta caracterización se realizó usando la metodología de la norma NTC 110 (2019a). Este ensayo permite establecer, mediante el aparato de Vicat, la cantidad de agua que permite obtener

una consistencia normal del cemento, la cual corresponde con una penetración de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Este proceso permite de igual manera determinar el tiempo de fraguado de la pasta,

De igual manera este ensayo se realiza para preparar pasta de cemento con sustitución de escoria de aluminio variando el tamaño de partícula y así conocer el efecto del tamaño de ella en la pasta de cemento.

3.2.2.3 Tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado corresponde con el tiempo en la cual una pasta de cemento comienza el proceso de endurecimiento o donde la pasta de cemento pasa de estado plástico a estado endurecido (Sanchez de Guzman, 2001). Para la determinación de esta característica se realizó la implementación de la metodología en la norma NTC 118 (2020a).

3.2.2.4 Granulometría laser

A continuación, en la Figura 9 se observa el tamaño de partícula contra el porcentaje de volumen presente en la muestra de cemento, en ella se observa un mayor porcentaje de partículas entre el intervalo de 9 a $40 \mu\text{m}$.

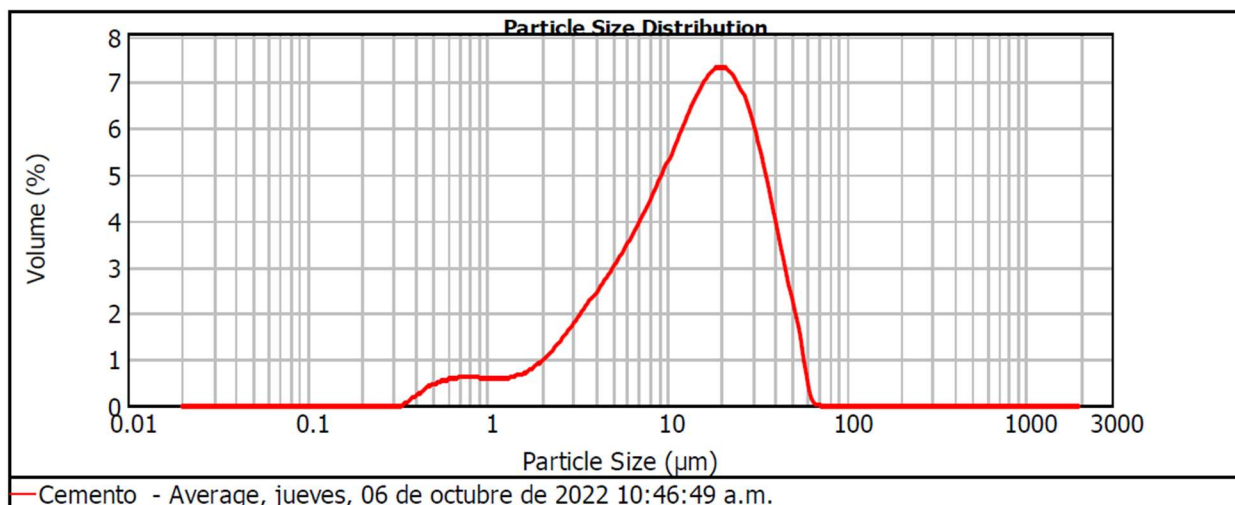


Figura 9 Granulometría laser de cemento ART (Alta Resistencia Temprana)

En la Tabla 13 del capítulo de resultados se encuentra el comparativo de los resultados de la superficie específica, tamaño medio, coeficiente de uniformidad y el intervalo de partícula obtenido durante el ensayo, junto a las diferentes muestras de escoria.

3.2.2.4 Densidad o peso específico

La densidad o peso específico del cemento se determinó implementando la metodología de la norma NTC 221(2019c). Esta propiedad será utilizada para realizar el respectivo diseño de mezcla.

3.2.3 Escoria de aluminio

Para la molienda de la escoria de aluminio se utilizó la máquina de los ángeles y el siguiente procedimiento con 5000 g de escoria de aluminio lavada, siguiendo parcialmente el proceso de la norma NTC 93 (2013b). Durante este proceso cabe anotar que durante su manejo se sintió ardor al contacto con la piel y en ojos por el olor, posiblemente el material contaba aún con presencia de nitruro de aluminio que reaccionaba con la humedad del ambiente. A continuación, la descripción:

1. Se vertieron 5000 g de escoria de aluminio en el equipo.
2. Se ingresaron 12 esferas de acero con un diámetro promedio de 46.8 mm, con masa entre 390 g y 445 g.
3. Se puso en funcionamiento el equipo a una velocidad entre 30 rpm y 33 rpm durante un tiempo de 30 minutos.
4. Posteriormente se realizó el descargue del material y se procedió a realizar el tamizado de este material.
5. El proceso de tamizado consistió en un proceso similar de la norma NTC 77 (2018) con equipo mecánico como se observa en la Figura 10, para ello se utilizaron los tamices reportados en la Tabla 5.

Tabla 5 Tamices para separación de escoria aluminio, Fuente: Propia

TAMIZ	DIÁMETRO
	mm
#50	0,315
#100	0,150
#200	0,074
Fondo	<0,080



Figura 10 Equipo de tamizado mecánico, Fuente: Propia

6. El proceso de tamizado se realizó con 500 g de material en diferentes tandas durante un tiempo de 5 min, puesto que los tamices se colmataban de material aglutinado con tiempos mayores.

Se consideró la clasificación de la escoria en tres tamaños de partícula, los cuales serán llamados a lo largo del documento como: tamaño grueso (G) con diámetros de partículas entre 150-300 μm , tamaño intermedio (I) con partículas entre 75-150 μm y fino (F) con partículas inferiores a 75 μm , los cuales corresponden a los tamices del punto 5 del proceso de molienda. En la Figura 11 se presentan estos tres tamaños de escoria ya procesados, siendo la más fina la que se encuentra en la izquierda e incrementa su tamaño en hacia la derecha, donde la última corresponde al material retenido en el tamiz 50.



Figura 11 Escorias tamizadas, Fuente: Propia

Durante los tres momentos mencionados de la escoria de aluminio, se separó material adicional para realizar los siguientes ensayos de caracterización microestructural:

- Difracción de rayos X (DRX): con el fin de conocer la composición química de cada tamaño de partícula seleccionado y los cambios durante los tratamientos de la escoria. Se usó un difractómetro Rigaku Multiflex, utilizando una geometría Bragg-Brentano y radiación K- α de Cu. Este contó con incrementos angulares de $0,02^\circ$, cada incremento duró un tiempo de 8 segundos. El intervalo angular medido fue de 6 a 10° , adicionalmente se usaron rendijas de difracción, con apertura de $0,5^\circ$ a la entrada y de 0.8 mm a la salida. Para determinar las fases cristalinas presentes en la muestra, se utilizó el programa Search Match.
- Microscopía electrónica de barrido (SEM): para observar la forma y estructura del material selección acorde con los diferentes tamaños, la cual se realizó con el equipo JOELJSM-6490 de la Figura 12, donde se utilizaron aproximadamente 1 gr de escoria de aluminio y se recubrió con oro con el fin de que estas fueran conductoras.



Figura 12 Equipo para SEM, Fuente: propia

- Granulometría laser: para determinar con precisión la distribución del tamaño de partícula de cada fracción de escoria.

3.3 Diseño de mezcla de mortero

Al no existir una metodología implementada de la adición de la escoria de aluminio, se utilizó el método de dosificación para morteros de cemento Portland presentada por Sánchez de Guzmán (2001).

Para la mezcla se tomó como objetivo de diseño la búsqueda de una resistencia a la compresión de $f'c=28$ MPa (4000 PSI), a partir de esto se realizó el procedimiento acorde con la metodología ya mencionada. A continuación, se presentan los parámetros iniciales requeridos en la Tabla 6, adicionalmente fue necesario realizar un ensayo de fluidez basado en la norma NTC 5784 (2021c) donde se fabrican diferentes pastas de cemento variando el contenido de agua con el fin de construir una gráfica.

Tabla 6 Parámetros iniciales para diseño de mezcla, Fuente: Propia

PARÁMETROS INICIALES	UNIDAD.	VALOR
Resistencia a la compresión	kg/cm ²	280,000
Módulo de Finura arena		2,310
Densidad SSS arena	g/cm ³	2,680
Densidad específico cemento	g/cm ³	2,880
Consistencia Plástica	%	110

Una vez definidos los parámetros iniciales se procede a determinar la relación agua-cemento (A/C) a partir del análisis de la Figura 13.

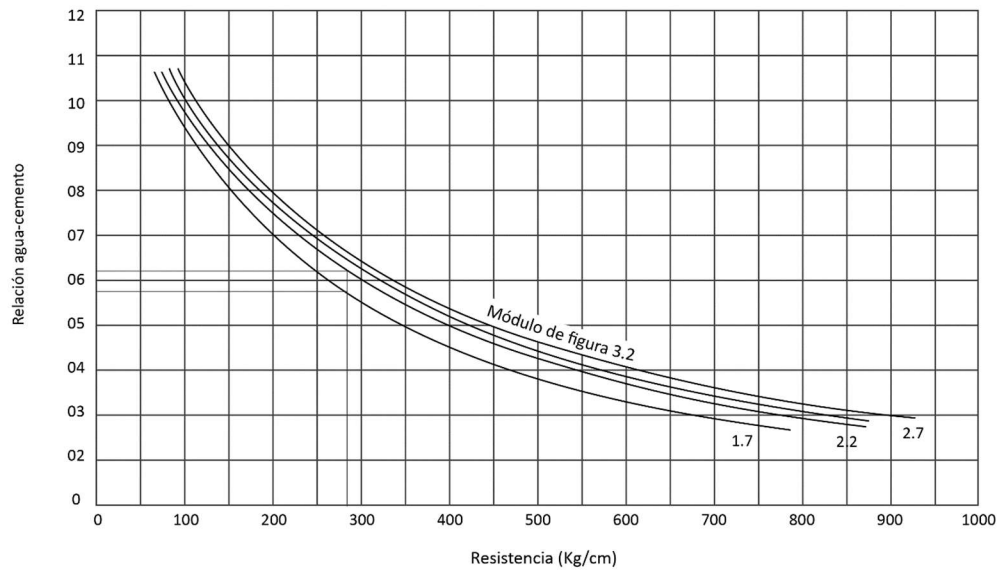


Figura 13 Relación A/C, resistencia a la compresión y el módulo de finura, Fuente: (Sánchez de Guzmán, 2001)

Posteriormente, se procede a determinar la relación agua cemento utilizando el porcentaje de fluidez determinado; para el presente proyecto se utilizó una fluidez plástica de 110%, para ello se hará uso de la Figura 14, la cual fue construida previamente. Con este parámetro se determinó el valor de la variable **K** para la consistencia requerida, que en el presente caso corresponde con un valor de 0,32 que equivale a la relación de la masa de agua sobre la masa de cemento.

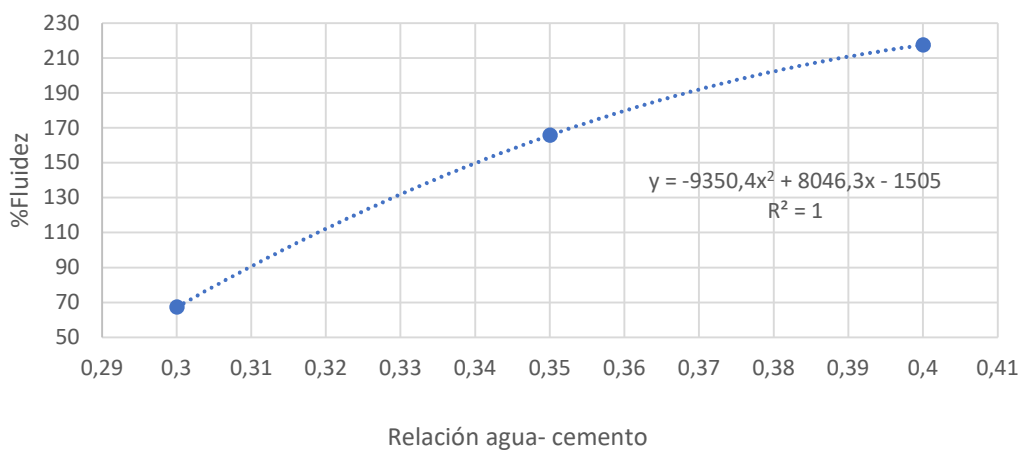


Figura 14 Fluidez vs relación A/C, Fuente: propia

Continuando con la metodología, se determinó el valor del factor **b** que corresponde con valor que relaciona la consistencia requerida, el módulo de finura y la forma del grano de arena. Para la determinación de ello se utilizó la Tabla 7, para el presente caso se cuenta con una consistencia plástica de 110% y un módulo de finura de 2,31, además el origen de la arena corresponde con material de río, que por distintos procesos naturales le otorgan una forma redonda. Con estos parámetros se procedió interpolar el valor del factor **b**, el cual finalmente tiene un valor de 0,297.

Tabla 7. Valor de b según la consistencia y el módulo de finura, **Fuente:**(Sánchez de Guzmán, 2001)

CONSISTENCIA	MODULO FINURA	ARENA GRANO REDONDO Y LISA	ARENA GRANOS ANGULARES Y RUGOSOS
SECA (90%)	1,7	0,329	0,322
	2,2	0,311	0,303
	2,7	0,277	0,293
	3,2	0,239	0,249
PLASTICA (110%)	1,7	0,324	0,324
	2,2	0,303	0,295
	2,7	0,273	0,288
	3,2	0,237	0,248
FLUIDEZ (130%)	1,7	0,317	0,322
	2,2	0,293	0,300
	2,7	0,269	0,295
	3,2	0,234	0,263

Con los parámetros de la **k**, **b** y la relación agua-cemento se procede a calcular la cantidad de cemento a usar, para ello se usaron las siguientes ecuaciones donde finalmente el valor de C corresponde con la cantidad de kg de cemento por m³ de mortero.

Ecuación 1 determinación del factor n

$$(1) \quad n = \frac{\ln\left(\frac{A}{C}\right) - \ln(k)}{b} = \frac{\ln(0,62) - \ln(0,32)}{0,297} = 2,227$$

Ecuación 2 determinación cemento (kg/m³)

$$(2) \quad \text{Cemento (C)} = \frac{1,000}{\frac{1}{Gc} + \frac{n}{Ga} + \frac{A}{C}} = \frac{1,000}{\frac{1}{2,88} + \frac{2,227}{2,68} + 0,62} = 549,78 \frac{kg}{m^3}$$

A partir del valor de **C** se calcula la cantidad de agua a partir de la relación de agua-cemento y la ecuación para el cálculo de arena

Ecuación 3 Determinación agua (L/ m³)

$$(3) \quad \text{Agua (A)} = C * \frac{A}{C} = 549,78 * 0,62 = 340,87 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 340,87 \frac{\text{L}}{\text{m}^3}$$

Ecuación 4 determinación agua (kg/ m³)

$$(4) \quad \text{Arena (a)} = C * n = 549,78 * 2,227 = 1,255 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

A continuación, en la Tabla 8, se presenta el resumen del diseño de mezcla para 1 m³ de mortero preparado, cabe destacar que este diseño de mezcla es inicial y no esta optimizado para aspectos de resistencia

Tabla 8 Resumen diseño de mezcla para 1 m³ de mortero, Fuente: propia

	AGUA	CEMENTO	AG. FINO
Masas SSS (kg/m ³)	340	550	1255
Tecnológica	0,618	1,00	2,28
Volumen (l/m ³)	340	191	468

3.4 Preparación de morteros y determinación de propiedades

3.4.1 Diseño experimental.

Durante el proceso de investigación experimental se realizó la evaluación de las propiedades mecánicas de los diferentes morteros a preparar, donde se consideró para ello el reemplazo de cemento con escoria de tres tamaños de partícula diferentes, los cuales serán llamados: tamaño grueso (G), tamaño intermedio (I) y fino (F). Adicionalmente, se estudiaron tres valores en el porcentaje de material sustituido de cemento (5%, 10% y 20%). Por tal motivo el proyecto constó de un diseño experimental 3x3, en el cual se realizó el análisis de dos variables independientes en simultáneo, es decir, se ejecutaron un total de 9 morteros con distintas combinaciones de tamaño de partícula y de porcentaje de sustitución de cemento por escoria de aluminio como se ilustra en la Tabla 9. También se fabricó un mortero de referencia o testigo para comparar cada una de las mezclas y determinar la variación en las propiedades anteriormente mencionadas frente a ella.

Tabla 9 Diseño experimental, **Fuente:** Propia

TAMAÑO DE PARTICULA (VARIABLE INDEPENDIENTE)			
% SUSTIUCION (variable independiente)	GRUESO (G)	INTERMEDIO (I)	FINO (F)
	150-300 μ m	75-150 μ m	<75 μ m
	5%	5%	5%
	10%	10%	10%
	20%	20%	20%

A lo largo del proyecto se nombraron las mezclas realizadas, acorde con la Tabla 10, en el documento estas serán nombradas según la siguiente información.

Tabla 10 Nomenclatura mezclas de mortero, **Fuente:** Propia

MEZCLA	% SUSTITUCIÓN DE CEMENTO CON ESCORIA DE ALUMINIO	TAMAÑO DE PARTÍCULA ESCORIA ALUMINIO (μm)
Ref	No posee sustitución	No posee sustitución
5F	5%	Fino (<75 μ m)
5I	5%	Intermedio (75-150 μ m)
5G	5%	Grueso (150-300 μ m)
10F	10%	Fino (<75 μ m)
10I	10%	Intermedio (75-150 μ m)
10G	10%	Grueso (150-300 μ m)
20F	20%	Fino (<75 μ m)
20I	20%	Intermedio (75-150 μ m)
20G	20%	Grueso (150-300 μ m)

La preparación de mezcla se realizó bajo el procedimiento de la norma ASTM C305 (2014), donde se efectuó la preparación para un volumen de 4,4 L de mortero, el procedimiento es el siguiente:

1. Colocar el agua de la mezcla ajustada con el contenido de agua de la arena en el recipiente.
2. Añadir el cemento al agua, en el caso de los morteros con escoria, añadir al mismo tiempo inicial el mezclado a una velocidad lenta durante 30 segundos.

3. Posteriormente, agregar la totalidad de la arena lentamente durante un periodo de 30 segundos a velocidad lenta.
4. Detener el mezclador, cambiar la velocidad de mezcla a media y continuar durante un tiempo de 30 segundos.
5. Detener el mezclador durante un tiempo de 90 segundos y durante los 15 segundos iniciales realizar un barrido de la mezcla en los bordes del recipiente y depositarla en el fondo.
6. Finalmente, reanudar el mezclado durante 60 segundos, a una velocidad media, posteriormente, se procede a realizar las respectivas muestras para ensayo en estado fresco y endurecido.

En Figura 15 se presenta el proceso de mezclado y llenado de formaletas.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 15 (a)Proceso de mezclado mortero, (b)proceso de llenado formaletas, (c) curado de morteros y (d) Mortero endurecido, Fuente: Propia

3.4.2 Propiedades en estado fresco

A continuación, se presentan los ensayos realizados a la mezcla de concreto en estado fresco, es decir, que estos se realizan inmediatamente finalizado el proceso de mezclado.

3.4.2.1 Tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado del cemento será determinado para cemento sin adición y con adición de escoria de aluminio utilizando el equipo de la aguja de Vicat para consistencia normal mediante la norma NTC 118 (2020a) .

3.4.2.2 Fluidiez

Este ensayo se desarrolla inmediatamente realizada la mezcla de mortero, para ello se aplica el procedimiento de la norma NTC 5784 (2021c), el cual consiste en ubicar una porción de mezcla de mortero sobre una mesa de flujo la cual se encarga de dejar caer la mezcla un total de 25 veces durante un tiempo de 15 segundos, donde la mezcla de mortero cambia sus dimensiones originales y se toma varias medidas las cuales posteriormente son promediadas para así calcular el porcentaje de fluidiez de la mezcla.

Para el cálculo de fluidiez se utilizó la siguiente formula:

Ecuación 5 Calculo de la fluidiez del mortero

$$(5) \quad \% \text{ fluidiez} = \frac{\varnothing \text{ promedio (cm)} - \varnothing \text{ base inferior molde (cm)}}{\varnothing \text{ base inferior molde (cm)}} * 100$$

Con este ensayo se busca analizar los efectos de la incorporación de la escoria en la trabajabilidad del mortero, a continuación, se presentan algunas imágenes del proceso realizado Figura 16.



(a) Proceso de llenado para ensayo de fluidez



(b) Proceso de compactación



(c) proceso de enrase



(d) Proceso de medición para ensayo de fluidez

Figura 16 Proceso de ensayo de fluidez, Fuente: Propia

3.4.2.3 Densidad

Este ensayo se desarrolló inmediatamente realizada la mezcla de mortero, para ello se aplicó el procedimiento para densidad de la norma NTC 1926 (2013a), donde se vierte la mezcla en un molde de volumen conocido, el cual se llena con un total de tres capas con un total de veinticinco (25) golpes con varilla para compactar el materia, posteriormente es enrasado y pesado como se observa en la Figura 17.

Ecuación 6 cálculo de densidad en estado fresco

$$(6) \quad \text{Densidad} = \frac{\text{Peso mortero}}{\text{Volumen de llenado}}$$



Figura 17 Ensayo de densidad en estado fresco, Fuente: propia

3.4.3 Propiedades en estado endurecido

A continuación, se presentan los ensayos realizados a la mezcla de concreto en estado endurecido, después de la fabricación de los morteros a los 7, 28 y 56 días, como se observa en la siguiente Tabla 11 explicando la norma NTC aplicada.

Tabla 11 ensayos estado endurecido según edades

ENSAYO	NORMA	EDAD
Resistencia a la compresión en cubos	NTC 220 (2021b)	7, 28 y 56 días
Resistencia a la flexión en vigas	NTC 120 (2022)	7, 28 y 56 días
Resistencia a la compresión en vigas		
Densidad y absorción	NTC 176 (2019b)	28 días

3.4.3.1 Resistencia a la compresión en cubos

Este ensayo se realizó bajo la norma NTC 220 (2021b), la cual está enfocada en determinar la resistencia a la compresión en morteros mediante en ensayo de cubos con dimensiones 5x5x5 cm, siempre fueron ensayados tres cubos por edad para un total de 9 cubos, estos especímenes fueron curados mediante inmersión en agua hasta la realización del ensayo.

A continuación, se presentan una serie imágenes en la Figura 18 antes, durante y posterior al desarrollo del ensayo; cabe destacar que los cubos fabricados con escoria presentaban protuberancias al día siguiente al momento de su desencofrado por la cara libre del cubo como una especie de bomba al parecer por el incremento del volumen.



Figura 18 Cubos para ensayo de compresión, Fuente: propia

3.4.3.2 Resistencia a flexión en vigas

Este ensayo se realizó aplicando la norma NTC 120 (2022), la cual está enfocada en determinar la resistencia a la flexión en morteros mediante el ensayo de vigas con dimensiones 16x4x4 cm como se observa en la Figura 19 y las mitades restantes fueron ensayadas a compresión.



Figura 19 Viga de mortero 16x4x4 Cm fallada, Fuente: Propia

Para el cálculo de la resistencia a la flexión en términos de esfuerzo se utilizó la siguiente ecuación:

$$sf = 0,0028P(\text{ carga maxima en } N)$$

En estas muestras también se presentó el fenómeno de una protuberancia en la cara que no se encontraba confinada al momento de su desencofrado.

3.4.3.3 Resistencia a la compresión en mitades de vigas

De igual manera se realizó el mismo ensayo de compresión a las mitades restantes del ensayo de tracción NTC 120 (2022), para ello se realizó uso de platinas de 4x4 cm en sus caras, con el fin de transmitir la carga axial, según se muestra en la Figura 20. Para la determinación de la resistencia se toma como área perpendicular a la carga axial el área de la platina y la resistencia que fue determinada con el equipo de ensayo.



Figura 20 Mitades de vigas ensayadas a compresión, Fuente: Propia

3.4.3.4 Gravedad específica y absorción

Este ensayo se realizó para determinar las gravedades específicas bulk, bulk saturada y aparente, además de la absorción de los diferentes morteros basado en el procedimiento de la norma NTC 176 (2019b).

Para este ensayo se determinó la masa de tres cubos de mortero como lo muestra la

Figura 21, adicionales, en tres diferentes estados de humedad: Superficialmente saturado, saturado en suspensión y seco en horno por un tiempo de 24 horas continuas a 100 C°.



Figura 21 Cubos de mortero secados al horno, Fuente: Propia.

El cálculo de las diferentes densidades y absorción se realizó con las siguientes fórmulas:

Ecuación 7 Cálculo de densidad bulk (a), densidad bulk saturada (b), densidad aparente (c) y porcentaje absorción (c)

$$(7) \quad \text{Densidad Bulk} = \frac{A}{B - C}$$

(7a)

$$\text{Densidad Bulk Saturada} = \frac{B}{B - C}$$

(7b)

$$\text{Densidad aparente} = \frac{A}{A - C}$$

(7c)

$$\% \text{ Absorción} = \frac{B - A}{A}$$

(7d)

Donde:

A: Masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno (g).

B: Masa en el aire de la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca (g).

C: Masa aparente en el agua de la muestra de ensayo saturada (g)

3.4.3.5 Microscopía Electrónica de Barrido.

Para observar la forma y estructura de las diferentes mezclas de mortero, se realizó con el equipo JOELJSM-6490 (Figura 12) la Microscopía Electrónica de Barrido, donde se utilizaron muestras de los morteros ensayados con los diferentes tamaños de partícula y porcentaje de sustitución del 5% y el 20% además se recubrió con oro con el fin de que estas fueran conductoras.

4. ANALISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de la metodología anteriormente descrita.

El análisis realizado se desarrolló de la siguiente manera:

- Caracterización de la escoria de aluminio: en esta sección se presentarán los resultados de los ensayos de difracción de rayos X, la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la granulometría laser; para ello se analizó inicialmente la escoria de aluminio sin lavar frente a la escoria lavada y secada en horno a una temperatura entre 115 C° y 120 C. Posteriormente, se comparó la escoria lavada frente a la escoria molida y separada en tres tamaños de partícula (grueso, intermedio y fino).

El enfoque de este análisis consistió inicialmente en identificar el antes y después del tratamiento de cada escoria desde su composición, forma y distribución granulométrica.

- Propiedades en estado fresco y endurecido de la mezcla de mortero: en esta sección se analizarán las mezclas de morteros

Inicialmente se evaluaron las propiedades en estado fresco que corresponden con los ensayos de tiempo de fraguado y ensayo de fluidez.

Posteriormente, se evaluaron las propiedades en estado endurecido mediante el análisis de la resistencia a la compresión de cubos, resistencia a la compresión en mitades de viga, resistencia a la flexión de vigas, absorción y finalmente microscopía electrónica de barrido (SEM), para ello el análisis se enfocó tres aspectos: variación de la resistencia en el tiempo el efecto del tamaño de partícula en la resistencia y finalmente el efecto del porcentaje de sustitución de cemento

4.1 Caracterización escoria de aluminio

A continuación, se presenta la caracterización de la escoria de aluminio antes y después de lavar, la escoria molida y clasificada en los tres tamaños de partícula establecidos. El análisis se realizó con los resultados de los ensayos de difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y granulometría laser.

4.1.1 Escoria sin lavar (E) y Escoria lavada sin moler (EL)

4.1.1.1 Difracción de rayos X

En la Figura 22 se encuentran graficados los datos obtenidos del proceso de difracción de rayos x realizado a la escoria sin lavar y a la escoria lavada sin moler. Cabe destacar que estos datos son normalizados y fueron analizadas mediante la herramienta Search-Match.

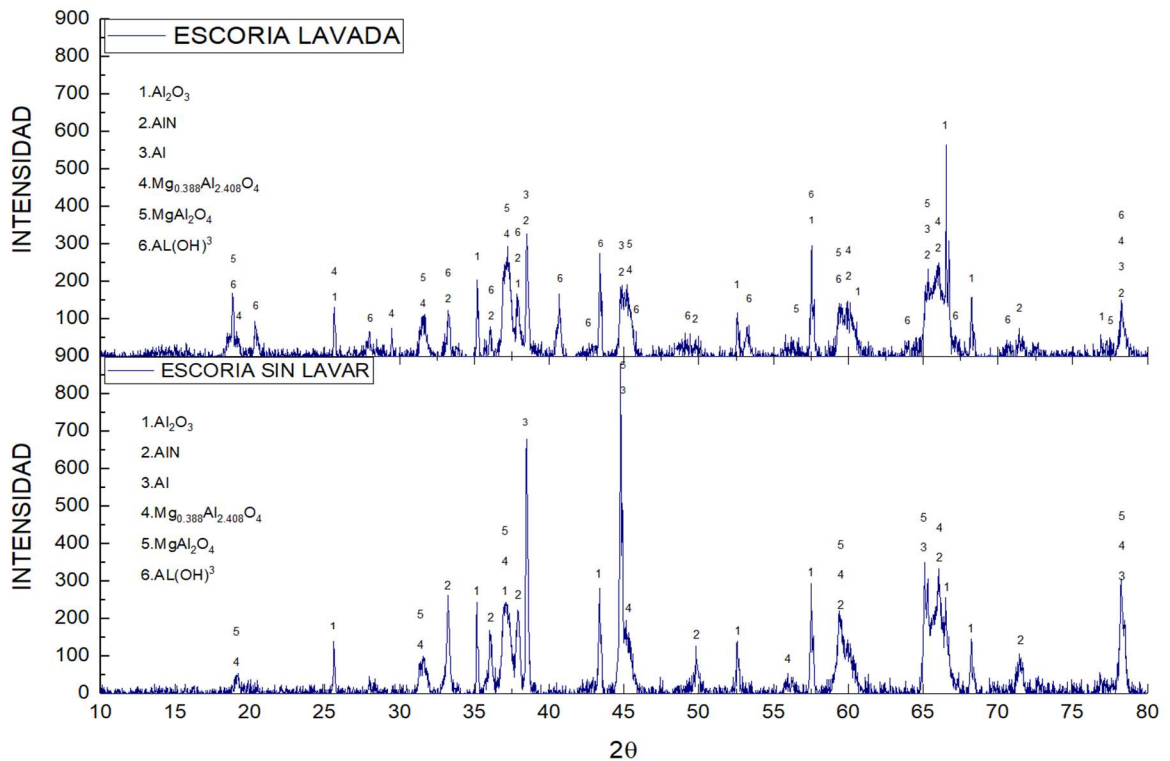


Figura 22 comparación DRX escoria sin lavar y escoria lavada, **Fuente:** Propia

Los componentes identificados en ambas muestras corresponden a: óxido de Aluminio (Al_2O_3), nitruro de aluminio (AlN), aluminio metálico (Al), óxido de aluminato de magnesio con defecto ($\text{Mg}_{0.388}\text{Al}_{2.408}\text{O}_4$) y óxido de aluminato de magnesio (MgAl_2O_4); adicionalmente, se identificó la presencia de Bayerita o hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) en la muestra de escoria lavada sin moler pero no en la muestra sin lavar, este compuesto se generó probablemente por el proceso de lavado.

Al comparar los resultados de ambas muestras, se observa que los picos de intensidad coinciden en gran parte de ambas muestras a lo largo del eje x.

Al comparar el intervalo de 10 a 30 grados en ambas muestras, se percibe que los picos que corresponden con $Mg_{0.388}Al_{2.408}O_4$, $MgAl_2O_4$ y Al_2O_3 , los cuales no presentan mayor variación en su intensidad, excepto por aquellos en donde se encuentra el $Al(OH)_3$, debido a un incremento o aparición en comparación con la muestra sin lavar.

Entre los 30 a 45 grados se observa que los picos correspondientes con el nitruro de aluminio (AlN), presentan reducción en la intensidad para la escoria lavada, posiblemente esto es debido a la reacción del AlN con el agua de lavado, sin embargo, no se evidencia la reducción total de estos picos como se esperaba. Los picos donde se encontraban ubicados el AlN de la escoria sin lavar ahora coinciden con los picos del hidróxido de aluminio, pero también se observa la presencia de AlN en la muestra.

Del mismo modo al anterior intervalo, entre los 45 a 80 grados se observa la reducción de los picos de AlN y la formación de nuevos picos correspondientes con el hidróxido de aluminio.

En conclusión, se evidenció que el proceso de lavado realizado a la escoria de aluminio redujo la presencia de AlN en el material, mas no su eliminación total, debido a que aún se encuentran picos de intensidad correspondientes con esta en la escoria lavada; también el procedimiento permitió identificar la formación de $Al(OH)_3$ en la muestra; sin embargo, no fue posible determinar la proporción en la cual varían estos componentes en las muestras ya que no se hizo análisis cuantitativo.

4.1.1.2 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Se realizó la toma de microscopía electrónica de barrido de la escoria de aluminio sin lavar, tal como se observa en las imágenes de la Figura 23, en la que se muestran imágenes con aumentos de 100X, 1000X y 5000X. En la foto A, este material cuenta con partículas de diferentes tamaños

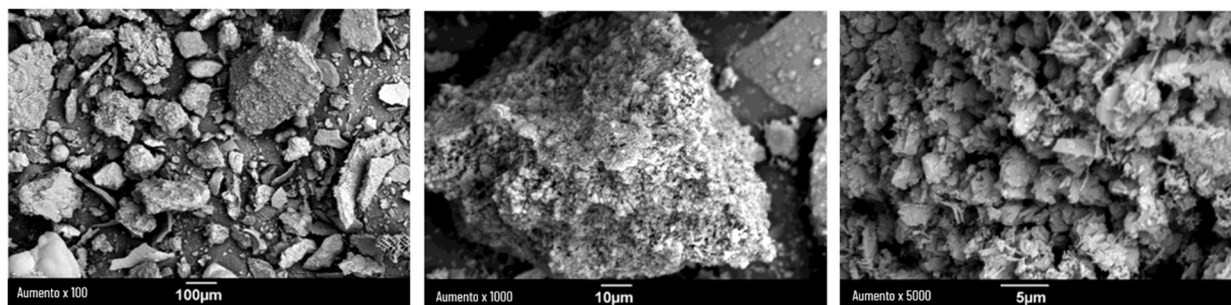


Figura 23 Toma SEM escoria aluminio sin lavar, **Fuente:** Propia

y sin aglomerar, además las distintas partículas no cuentan con una tendencia respecto a su forma. En las imágenes B y C se detectan partículas con superficies rugosas y filos, al igual que no parece que se encuentren adheridas entre sí.

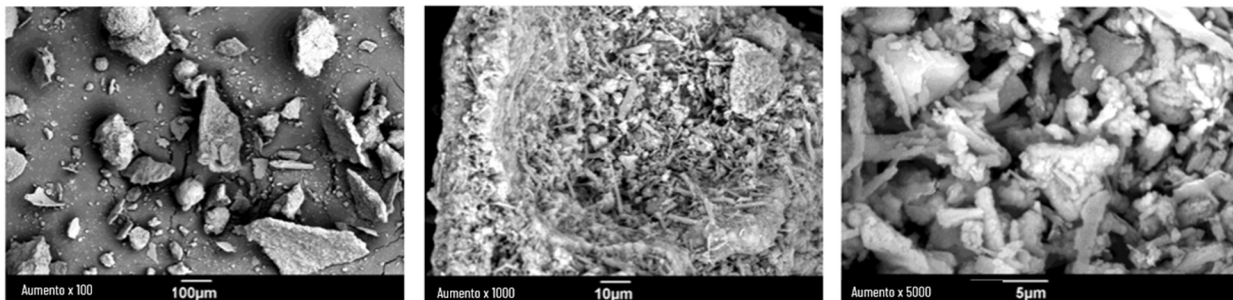


Figura 24 Toma SEM escoria aluminio lavada, Fuente: Propia

En la Figura 24, se presentan las imágenes de la escoria lavada; como se ve en la imagen A, el material al ser lavado cambia su composición en comparación de la escoria sin lavar, las partículas gruesas se mantienen presentes en la escoria con formas angulares; pero el material intermedio posiblemente se transforma en un material más fino en mayor proporción. Otro punto de vista permite considerar que pueden existir ciertas aglomeraciones de material, lo cual se analizó en la distribución granulométrica pero no es posible determinar en su totalidad. En las imágenes B y C se observa como la superficie de las partículas también cambia y se encuentra compuesto de partículas alargadas semejantes a fibras y su superficie es un poco menos rugosa sin observar adherencia.

4.1.1.3 Granulometría laser

En la Figura 25 se presentan los resultados de la granulometría laser para la escoria sin lavar, se observa el tamaño de partícula contra el porcentaje de volumen presente. La mayoría de las partículas se encuentran entre el intervalo de 20 a 800 µm.

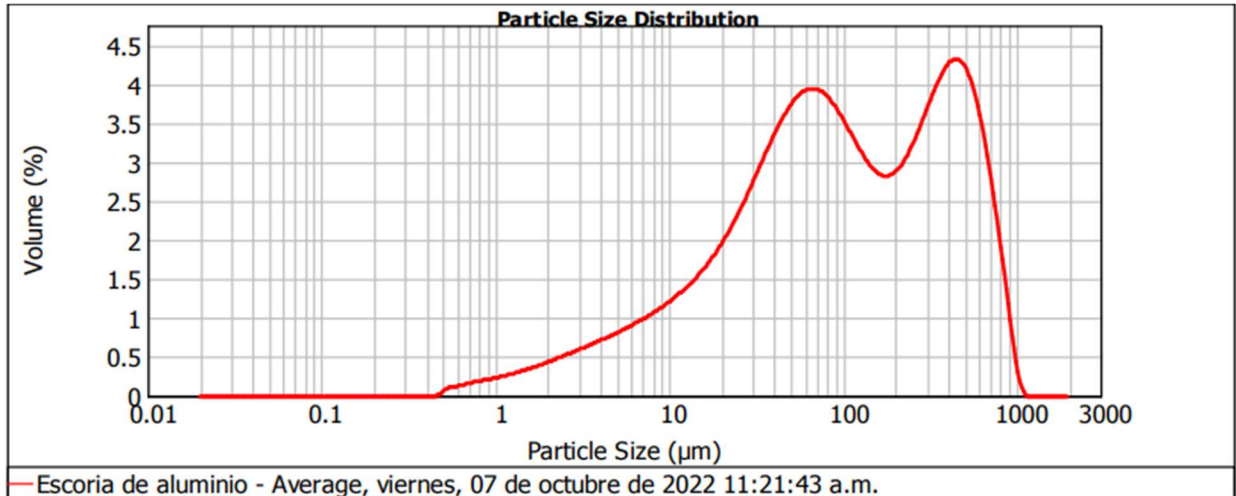


Figura 25 Granulometría laser escoria de aluminio, escoria sin apagar y moler, **Fuente:** Propia

En la Figura 26 se presentan los resultados obtenidos de granulometría laser de la escoria de aluminio lavada sin moler, se logra determinar que la mayoría de las partículas se encuentra entre el intervalo de 100 a 1000 μm , además se observa un desplazamiento en la curva la distribución granulométrica hacia la derecha, lo cual implica un incremento en el tamaño respecto a la escoria sin lavar.

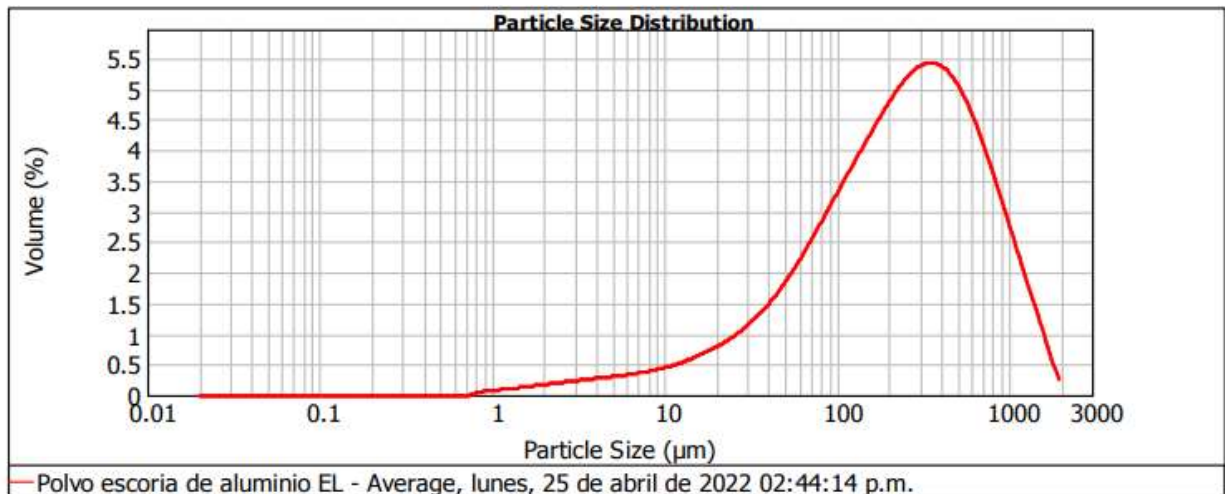


Figura 26 granulometría laser de escoria aluminio lavada sin moler, **Fuente:** Propia

En la Tabla 12 se presentan los resultados de la superficie específica, tamaño medio, coeficiente de uniformidad y el intervalo de partícula, obtenido durante el ensayo de granulometría para ambas escorias, en la cual se evidencia que al realizar el proceso de lavado el diámetro medio de las partículas incrementa al realizar el proceso de lavado, es posible que estas se aglutinaran

como resultado del proceso, también se determina que la superficie específica disminuye al realizar el lavado.

Tabla 12 Granulometría laser, Fuente: Propia

MUESTRA	SUPERFICIE ESPECIFICA m²/g	UNIFORMIDAD	DIAMETRO MEDIO PARTICULA (μm)
Cemento	0,342	0,701	14,359
Escoria sin lavar	0,316	1,71	92,432
Escoria lavada	0,121	1,03	243,105

4.1.2 Escoria lavada y molida

4.1.2.1 Difracción de rayos X

En la Figura 27 se encuentran graficados los datos obtenidos del proceso de difracción de rayos X realizado a las escorias lavadas, molidas y separadas por tamaños.

Los componentes identificados en todas las muestras son: Al₂O₃, AlN, Al, Mg_{0.388}Al_{2.408}O₄, MgAl₂O₄ y Al(OH)₃; evidenciando que la composición no cambia con la molienda ni con el tamaño de partícula.

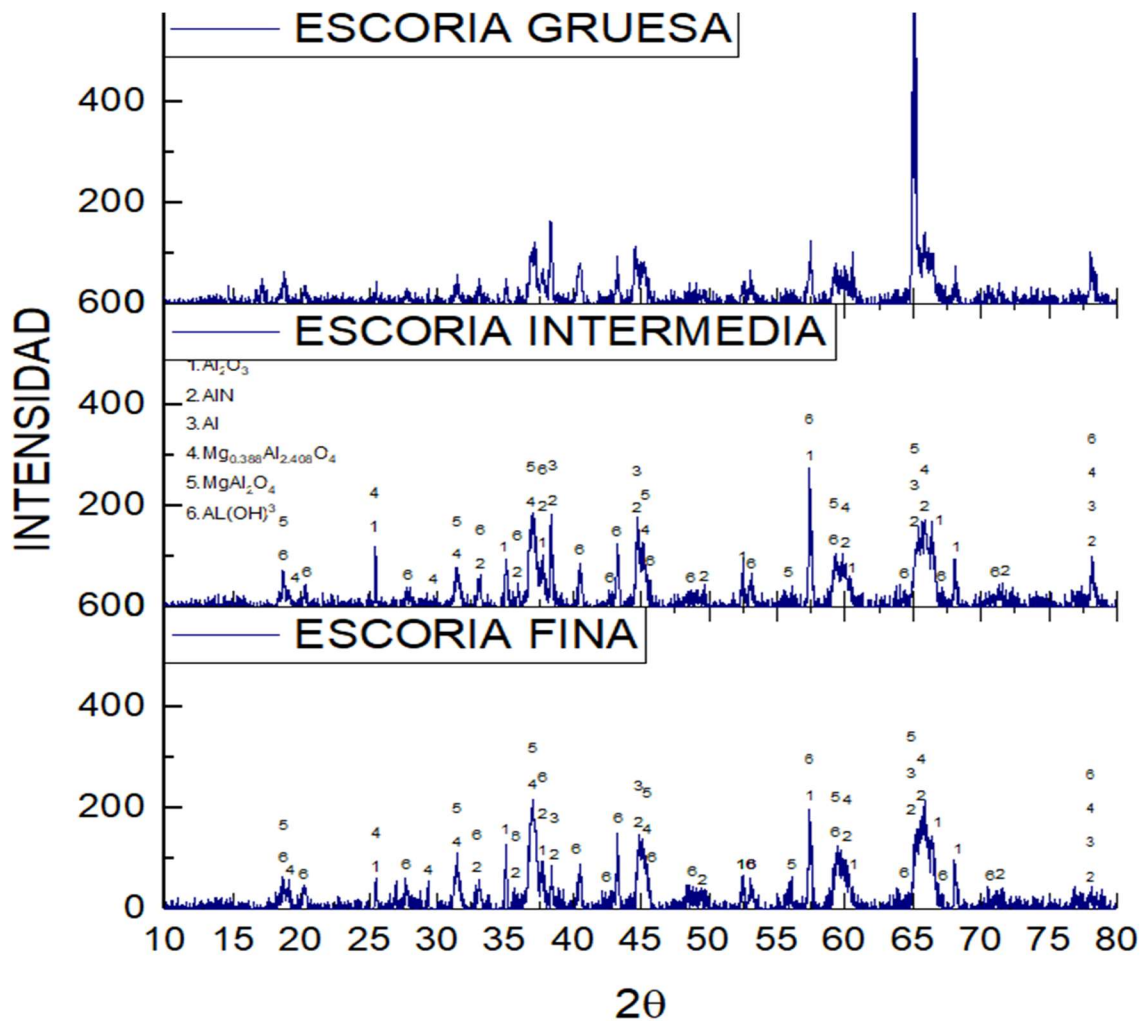


Figura 27 DRX Escoria gruesa, intermedia y fina apagadas y molidas, **Fuente:** Propia

Cabe destacar que la muestra gruesa quedó con picos de intensidad muy altos en comparación con los otros dos tamaños de partícula. Esto se evidencia en la posición 2θ igual a 65° , donde se presenta un pico con intensidad aproximada de 1140, el cual es un valor muy por encima de los valores normales obtenidos y por tal motivo no se analizaron sus componentes. por motivos de tiempo y costo para el proyecto no se repitió; pero en futuras investigaciones debe realizarse nuevamente.

Para el caso de la escoria gruesa, se observa como la ubicación de los picos coinciden a lo largo del eje x con los otros dos tamaños de partícula, por tal motivo se espera que los componentes en este tamaño continúen siendo los mismos, debido a que los mayores picos de intensidad de la escoria fina e intermedia coinciden con los picos que se alcanzan a diferenciar de la muestra gruesa.

En la Figura 28 se agrupan todos los resultados DRX realizados a las muestras de escoria lavada, esta permite ver como los componentes presentes en las diferentes muestras corresponden con los mismos para todos los casos; debido a que los diferentes picos de las muestras se encuentran ubicadas en los mismos puntos del eje X correspondiente con 2θ .

Al comparar las intensidades de los picos no se observan diferencias significativas, por tal motivo no se puede concluir nada con relación a la diferencia en la cantidad de sus componentes.

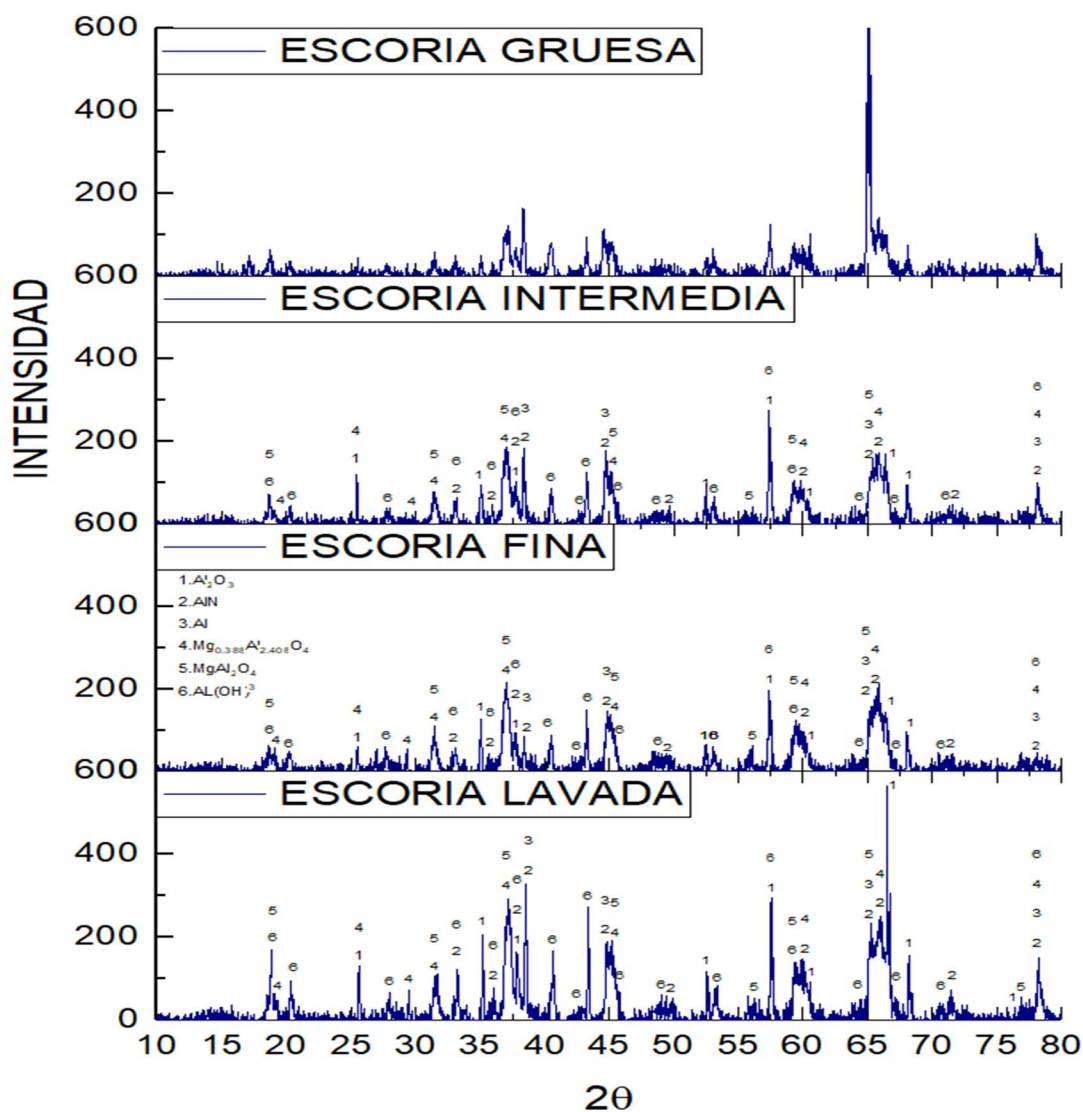


Figura 28 Comparación DRX escoria lavada y los diferentes tamaños de partícula para escoria molida, Fuente: Propia

4.1.2.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

A continuación, se presentan resultados de la microscopía electrónica de barrido realizado a la escoria de aluminio lavada y molida para los tres tamaños de partícula: Grueso, Intermedio y Fino.

En las Figura 29, Figura 30 y Figura 31 con aumento de 100X (figura A) se observan inicialmente los cambios en los tamaños de partícula predominantes en las imágenes, acorde con lo que se esperaba del proceso de molienda y tamizado; en cada imagen se evidencia predominancia de los diferentes tamaños de partícula; sin embargo no se logra determinar cambios significativos en las formas de las mismas.

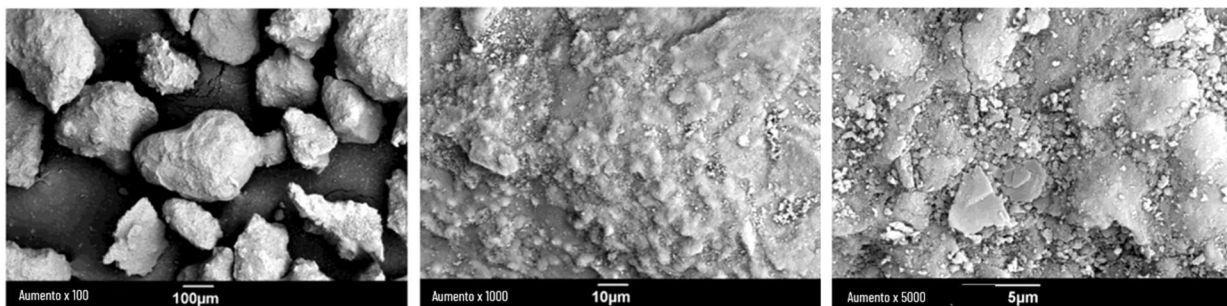


Figura 29 Escoria lavada y molida gruesa

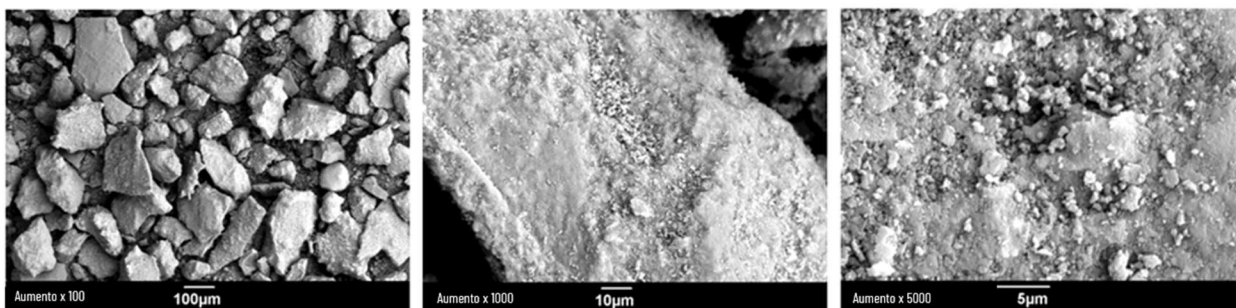


Figura 30 Escoria lavada y molida intermedia

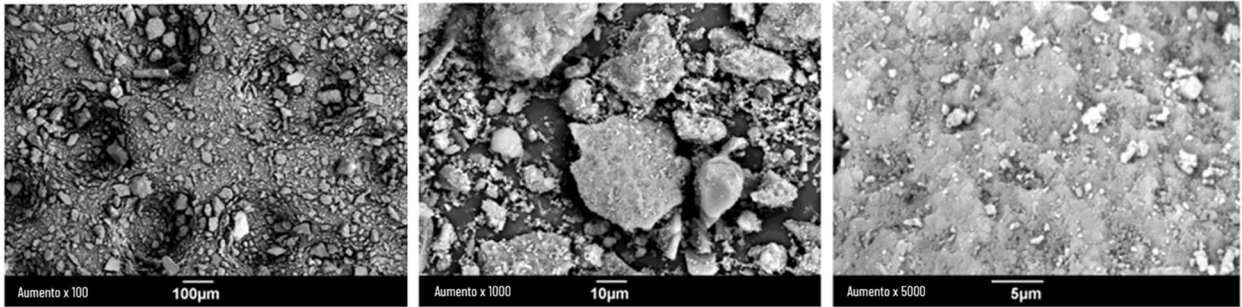


Figura 31 Escoria lavada y molida fina

4.1.2.3 Granulometría laser

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de granulometría laser para la escoria lavada y tamizada, en las Figura 32 y Figura 33 para escoria gruesa , Figura 34 y Figura 35 para escoria intermedia y en Figura 36 y Figura 37 para la escoria fina, en estas se observan respectivamente en la primera figura el volumen parcial de cada tamaño y en la segunda se observa el volumen acumulado donde el porcentaje del volumen se encuentra en el eje X y en el eje Y el tamaño de partícula.

Gruesa

En la Figura 32 y en la Figura 33 se observa que la mayoría de las partículas se encuentran entre el intervalo de 100 a 600 µm como se esperaba del proceso de tamizado y cuenta con un tamaño de partícula medio de 234,895 µm.

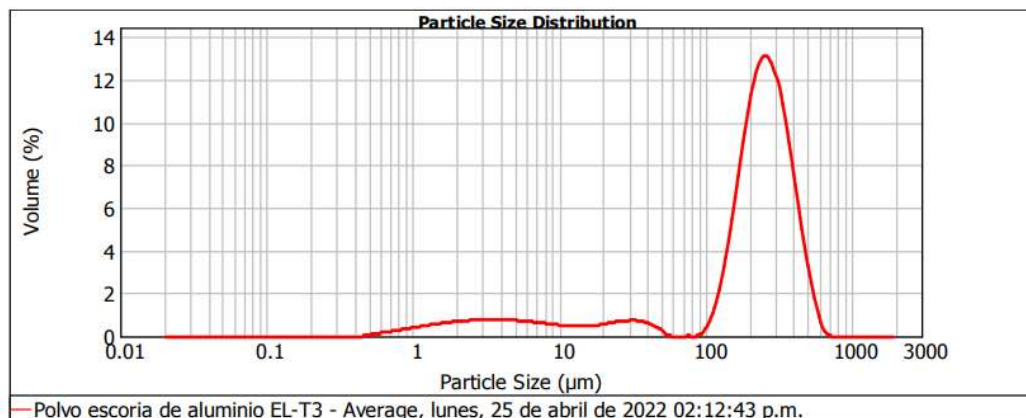


Figura 32 Granulometría laser acumulada escoria aluminio, escoria apagada tamaño grueso

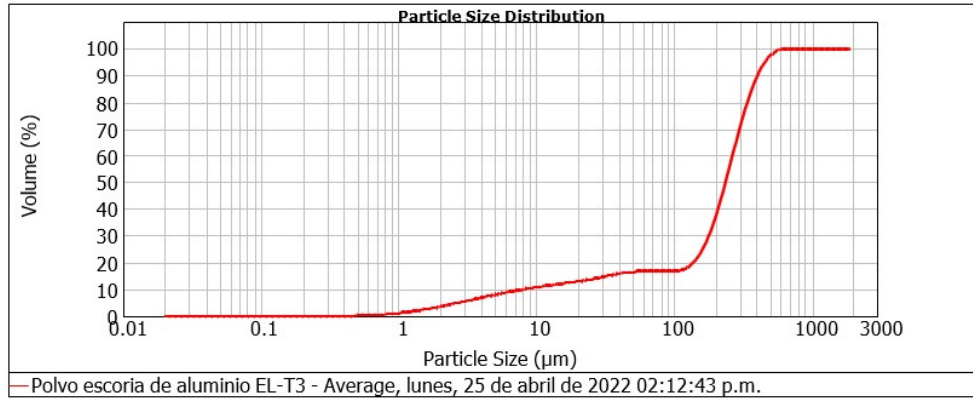


Figura 33 Granulometría laser acumulada escoria aluminio, escoria apagada tamaño grueso Intermedia

En la Figura 34 y Figura 35 se observa como la mayoría de las partículas se encuentra entre el intervalo de 30 a 300 μm y cuenta con un tamaño de partícula medio de 80,022 μm .

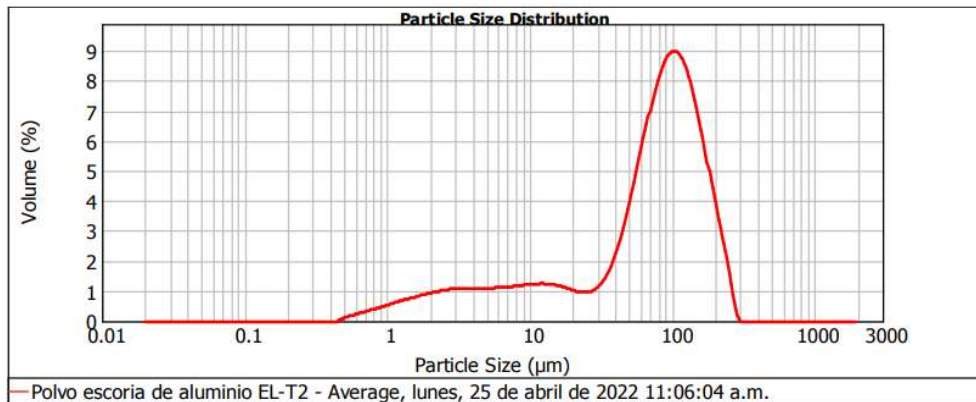


Figura 34 Granulometría laser individual de escoria aluminio, escoria apagada tamaño intermedia

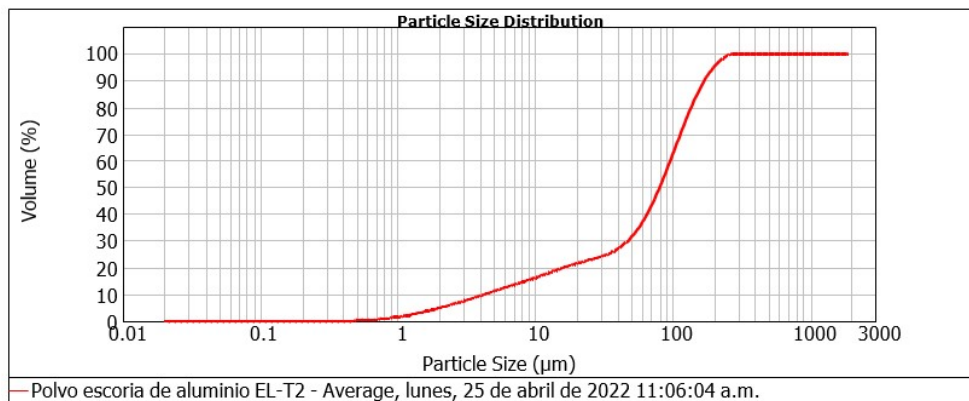


Figura 35 Granulometría laser acumulada escoria aluminio, escoria apagada tamaño Intermedia

Fina

En la Figura 36 y la Figura 37 se observa como la mayoría de las partículas se encuentra entre el intervalo de 1 a 100 μm y cuenta con un tamaño de partícula medio de 22,912 μm .

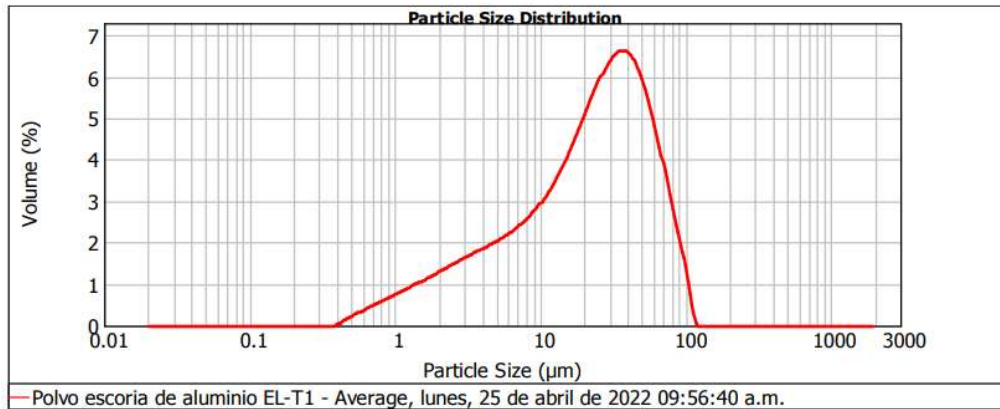


Figura 36 Granulometría laser individual de escoria aluminio, escoria apagada tamaño fina

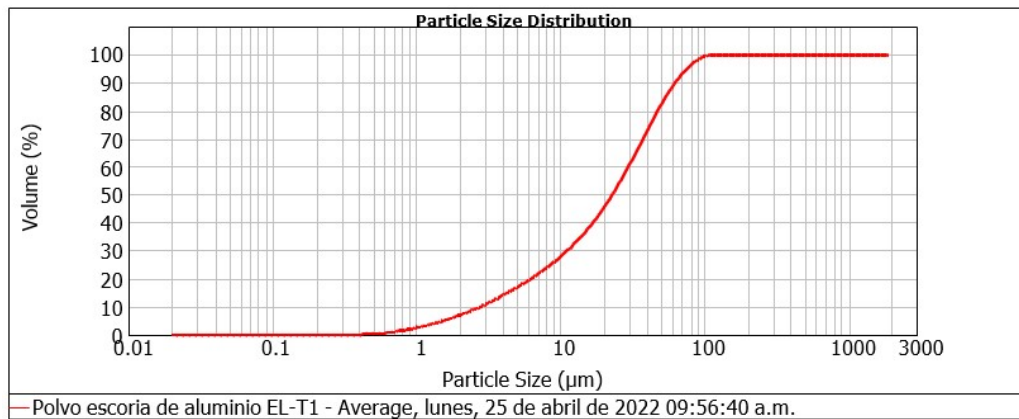


Figura 37 Granulometría laser acumulada escoria de aluminio, escoria apagada tamaño fina

En la Tabla 13 se presentan los resultados de la granulometría laser de todas las muestras, se observa como a medida que disminuye el tamaño de partícula incrementan la superficie específica de las muestras, de igual manera se ve como a medida que se disminuye el tamaño de partícula las gráficas de granulometría sin acumular se desplazan a la izquierda.

Tabla 13 Granulometría laser, **Fuente:** Propia

MATERIAL	SUPERFICIE ESPECÍFICA m²/g	UNIFORMIDAD	DIÁMETRO MEDIO PARTÍCULA (μm)
Cemento	0,342	0,701	14,359
Escoria sin lavar	0,316	1,710	92,432
Escoria lavada sin moler	0,121	1,030	243,105
Escoria gruesa	0,329	0,480	234,895
Escoria intermedia	0,500	0,624	80,022
Escoria fina	0,829	0,809	22,912

La escoria de tamaño fino es la escoria más semejante al tamaño del cemento pues presenta un tamaño medio de 22,912 μm, es posible que el tamaño de partícula tenga influencia en la resistencia del mortero, debido a su mayor tamaño, disminuye la interacción de las partículas de cemento hidratada.

4.2 Propiedades Físico - Mecánicas de morteros

4.2.1 Propiedades en estado fresco

A continuación, se presenta la información relacionada con las propiedades en estado fresco para las distintas mezclas de mortero con sustitución de escoria, estos ensayos corresponden a los ensayos de fluidez y tiempo de fraguado.

4.2.1.1 Ensayo de tiempo de fraguado

Para este ensayo, inicialmente se realizó el cálculo de agua que se necesita para tener una consistencia normal, considerando una adición de 5% de escoria de aluminio para los tamaños fino, intermedio y grueso; adicionalmente, se buscó obtener la penetración esperada para estos morteros según el contenido de agua; es decir cuando tengan una penetración de 10 mm al momento inicial de la mezcla como se observa en la Figura 38.

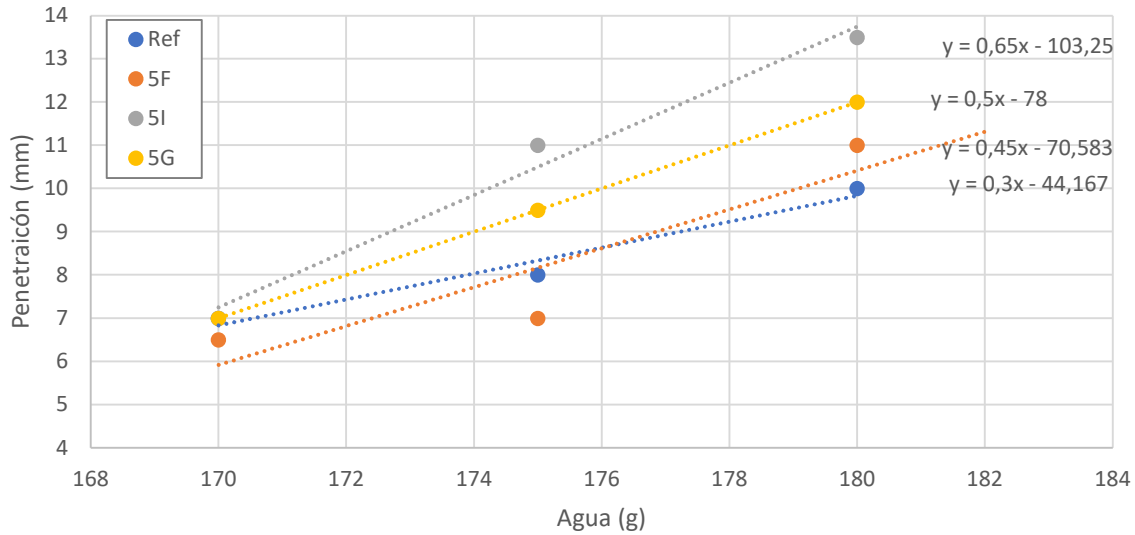


Figura 38 Penetración vs contenido de agua, Fuente: propia

A partir de estos resultados se observó que la adición de escoria de aluminio en la mezcla de mortero generó un incremento en la penetración de la aguja, lo cual, se entiende como un aumento en la fluidez de las pastas, sin embargo para el mortero con partícula de tamaño fino se presentó una menor penetración antes de los 176 g de agua aproximadamente.

Dado los resultados anteriores, se espera que a medida que se aumente el tamaño de partícula aumenta la fluidez del mortero, sin embargo, no se puede concluir el efecto de aumentar el porcentaje de sustitución ya que este no se realizó para el presente proyecto de acuerdo con el alcance del proyecto.

Para la determinación del tiempo de fraguado de cada mezcla se realizó la toma de penetración de las diferentes mezclas de mortero durante un tiempo 210 minutos. Se considera el tiempo inicial de fraguado aquel en el cual se obtiene una penetración de 25 mm de la aguja y el tiempo final de fraguado aquel que no deja marca al permitir el descenso de la aguja, para ello se usó la Figura 39

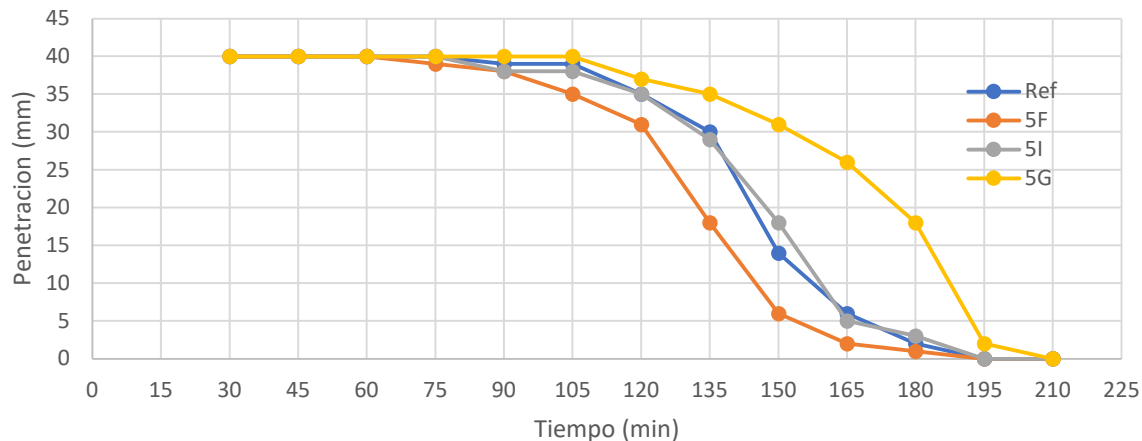


Figura 39 Penetración vs Tiempo, **Fuente:** Propia

Se observan los comportamientos para las diferentes mezclas de mortero, la mezcla con escoria de aluminio fina posee un menor tiempo de fraguado inicial en comparación a la mezcla de referencia, caso contrario para la mezcla con escoria de tamaño grueso que posee mayor tiempo, para la escoria de tamaño intermedio no existe diferencia considerable con el mortero de referencia, es probable que la diferencia en tiempos de fraguado se deba al tamaño de partícula de la escoria, puesto que al tener un mayor tamaño que el cemento no permita la correcta hidratación de la pasta de cemento o la interacción de las partículas hidratadas. También es probable que la diferencia en los tiempos de fraguado se deba a la reacción de AlN presente en las escorias al preparar las mezclas.

A continuación, en la Tabla 14 se presentan los tiempos de fraguado iniciales para cada mezcla realizada.

Tabla 14 Tiempo de fraguado inicial para cada mezcla de cemento y escoria, **Fuente:** propia

MEZCLA	TIEMPO (min)
Ref	140
5F	125
5I	140
5G	165

Para el tiempo de fraguado final se observa que todas las mezclas poseen el mismo tiempo final excepto para la mezcla con escoria de aluminio gruesa que posee una diferencia de 15 minutos respecto a las demás.

En conclusión, se observa una tendencia de comportamiento en el tiempo de fraguado, ya que a medida que aumenta el tamaño de partícula aumenta el tiempo de fraguado del cemento, sin embargo, cabe destacar que el tamaño de partícula fino posee un menor tiempo de fraguado a la mezcla de referencia, caso contrario a la mezcla con tamaño gruesa.

4.2.1.2 Ensayo de fluidez o consistencia

La fluidez o consistencia del mortero se realizó inmediatamente después de la preparación del mortero bajo la metodología de la norma ASTM C305 (2014), los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 15 y Figura 40.

Tabla 15 Ensayo de fluidez, **Fuente:** Propia

MEZCLA	DIÁMETRO (cm)	% FLUIDEZ
Ref	33	225%
5F	31,975	215%
5I	32,625	221%
5G	31,875	214%
10F	34,875	243%
10I	34,5	240%
10G	34,75	242%
20F	25,275	149%
20I	24,95	146%
20G	27,55	171%

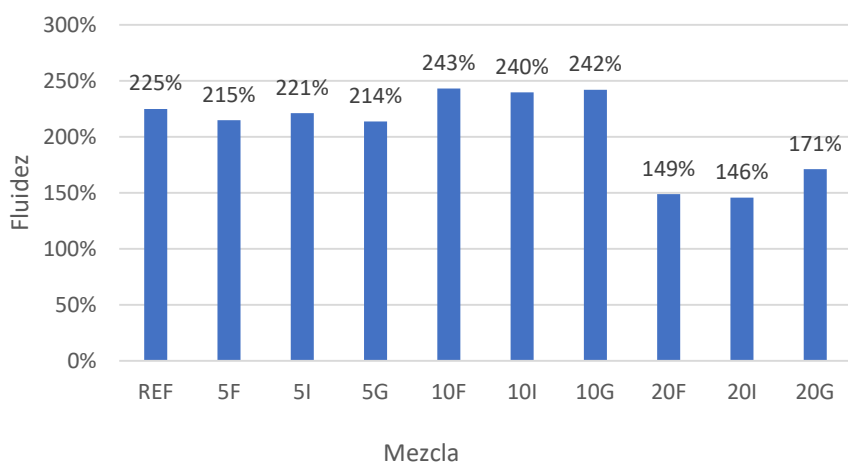


Figura 40 Fluidez mezclas, **Fuente:** Propia

Como se observa a medida que se incrementó el contenido de escoria de aluminio aumenta la fluidez de los morteros, en el caso de las mezclas con reemplazo de 20% se ajustó nuevamente

el agua adicionada por humedad de la arena y la fluidez de esta disminuyo respecto a las anteriores sin embargo continua con la tendencia de aumentar la fluidez al aumentar el tamaño de partícula.

4.2.2 Propiedades en estado endurecido

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los ensayos en estado endurecido de los morteros, los cuales fueron realizados a los 7, 28 y 56 días desde la preparación de la mezcla, estas pruebas fueron realizados en tres cubos de 5x5x5 cm por edad, en tres vigas de 16x4x4 cm por edad; finalmente, en las mitades resultantes de estas últimas al realizar el ensayo de flexión.

Cabe destacar que la nomenclatura de los morteros ensayados corresponde con la siguiente acotación presentada en la Tabla 10 .

4.2.2.1 Resistencia a la compresión en cubos

A continuación, se presentan los valores promedio de resistencia obtenidos en cada una de las mezclas de mortero ensayadas a 7, 28 y 56 días a partir de la preparación de la mezcla de mortero y sumergidas para curado. Para evaluar la resistencia se ensayaron 3 cubos en cada una de las edades.

En la Tabla 16 se presentan los valores promedio de resistencia a la compresión y su respectiva desviación estándar para las muestras evaluadas.

Tabla 16 Resistencia a la compresión en cubos, Fuente: Propia

MEZC.	7 días		28 días		56 días	
	PROM (MPa)	DESV (MPa)	PROM (MPa)	DESV (MPa)	PROM (MPa)	DESV (MPa)
REF	31,24	1,88	39,11	0,91	44,65	1,07
5F	30,80	0,36	35,18	0,17	38,92	1,01
5I	25,99	0,16	30,48	3,03	36,10	0,41
5G	21,16	0,97	26,52	1,54	31,83	0,55
10F	22,69	1,28	28,91	1,28	32,72	0,89
10I	19,53	1,24	23,10	0,69	27,01	0,68
10G	20,08	1,06	24,40	0,83	26,96	1,30
20F	20,52	2,36	26,58	0,82	27,22	0,64
20I	17,67	0,97	21,12	1,87	22,79	1,19
20G	11,51	0,50	15,87	0,97	15,83	1,08

De igual manera en la Figura 41 se presenta de manera gráfica los resultados obtenidos.

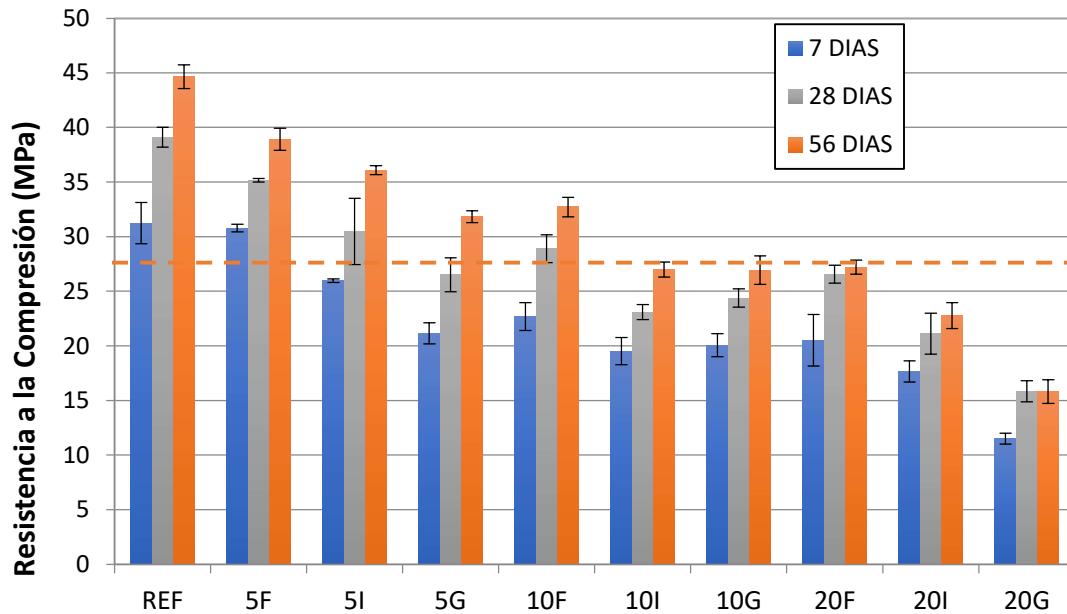


Figura 41 Resistencia a la compresión en cubos en MPa, Fuente: propia

En la anterior Figura se evidencia que cada mortero preparado con adición de escoria de aluminio presenta aumento en la resistencia a la compresión a medida que pasa el tiempo, particularmente para el mortero con partícula gruesa y con sustitución del 20% del cemento no existe mayor variación de resistencia a la edad de 28 y 56 días.

Adicionalmente, para los morteros con una sustitución del 5% del cemento, se encuentra que alcanzan resistencias a la compresión superiores a los 28 MPa (resistencia de diseño) a los 56 días independiente del tamaño, al igual, que el mortero con tamaño de partícula gruesa y una sustitución del 10%.

Respecto al tamaño de partícula la comparación que se realizó tuvo en cuenta las diferencias para las mismas edades de ensayo, es decir, que inicialmente se consideró el efecto del tamaño de partícula a los 7 días, luego a los 28 días y finalmente a los 56 días, en los resultados se observa que a medida que aumenta el tamaño de partícula disminuye la resistencia a la compresión promedio de las mezclas, este efecto se presenta en todas las edades de ensayo, al igual que se observa que ninguna de las muestras posee resistencias promedio cercanas a las del mortero de referencia para la misma edad de ensayo.

Al considerar la desviación estándar de las diferentes mezclas se encuentra que el mortero con tamaño de partícula fino presentó las menores diferencias de resistencia frente al mortero de referencia, sin embargo, al considerar la desviación en el análisis se identificó que la resistencia a los 7 días de las mezclas con escoria fina, poseen valores similares de resistencia que el mortero con escoria intermedia a los 28 días, al igual, que el mortero con escoria gruesa a los 56 días; este efecto, probablemente se deba a añadir escoria en el mortero, pues en las pastas se observó que la escoria gruesa presentaba mayores tiempos de fraguado inicial, lo cual, permite considerar, la posibilidad de que la escoria retrasa el tiempo de fraguado en función del tamaño de partícula independiente del porcentaje de sustitución y el desarrollo de resistencia.

Continuando con el análisis se encontró que cuando aumenta el porcentaje de sustitución de cemento por escoria de aluminio, disminuye la resistencia a la compresión promedio de los morteros independiente del tamaño de partícula, como fue demostrado por Panditharadhya et al. (2019) en su investigación al variar el porcentaje de sustitución del 0% al 20% del contenido de cemento.

Al considerar la desviación estándar de las diferentes mezclas, para el porcentaje de sustitución se encuentra que, el mortero con tamaño de partícula fino presentó valores similares al mortero de referencia, sin embargo, los morteros con sustitución del 10% y el 20% no presentaban valores cercanos a la referencia o a las sustituciones del 5% pero si entre ellos.

En la Tabla 17 y Figura 42 se presenta la pérdida de resistencia a la compresión en las diferentes mezclas respecto al mortero de referencia realizado.

Tabla 17 Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión en cubos respecto a mortero referencia, Fuente: Propia

MEZCLA	PERDIDA RESISTENCIA		
	7 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS
5F	1,41%	10,07%	12,85%
5I	16,82%	22,07%	19,16%
5G	32,28%	32,19%	28,73%
10F	27,39%	26,07%	26,73%
10I	37,49%	40,94%	39,52%
10G	35,74%	37,63%	39,63%
20F	34,32%	32,05%	39,04%
20I	43,45%	46,01%	48,96%
20G	63,16%	59,43%	64,56%

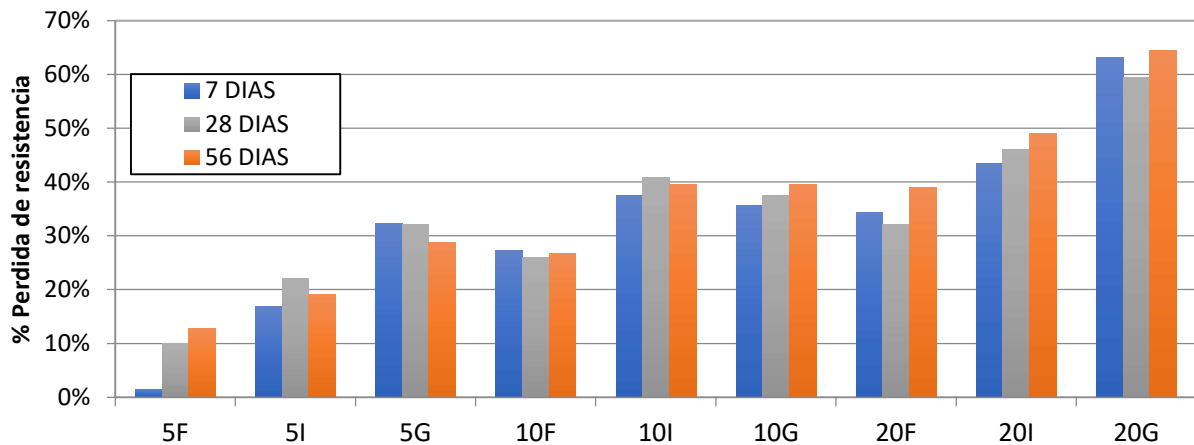


Figura 42. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión respecto a mortero referencia,
Fuente: propia

En la anterior figura se observa como a medida que aumenta el tamaño de partícula de la escoria y el porcentaje de sustitución del cemento, aumenta el porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión; sin embargo se observa que el mortero 10F y 20F presentan menores pérdidas que los morteros 5G y 10G respectivamente, siendo más favorable aumentar el porcentaje de sustitución que el tamaño de partícula en estos casos.

A partir de los resultados anteriores y la composición de la escoria, se puede considerar que la pérdida de resistencia está asociada a la presencia de nitrato de aluminio para los 3 tamaños de partícula, por la reacción de este compuesto con el agua de la mezcla, donde probablemente se produjo amonio (NH_4^+), el cual fue liberado en forma de gas, además posiblemente quedó atrapado al interior del mortero.

La liberación de amonio gaseoso al interior del mortero puede provocar porosidades o bolsas de aire, los cuales afectan directamente la pérdida de resistencia del mortero. Considerando lo anterior, es posible que las irregularidades que presentaban los morteros al día siguiente de su preparación se deban a la generación de amonio.

Considerando la tendencia de las mezclas al perder resistencia respecto al mortero de referencia, es posible considerar como a medida que aumenta el porcentaje de sustitución del cemento por escoria de aluminio, aumenta la concentración de AIN en el mortero.

Otro aspecto que permite considerar que los morteros con mayores tamaño de partícula afectan en mayor medida la resistencia corresponde con la expansión de las mezclas, lo cual se evidenció al desencofrar los especímenes, pues este fenómeno era más evidente en aquellos con tamaños gruesos que en aquellos con el tamaño fino, esta expansión del mortero también fue registrado por Panditharadhy et al. (2019) en las muestras de concreto con escoria de aluminio.

4.2.2.2 Resistencia a la compresión en mitades de viga

En el caso del ensayo a la compresión en mitades de vigas, este también se realizó a la edad de 7, 28 y 56 días inmediatamente después de realizar el ensayo a flexión en un total de 6 mitades por edad.

En la Tabla 18, se presentan los datos promedio de resistencia obtenidos y su respectiva desviación.

Tabla 18 Resistencia a la compresión en mitades de viga, Fuente: Propia

MEZCL	7 DÍAS		28 DÍAS		56 DÍAS	
	PROM (MPa)	DESV(MPa)	PROM(MPa)	DESV(MPa)	PROM(MPa)	DESV(MPa)
REF	30,72	1,21	36,90	1,67	42,03	1,95
5F	28,05	2,73	35,31	0,48	40,34	2,82
5I	23,32	0,81	32,34	0,93	34,80	0,96
5G	21,78	0,81	28,57	0,93	32,78	0,96
10F	23,39	0,99	29,68	0,89	32,13	1,36
10I	20,15	0,88	23,11	1,37	25,89	1,94
10G	20,05	1,22	25,11	0,92	26,62	1,08
20F	22,25	0,64	26,37	1,79	26,68	1,29
20I	17,83	0,73	21,80	0,86	23,51	0,97
20G	10,67	0,45	17,08	1,08	15,40	0,75

En la Figura 43 se encuentran graficados los resultados obtenidos.

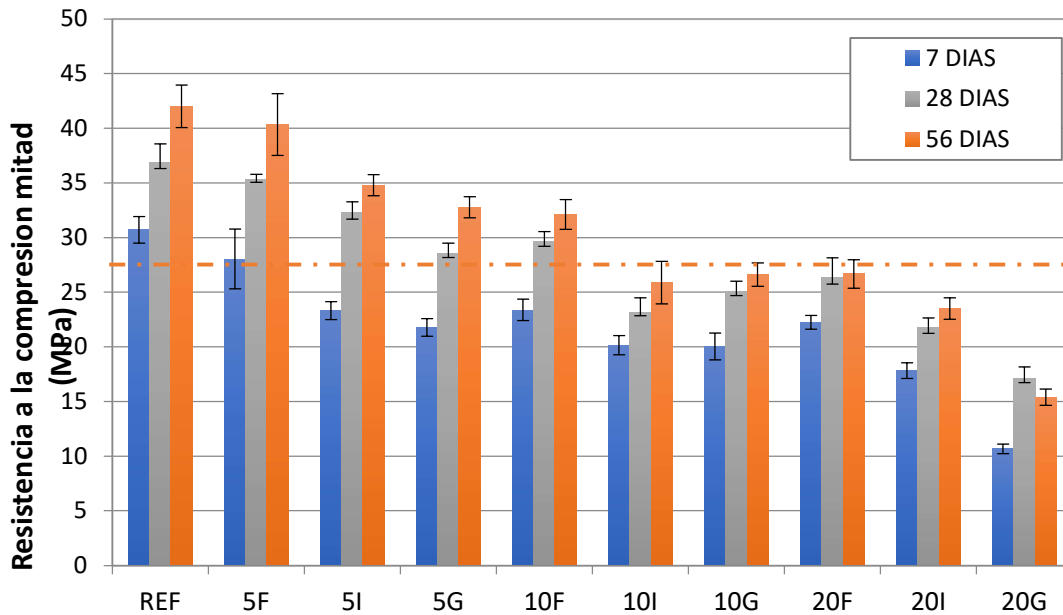


Figura 43 Resistencia a la compresión en mitades de vigas en MPa, Fuente: propia

Al igual que en el ensayo de resistencia a la compresión en cubos se observan los mismos comportamientos en las diferentes mezclas, se evidencia un aumento en la resistencia a la compresión para las mitades de las vigas, a medida que pasa el tiempo, sin embargo, también se observa como en el mortero con escoria gruesa y una sustitución del 20% del cemento, presenta una reducción de la resistencia a la edad de 56 días.

A sí mismo, en las mitades de las vigas se presenta una resistencia a la compresión mayor a 28 MPa (resistencia de diseño) para la edad de 56 días en los morteros cuya sustitución corresponde con el 5%.

En relación con el tamaño de partícula, se observa cómo a medida que aumenta el tamaño de partícula disminuye la resistencia a la compresión promedio de las mezclas, aspecto que también se repite en todas las edades de ensayo realizadas; este patrón también se evidenció en la resistencia a la compresión en cubos.

Al considerar la desviación estándar de las muestras se puede concluir que el mortero 5F se asemeja un poco más a la muestra de referencia en las diferentes edades de ensayo y para la edad de 56 días no existen diferencias estadísticas significativas debido al traslape de sus desviaciones, para los demás tamaños sin embargo, al considerar la desviación en el análisis se observa que la resistencia a los 7 días de las mezclas con escoria fina, poseen valores similares de resistencia que

el mortero con escoria intermedia a los 28 días, al igual, que el mortero con escoria gruesa a los 56 días. Este efecto, probablemente se deba a añadir escoria en el mortero, pues en las pastas se observó que la escoria gruesa presentaba mayores tiempos de fraguado inicial, lo cual, permite considerar que los resultados anteriores, se deba a la posibilidad de que la escoria retrasa el tiempo de fraguado en función del tamaño de partícula independiente del porcentaje de sustitución.

En la Tabla 19 y Figura 44 se presenta la pérdida de resistencia a la compresión en las diferentes mitades de viga de las mezclas respecto al mortero de referencia realizado.

Tabla 19 Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión en mitades de viga respecto a mortero de referencia, Fuente: Propia

MEZCLA	PÉRDIDA RESISTENCIA		
	7 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS
5F	8,70%	4,31%	4,01%
5I	24,08%	12,36%	17,21%
5G	29,10%	22,58%	22,00%
10F	23,85%	19,57%	23,55%
10I	34,40%	37,38%	38,39%
10G	34,75%	31,96%	36,65%
20F	27,57%	28,55%	36,51%
20I	41,95%	40,92%	44,06%
20G	65,25%	53,72%	63,36%

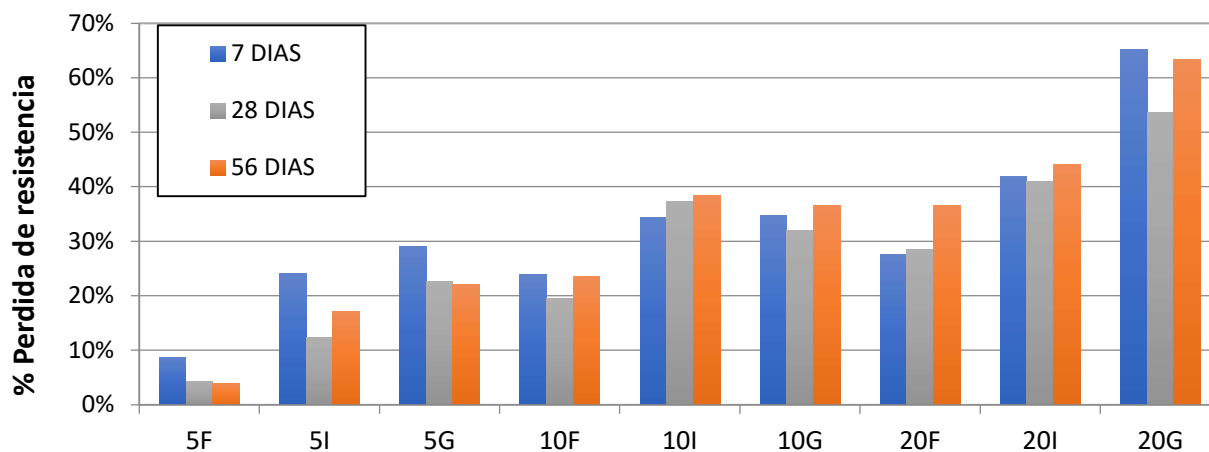


Figura 44 Pérdida de resistencia a la compresión en mitades de viga respecto a mortero referencia, Fuente: propia

En la anterior figura se observa al igual que la resistencia a la compresión en cubos cómo a medida que aumenta el tamaño de partícula de la escoria, aumenta la pérdida de resistencia

promedio, del mismo modo se observa como al aumentar porcentaje de sustitución de cemento este influye directamente en la disminución de la resistencia del mortero, sin embargo, también se observa que el mortero 10F y 20F presentan menores pérdidas que los morteros 5G y 10G respectivamente, siendo más favorable aumentar el porcentaje de sustitución que el tamaño de partícula en estos casos.

Similar que en la resistencia a la compresión de los cubos se muestra cómo al aumentar el tamaño de partícula y el porcentaje de sustitución de cemento disminuye la resistencia del mortero, aspecto que también se puede asociar a la liberación de amonio en la mezcla en el segundo caso, pues las vigas al ser desencofradas presentaban mayor expansión de la cara libre respecto a los cubos.

4.2.2.3 Resistencia a la flexión en viga

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el ensayo a flexión en vigas, estas también fueron ensayadas a las edades de 7, 28 y 56 días desde la preparación de la mezcla, para cada mezcla se ensayaron 3 vigas.

Los resultados para la resistencia a flexión promedio de las diferentes mezclas, se presentan en la Tabla 20 y la Figura 45.

Tabla 20 Resistencia a la flexión en vigas, Fuente: Propia

MEZCLA	7 DÍAS		28 DÍAS		56 DÍAS	
	PROM (MPa)	DESV(MPa)	PROM (MPa)	DESV (MPa)	PROM (MPa)	DESV (MPa)
REF	4,72	0,83	5,37	0,57	6,47	0,94
5F	4,82	0,78	6,00	0,26	6,17	0,38
5I	5,57	0,11	4,79	0,64	5,40	0,16
5G	4,66	0,50	4,72	0,38	5,89	0,68
10F	4,04	0,20	4,75	0,45	4,38	0,21
10I	3,57	0,35	4,53	0,26	4,87	0,34
10G	3,88	0,16	4,98	0,40	4,93	0,37
20F	3,85	0,54	4,28	0,62	4,61	0,26
20I	3,29	0,37	4,46	0,56	4,65	0,21
20G	1,72	0,08	3,68	0,35	2,81	0,30

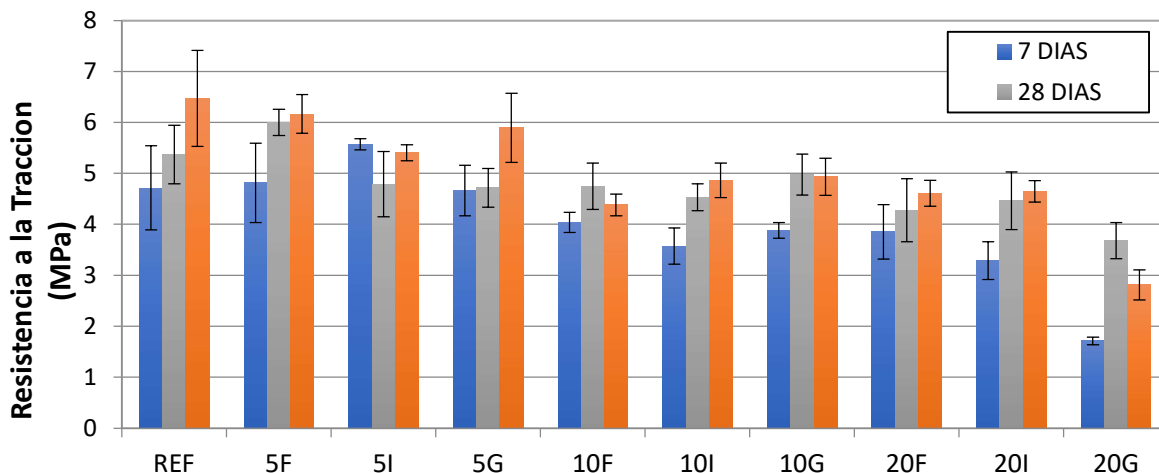


Figura 45 Resistencia a la flexión en vigas, Fuente: Propia

En la anterior Figura se observa cómo la resistencia a la flexión promedio en la mayoría de los casos aumenta a medida que aumenta la edad del mortero, sin embargo, este comportamiento no se evidencia para la totalidad de las mezclas pues en algunos casos la resistencia es menor a los 56 días que a los 28, Adicionalmente, se detecta una menor variación de la resistencia a la flexión entre los 28 y 56 días en comparación con la resistencia del mortero de referencia.

En relación con el tamaño de partícula al comparar las resistencias promedio y considerar las desviaciones estándar, no se observa que a medida que aumenta el tamaño de partícula disminuye la resistencia a la flexión pues las desviaciones estándar de las diferentes edades y tamaños se traslapan entre sí, principalmente a las edades de 28 y 56 días.

Al analizar el porcentaje de sustitución de la escoria, se encontró cómo un aumento en el porcentaje disminuye la resistencia a la flexión. Sin embargo, si se considera la desviación de cada mezcla se percibe como la mayoría de los morteros se encuentran ubicados dentro del intervalo de resultados normales del mortero de referencia, además este caso se cumple en todos los tamaños de partícula. Lo anterior, indica que no hubo una afectación de esta propiedad para ese contenido, sin embargo, el mortero con mejores resultados promedios de resistencia corresponde al mortero 5F.

En la Tabla 21 y Figura 46 se presenta la pérdida de resistencia a la flexión en las diferentes vigas de las mezclas respecto al mortero de referencia realizado.

Tabla 21 Porcentaje de pérdida de resistencia a la flexión en vigas respecto a mortero referencia, Fuente: Propia

MEZCLA	PÉRDIDA DE RESISTENCIA		
	7 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS
5F	-2,10%	-11,73%	4,73%
5I	-18,08%	10,84%	16,51%
5G	1,13%	12,18%	8,93%
10F	14,36%	11,59%	32,27%
10I	24,22%	15,60%	24,80%
10G	17,69%	7,30%	23,76%
20F	18,28%	20,36%	28,75%
20I	30,29%	16,92%	28,18%
20G	63,63%	31,46%	56,52%

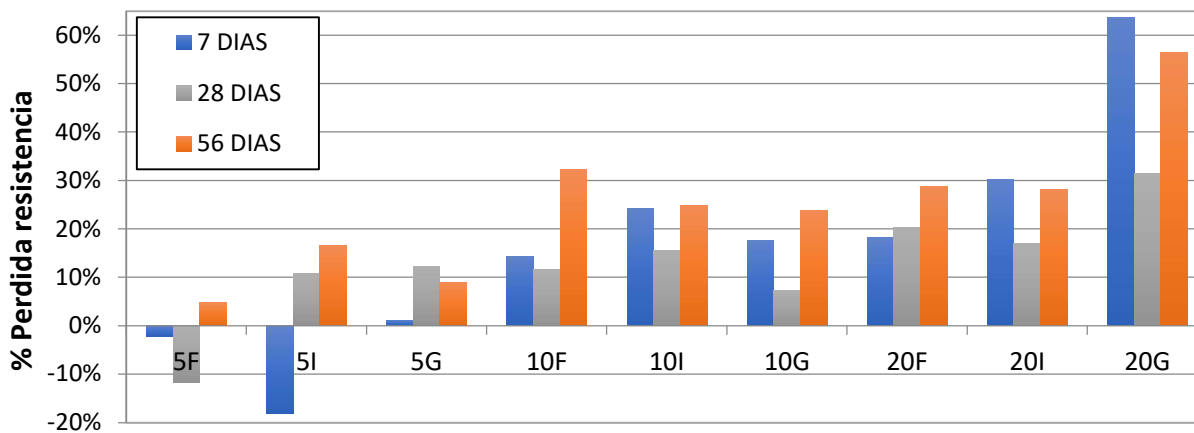


Figura 46 Pérdida de resistencia a la flexión en vigas respecto a mortero referencia, Fuente: propia

En la anterior figura se observa cómo la resistencia a la flexión a medida que aumenta el tamaño de partícula de la escoria aumenta la pérdida de resistencia.

En el presente caso se observa cómo el mortero con escoria fina y sustitución del 5% junto con el mortero de escoria intermedia y sustitución del 5%, presentan mayor resistencia promedio respecto al mortero de referencia a la edad inicial de 7 días, pero continúan prevaleciendo la disminución de la resistencia a medida que aumenta el tamaño de partícula y el porcentaje de sustitución. Esto también se deba probablemente a la producción de amonio durante la preparación de la mezcla, como ya fue mencionado previamente.

4.2.2.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

A continuación, se presentan las imágenes obtenidas de los morteros en estado endurecido ya ensayados en la Figura 47, en estas no se percibe alguna diferencia notable entre su composición general, pero cabe destacar que en las muestras con escorias de tamaño intermedio y grueso las partículas de escoria al poseer un tamaño mayor a $200\ \mu\text{m}$ predominan en la estructura del mortero, además cuentan con una estructura más esférica a comparación de las partículas de tamaño fino que presentan formas prismáticas o piramidales, posiblemente permitiendo una mejor adherencia de la pasta de mortero.

Se observa cómo las mezclas de mortero con escoria de aluminio presentan una estructura más parecida a la de los concretos donde se diferencian la pasta y los agregados a simple vista, esto se puede deber a que la escoria de aluminio presenta un tamaño medio de partícula superior al del cemento. también se observó en los especímenes con escoria de aluminio algunos productos de hidratación con composición diferente al mortero de referencia, esto se constató con la técnica semicuantitativa del EDS.

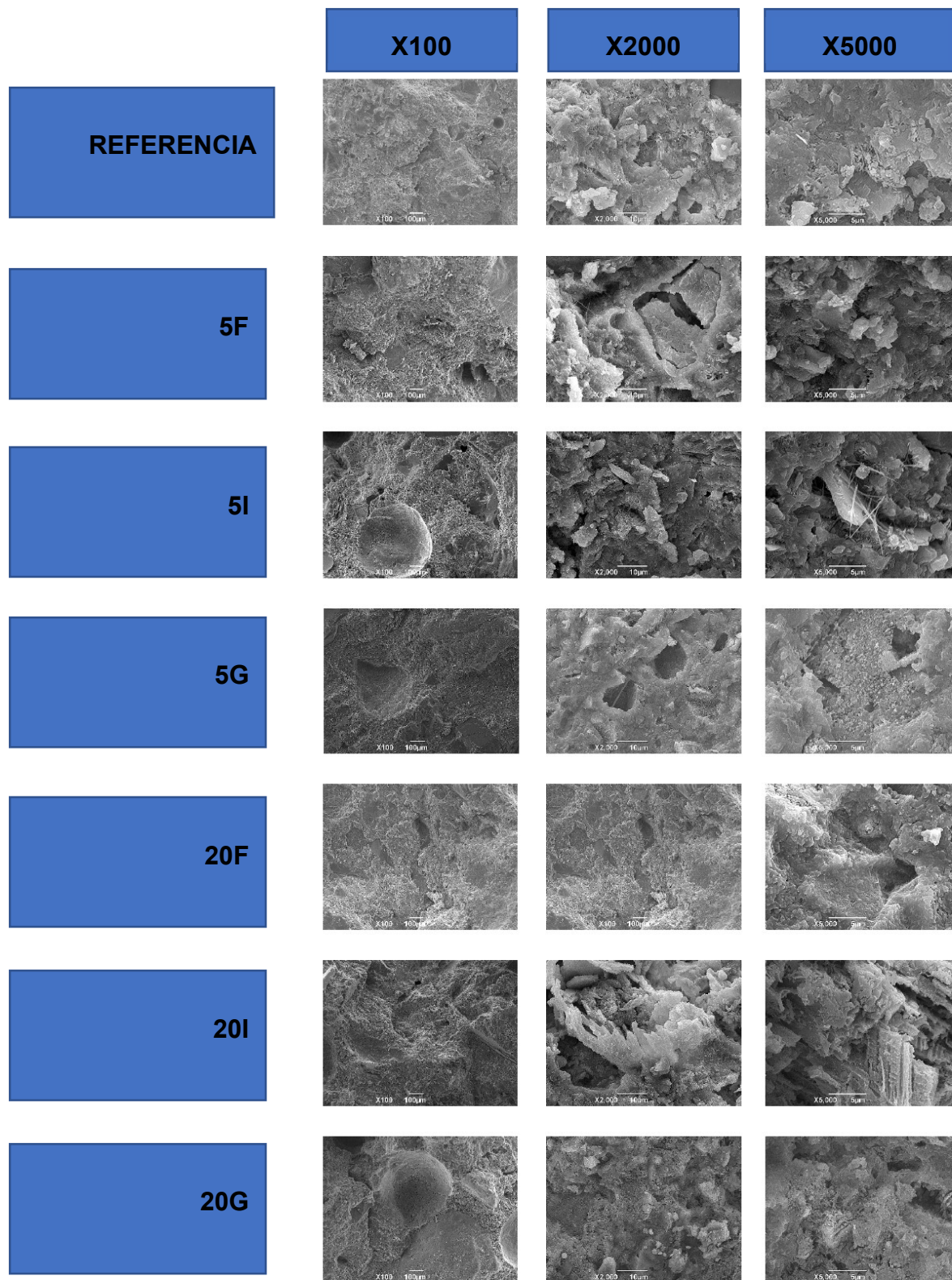


Figura 47 SEM diferentes muestras de mortero, Fuente: Propia

4.2.2.5 Absorción total.

En la Tabla 22, se presentan los resultados de absorción total para cubos con 28 días de curado.

Tabla 22 Porcentaje de absorción total a los 28 días, **Fuente:** propia

MEZCLA	ABSORCION	DESVIACIÓN
	28 DÍAS	28 DÍAS
REF	11,33%	0,14%
5F	13,16%	0,11%
5I	13,29%	0,16%
5G	12,15%	0,15%
10F	14,05%	0,16%
10I	15,21%	0,21%
10G	13,53%	0,11%
20F	12,83%	0,22%
20I	12,59%	0,21%
20G	14,91%	0,21%

En la Figura 48 se presentan los resultados obtenidos de absorción donde se evidencia un incremento en la absorción de los morteros con escoria de aluminio.

El incremento en la absorción del mortero probablemente se debe al aumento de los poros internos generados en el proceso de endurecimiento, considerando que la escoria molida posee AIN en sus diferentes tamaños, es probable que durante el proceso de hidratación del cemento el agua de la mezcla reaccionara con este componente, generando amonio en estado gaseoso al mismo tiempo que produce porosidades.

Al analizar el efecto del tamaño de partícula se percibe cómo a medida que aumenta el tamaño incrementa la absorción del mortero, a partir de esto es probable considerar que a medida que aumenta el tamaño, también aumenta el contenido de AIN en la escoria y por ende también en el mortero.

De igual manera al considerar el porcentaje de sustitución del cemento se observa cómo a medida que aumenta este, incrementa la absorción del mortero, probablemente se deba a que se incrementa el contenido de escoria y crece el contenido de AIN en este y por ende el contenido de amonio generado en el mortero.

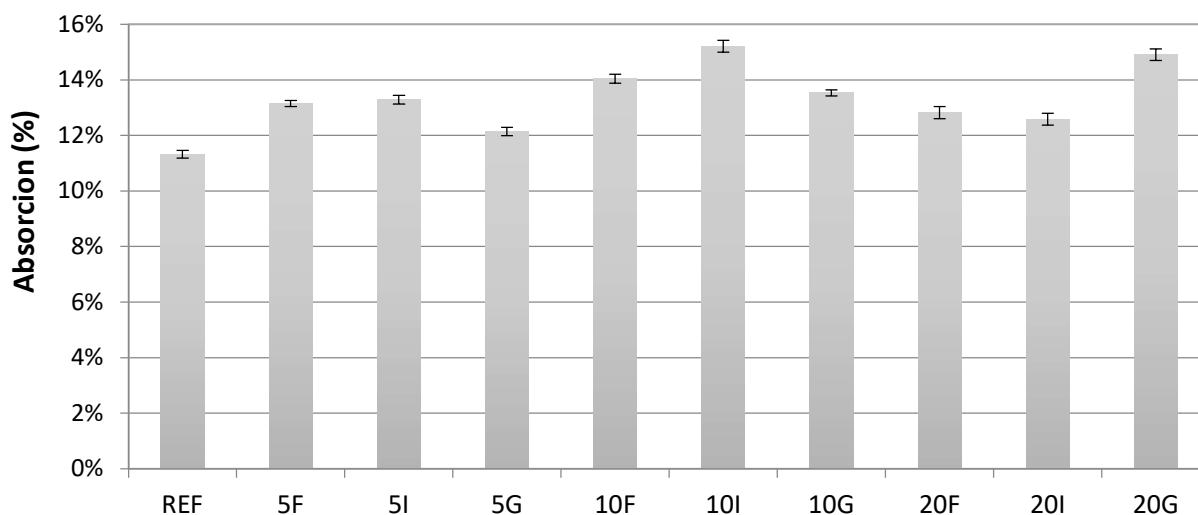


Figura 48 Absorción a los 28 Días, Fuente: Propia

En la Tabla 23 se encuentra el aumento de absorción de los morteros, en ésta se observa como la mayoría de los morteros tuvieron aumentos considerables con respecto a la mezcla de referencia.

Tabla 23 Aumento de absorción de los morteros frente al mortero de referencia, Fuente: Propia

MEZCLA	AUMENTO ABSORCION 28 DÍAS
5F	16,11%
5I	17,31%
5G	7,20%
10F	23,99%
10I	34,25%
10G	19,46%
20F	13,20%
20I	11,08%
20G	31,59%

4.2.3 Correlaciones entre propiedades

A continuación, se presentarán una serie de gráficas en las cuales se relacionan las diferentes, propiedades en estado endurecido evaluadas.

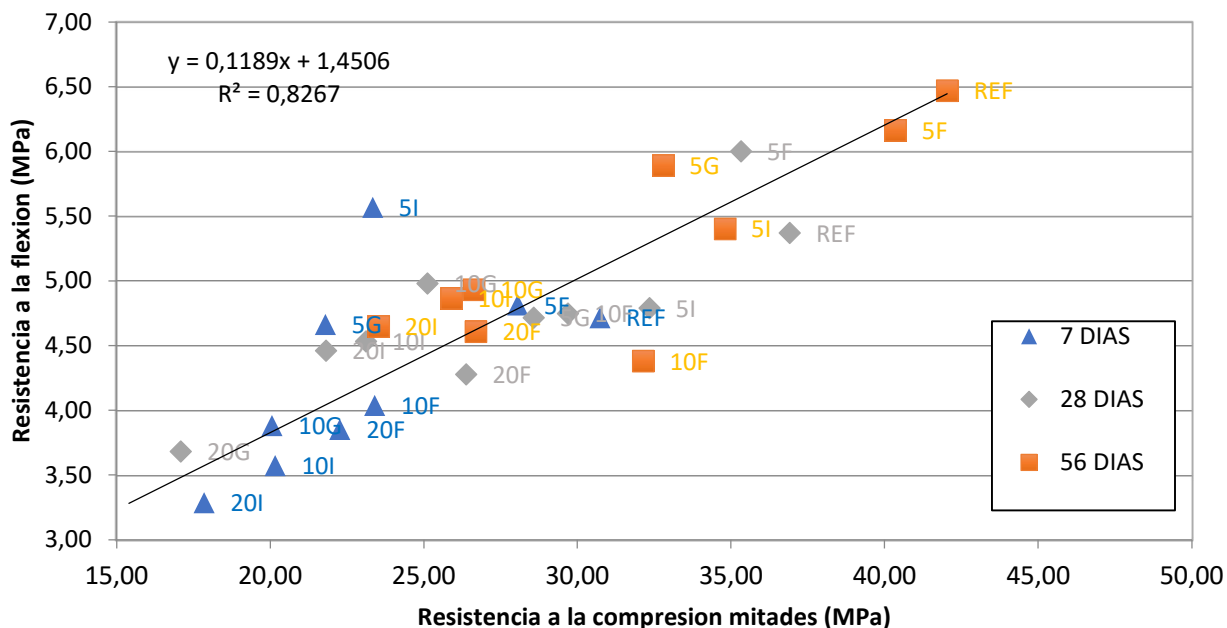


Figura 50 Resistencia a la compresión de mitades de viga vs resistencia a la flexión, Fuente: Propia

4.2.3.2 Resistencia a la compresión (cubos y mitades) vs absorción (densidad).

A continuación se presenta la relación obtenida al enfrentar los resultados de la resistencia a la compresión de los cubos, la resistencia a la compresión de las mitades de viga contra la absorción para una misma mezcla de mortero. Los resultados obtenidos se presentan en las Figura 51 y Figura 52. En ambos casos se observa como a medida que disminuye la resistencia a la compresión, incrementa la absorción. Por tal motivo para los morteros con sustitución de cemento con escoria de aluminio se puede establecer que existe una relación directa entre estas propiedades.

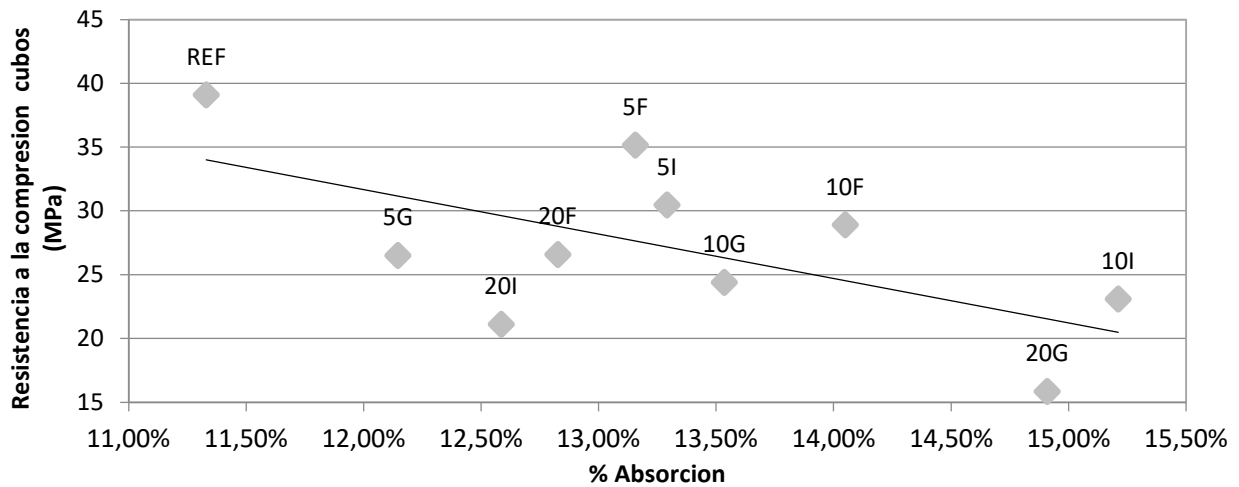


Figura 51 resistencia a la compresión en cubos vs absorción, Fuente: Propia

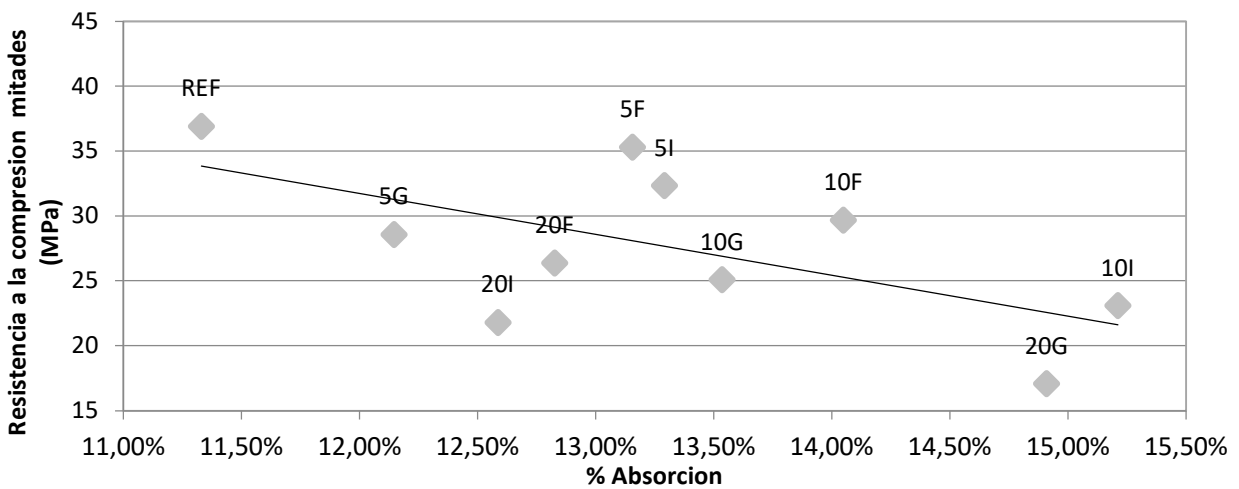


Figura 52 resistencia a la compresión en mitades de viga vs absorción, Fuente: Propia

4.2.3.3 Resistencia a la flexión vs absorción (densidad).

Se presenta la relación obtenida al enfrentar los resultados de la resistencia a la flexión de las vigas contra la absorción para una misma mezcla de mortero, los resultados obtenidos se observan en la Figura 53, en esta se observa como a medida que disminuye la resistencia a la flexión incrementa la absorción del mortero, esto permite establecer como para los morteros con sustitución de cemento con escoria de aluminio poseen una relación inversamente proporcional entre estas propiedades.

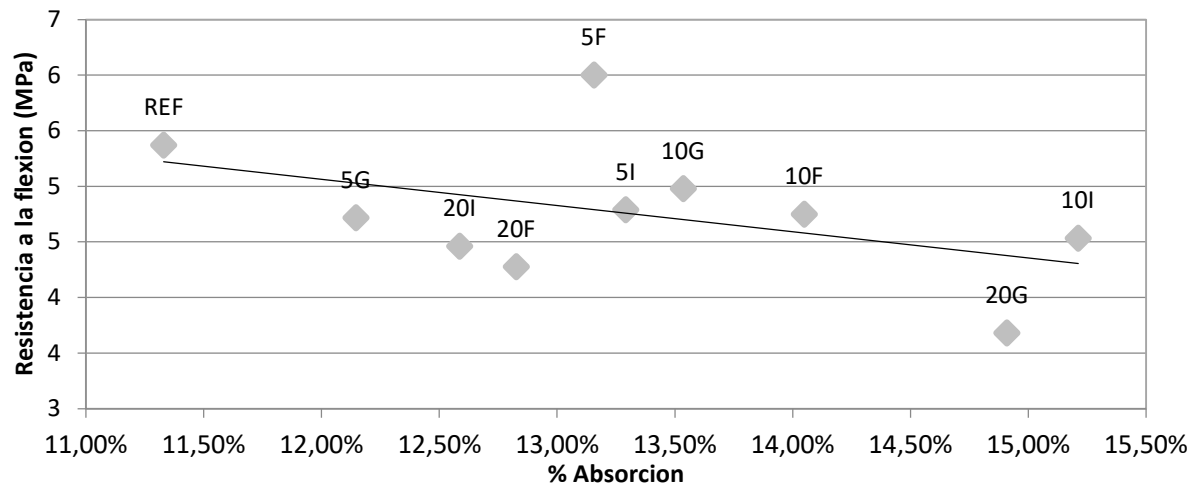


Figura 53 Resistencia a la flexión en viga vs absorción, **Fuente:** Propia

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos y el análisis de estos, se pueden considerar las siguientes conclusiones.

La escoria de aluminio es un material que posee nitruro de aluminio AlN, con el fin de liberar una parte del contenido de AlN esta puede ser lavada con agua para inducir la formación de amonio, sin embargo, este método no permite la eliminación total del AlN. Lo anterior se evidenció en los ensayos de difracción de rayos X realizados ya que se encontró este componente y Al_2O_3 , pero no fue posible evidenciar la cantidad presente de cada uno de estos en los distintos tamaños de partícula.

Según la apariencia física de las muestras de mortero, se puede considerar que la escoria aún contenía AlN, debido a que en los cubos y las vigas, presentaron ciertas protuberancias en la cara no confinada por las formaletas, además, en ciertas zonas se observaron orificios en sus caras, por tal motivo se considera que durante la preparación del mortero, el AlN en la escoria reaccionó con el agua de la mezcla produciendo amonio gaseoso, el cual, generó poros capilares, aumentando la absorción de los morteros y reduciendo las propiedades mecánicas respecto al mortero de referencia.

Las propiedades físico-mecánicas de los morteros realizados conservaron el comportamiento común de los materiales a base de cemento a lo largo del tiempo, para el presente caso en la evaluación de la resistencia a la compresión y a la flexión estos presentaron incremento de las resistencias a los 7, 28 y 56 días de su preparación. Por tal motivo, se concluye independiente del tamaño de partícula de la escoria y del porcentaje de reemplazo del cemento, que las propiedades mecánicas de los morteros se incrementan con el tiempo. Lo que indica mayor grado de hidratación del material.

Según los resultados obtenidos, el tamaño de partícula influye inversamente proporcional a las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, sin embargo la resistencia a la flexión no presento mayores diferencias, según los resultados obtenidos para la escoria el tamaño de partícula fina ($<75\mu m$) siempre presentó mejores desempeños frente al tamaño intermedio (75-150 μm) y al tamaño grueso (150-300 μm). Lo anterior puede estar asociado a un efecto físico positivo de las partículas que mejora la hidratación del material.

Al igual que el tamaño de partícula, a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, disminuye la resistencia a la compresión y a la flexión de los morteros, en el caso del 5% de sustitución siempre se obtuvieron mejores resistencias en comparación del 10% y el 20%, puesto que las pérdidas del 5% se encontraron en un rango del 4% al 20% mientras que la pérdida de resistencia para la sustitución para el 10% se encuentra entre el 20% y 40% y finalmente, la sustitución del 20% alcanza a presentar pérdidas de hasta el 65% de la resistencia frente al mortero de referencia.

Se evidenció, en los resultados de resistencia a compresión, que es preferible aumentar el porcentaje de sustitución de las escorias con el tamaño fino, que aumentar el tamaño de partícula y tener porcentaje de sustitución menor, ya que en todos los casos el aumento del porcentaje de sustitución para escoria fina presentó menores pérdidas de resistencia respecto al mortero de referencia que aquel con el tamaño de partícula gruesa.

Según los resultados obtenidos, los morteros con sustitución de cemento por escoria de aluminio presentan una disminución de las propiedades mecánicas con la inclusión de la escoria. Sin embargo, si se considera como objetivo la resistencia a compresión de diseño de 28 MPa, aquellos especímenes que cuentan con una sustitución del 5% poseen resistencias superiores a la resistencia de diseño, independientemente del tamaño de partícula, al evaluar las diferencias de las propiedades con el mortero de referencia, es viable técnicamente realizar el reemplazo del 5% de cemento por escoria fina con tamaño de partícula inferior a 75 μm .

Respecto a la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión se observó una relación directa entre ambas, es decir, a medida que aumenta la resistencia a la compresión también aumenta la resistencia a la flexión para todos los morteros evaluados.

Se observó que la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión se ve afectada por la absorción de los morteros, estas tienen una relación indirecta en las capacidades de los morteros, a medida que aumentó la absorción de las diferentes muestras disminuyeron las propiedades mecánicas de resistencia en todas las ocasiones.

5.1 Recomendaciones para trabajos futuros

De acuerdo con los resultados obtenidos y presentados en este trabajo, se recomienda ampliar el estudio con las siguientes propuestas:

Investigar mecanismos que permitan mejorar la eliminación del AlN de la escoria de aluminio previo a su uso en morteros, con el fin de disminuir las diferencias entre las propiedades mecánicas y físicas.

Analizar el efecto del tamaño de partícula y el porcentaje de sustitución en concretos, con el fin de comparar los efectos de la escoria de aluminio con los morteros aquí estudiados.

Estudiar el impacto de porcentaje de sustitución del cemento por escoria de aluminio y el tamaño de partícula en la fluidez, trabajabilidad y tiempo de fraguado en los materiales a base de cemento.

Evaluar la durabilidad de los morteros, pues es necesario realizar ensayos para validar sus capacidades y los efectos del reemplazo al igual que el tamaño de partícula, pues se observó un incremento considerable en la absorción al incluir la escoria de aluminio, donde el incremento respecto al mortero de referencia va desde el 7,2% al 34,25%, por lo cual se recomienda realizar la exposición de los morteros a agentes que puedan afectar sus propiedades y su vida útil.

Es necesario que en futuros estudios se evalúe la capacidad de los morteros de liberación de amonio al ambiente en contacto al agua durante el estado fresco y en estado endurecido al contacto al agua, porque el limitante para su uso en construcción corresponde a factores ambientales y de salud, donde el primero se puede ver limitado por la capacidad del mortero de generar contaminación en distintas fuentes hídricas y en el segundo caso por la exposición al amonio que se libere durante su manipulación y su funcionamiento.

Adicionalmente al enfoque ambiental se recomienda desarrollar análisis del ciclo de vida de los materiales relacionados, considerando como uno de sus ejes los posibles efectos de manipular o exponerse a estos materiales en la salud de las personas durante el tiempo de trabajo como posibles con afectaciones futuras, de igual manera es necesario considerar en estos análisis los posibles costos asociados.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adedoyin, F., Ozturk, I., Abubakar, I., Kumeka, T., Folarin, O., & Bekun, F. V. (2020). Structural breaks in CO₂ emissions: Are they caused by climate change protests or other factors? *Journal of Environmental Management*, 266(December 2019), 110628. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110628>
- Araújo, E. G. de, & Tenório, J. A. S. (2005). Cellular Concrete with Addition of Aluminum Recycled Foil Powders. *Materials Science Forum*, 498–499, 198–204. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.498-499.198>
- Borhan, M., & Hussein, J. (2016). Thermal properties of cement mortar containing waste aluminium fine aggregate. *Journal of Kerbala University*, 14(2), 193–200.
- Cámara Colombiana de la Construcción. (2020). *Los pasos hacia la reactivación de la economía colombiana*. 16.
- Cozzi, L., Gould, T., Bouckart, S., Crow, D., Kim, T.-Y., McGlade, C., Olejarnik, P., Wanner, B., & Wetzel, D. (2020). *World Energy Outlook 2020*. 2050(October), 213–250. https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2020_557a761b-en
- CRU International Limited. (2018). *Producto2_Aluminio_FINAL_12DIC2018*.
- Dai, C. (2012). *development of aluminum dross-based material for engineering applications by submitted to the faculty of the degree of Master of Science in material science and engineering january 2012 approved: prof. diran apelian, advisor prof. tahar el-korchi prof.*
- Dane. (2020). *Economía-Circular-1-Reporte 2020*. Dane, 1–120. <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/economia-circular/economia-circular-1-reporte.pdf>
- David, E., & Kopac, J. (2013). Aluminum recovery as a product with high added value using aluminum hazardous waste. *Journal of Hazardous Materials*, 261, 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.042>
- Elseknidy, M. H., Ali, S., Saad, A. H., Kineber, A. F., & Nor, S. I. (2020). VE application in material selection assessment and performance of aluminum dross as cement replacement. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(6), 5803–5818.
- Ewais, E. M. M., Khalil, N. M., Amin, M. S., Ahmed, Y. M. Z., & Barakat, M. A. (2009). Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium aluminate cement. *Ceramics International*, 35(8), 3381–3388. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.06.008>
- Farjana, S. H., Huda, N., & Mahmud, M. A. P. (2019). Impacts of aluminum production: A cradle to gate investigation using life-cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 663, 958–970. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.400>
- Gessa Ana y Sancha Pilar. (2016). Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la producción de cemento. *Innovar*, 26(60), 51–66.

<https://doi.org/10.15446/innovar.v26n60.55532.citaci>

- ICONTEC. (1995). *NTC 92:método de ensayo para la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados.*
- ICONTEC. (2013a). *NTC 1926:concretos. método de ensayo para determinar la densidad (masa unitaria), el rendimiento y el contenido de aire por gravimetría del concreto.*
- ICONTEC. (2013b). *NTC 93: método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de agregados gruesos mayores de 19 mm, utilizando la máquina de los ángeles.*
- ICONTEC. (2018). *NTC 77: concretos. método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.*
- ICONTEC. (2019a). *NTC 110: cementos. cantidad de agua requerida para la consistencia normal de una pasta de cemento hidráulico.*
- ICONTEC. (2019b). *NTC 176: Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso.*
- ICONTEC. (2019c). *NTC 221: Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico.*
- ICONTEC. (2019d). *NTC 33: Cementos. Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire.*
- ICONTEC. (2020a). *NTC 118:Cementos. Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante aguja de Vicat.*
- ICONTEC. (2020b). *NTC 237:Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino.*
- ICONTEC. (2021a). *NTC 220:Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado.*
- ICONTEC. (2021b). *NTC 5784: Cementos. Método de ensayo para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico.*
- ICONTEC. (2022). *NTC 120: Cementos. Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico.*
- International, A. (2014). *ASTM C305:Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.*
- International Aluminium Institute. (n.d.). *Primary Aluminium Production.* Retrieved March 18, 2022, from <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>
- Lemos, E. D., Chilito, L. C., Maya, J. C., Gómez, A., & Rojas, M. A. (2020). *uso de la escoria de aluminio en el concreto - revisión del. november.*
- Li, Y., Qin, Z., Li, C., Qu, Y., Wang, H., Peng, L., & Wang, Y. (2021). Hazardous characteristics and transformation mechanism in hydrometallurgical disposing strategy of secondary aluminum dross. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(September), 106470.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106470>

- Liu, Y., Leong, B. S., Hu, Z. T., & Yang, E. H. (2017). Autoclaved aerated concrete incorporating waste aluminum dust as foaming agent. *Construction and Building Materials*, 148, 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.047>
- Mahinroosta, M., & Allahverdi, A. (2018). Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 223(May), 452–468. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.068>
- Mailar, G., N, S. R., B.M, S., D.S, M., Hiremath, P., & K., J. (2016). Investigation of concrete produced using recycled aluminium dross for hot weather concreting conditions. *Resource-Efficient Technologies*, 2(2), 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.refit.2016.06.006>
- Meneses Núñez, Laura Sofia. Escobar, Daniela. Ibarra, Santiago José. Núñez Navia , Juan Camilo. Muñoz, Mario. Salazarb, K. . (2021). *Diseño de un proceso productivo que permita la recuperación de escoria de aluminio para su uso como materia prima en morteros*.
- Mohamad, N., Muthusamy, K., Embong, R., Kusbiantoro, A., & Hashim, M. H. (2021). Environmental impact of cement production and Solutions: A review. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.212>
- Negrão, L. B. A., Pöllmann, H., & Costa, M. L. da. (2021). Production of low-CO₂ cements using abundant bauxite overburden “Belterra Clay.” *Sustainable Materials and Technologies*, 29, e00299. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00299>
- ONU. (2015). Memoria del Secretario General sobre la labor de la Organización. *Naciones Unidas*, 1(1), 1–88. <https://undocs.org/es/A/70/1>
- ONU. (2020). *Producción y consumo responsables*. 46–47. <https://doi.org/10.18356/ed22134f-es>
- Orozco Erazo, D., & Vega Báez, J. (2022). *Estudio del efecto del tamaño de partícula de escoria de aluminio calcinada utilizada como remplazo parcial de cemento en las propiedades mecánicas de morteros*.
- Panditharadhya, B. J., Mulangi, R. H., & Ravi Shankar, A. U. (2023). Mechanical properties of pavement quality concrete with aluminium industry waste as a binder. *Materials Today: Proceedings*, xxxx, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.066>
- Panditharadhya, B. J., Mulangi, R. H., & Shankar, A. U. R. (2019). Impact on Workability and Setting Time of Portland Cement Concrete with Secondary Aluminium Dross as an alternative Binder. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(6S3), 1476–1481. <https://doi.org/10.35940/ijeat.f1263.0986s319>
- Panditharadhya, B. J., Mulangi, R. H., Shankar, A. U. R., & Amulya, S. (2019). Performance of Concrete Mix with Secondary Aluminium Dross as a Partial Replacement for Portland Pozzolana Cement. *Airfield and Highway Pavements 2019: Testing and Characterization of Pavement Materials - Selected Papers from the International Airfield and Highway Pavements Conference 2019*, 408–416. <https://doi.org/10.1061/9780784482469.041>
- Pereira, D. A., De Aguiar, B., Castro, F., Almeida, M. F., & Labrincha, J. A. (2000). Mechanical behaviour of Portland cement mortars with incorporation of Al-containing salt slags. *Cement*

- and Concrete Research*, 30(7), 1131–1138. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00272-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00272-6)
- Quintero, A. (2016). Alumina pasará de exportar 12% a 25% de su producción. *LA REPUBLICA*. <https://www.larepublica.co/empresas/alumina-pasara-de-exportar-12-a-25-de-su-produccion-2427331>
- Reddy, M. S., & Neeraja, D. (2016). Mechanical and durability aspects of concrete incorporating secondary aluminium slag. *Resource-Efficient Technologies*, 2(4), 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.10.012>
- Sanchez de Guzman, D. (2001). *TECNOLOGIA DEL CONCRETO Y DEL MORTERO (QUINTA)*. Bhandar Editores.
- Shinzato, M. C., & Hypolito, R. (2005). Solid waste from aluminum recycling process: Characterization and reuse of its economically valuable constituents. *Waste Management*, 25(1), 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.08.005>
- Sistema español de inventario de emisiones. (2019). *Fabricación de Aluminio (Emisiones de Proceso)*. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040301-fabric-aluminio_tcm30-502319.pdf
- Song, X. M. (1997). *Replacing AI Powder with AI Slag or Recycled Foil in Cellular Concrete Change of Address ?*
- Sousa, V., & Bogas, J. A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>
- Sun, J., & Yang, Y. (2019). Performance of New Non-Clinker Aluminum Dross Cement Curing Agent. *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences, icner*. <https://doi.org/10.12783/dteees/icner2018/28533>
- Tsakiridis, P. E. (2012). Aluminium salt slag characterization and utilization - A review. *Journal of Hazardous Materials*, 217–218, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.052>
- Vijayalakshmi, R ;Rajeswari, R. (2018). Characteristic Study on Behaviour of Lightweight Concrete Using Aluminium Dross and Aluminium Powder. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(1), 290–294.
- Yang, Y., & Li, X. (2022). Study on compatibility of poplar wood and Portland cement. *Construction and Building Materials*, 314(PA), 125586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125586>

7. GLOSARIO DE TERMINOS ESPECIALES

Bauxita: Residuo producido por la meteorización de las rocas ígneas en condiciones geomórficas favorables; agregado de varios minerales de aluminio. Tiene color pardo con manchas rojas y constituye la principal mena de aluminio.

Alúmina: Óxido de aluminio que se halla en la naturaleza puro y cristalizado o formando con otros cuerpos feldspatos y arcillas.

Aluminio: Metal plateado, muy ligero, buen conductor y resistente a la oxidación, que no se encuentra nunca libre en la naturaleza y se extrae principalmente de la bauxita.

Escoria de aluminio: Desecho de la producción de aluminio, está compuesta por aluminio metálico, óxidos y otras sustancias no metálicas. De acuerdo con la cantidad de aluminio las escorias se pueden clasificar como blanca (15-70 %), negra (12-18 %) y torta de sal (3-5 %).

Dióxido de carbono: Compuesto químico, parte del ciclo del carbono, es producido en la respiración de los seres vivos, en combustiones y en algunas fermentaciones.

Piedra caliza: Roca sedimentaria que al menos está compuesta por el 50% de carbonato de calcio (CaCO_3) a manera de calcita, su origen principal es bioquímico-orgánico en un ambiente marino somero, pero también puede formarse por precipitación química en ambientes continentales evaporíticos.

Arcillas: Sedimento o roca lutítica, constituida por un agregado de silicatos hidroalumínicos que pueden ir acompañados de otros minerales. Manifiesta propiedades plásticas cuando el contenido de agua oscila entre determinados límites. Sus minerales son filosilicatos hidratados principalmente de aluminio y magnesio, con tamaño de partícula muy fino, aspecto terroso, plásticos. Incluyen los grupos de la caolinita, illita, esmética y vermiculita.

Escoria con alto contenido de metal (escoria blanca): Desecho primario de la producción de aluminio, con alto contenido de aluminio, entre el 15-70%.

Escoria con bajo contenido de metal (escoria negra): Desecho secundario de la producción de aluminio, subproducto de la escoria blanca, tiene un bajo contenido de aluminio entre el 12-18% .

ANEXO 1 AGREGADO FINO



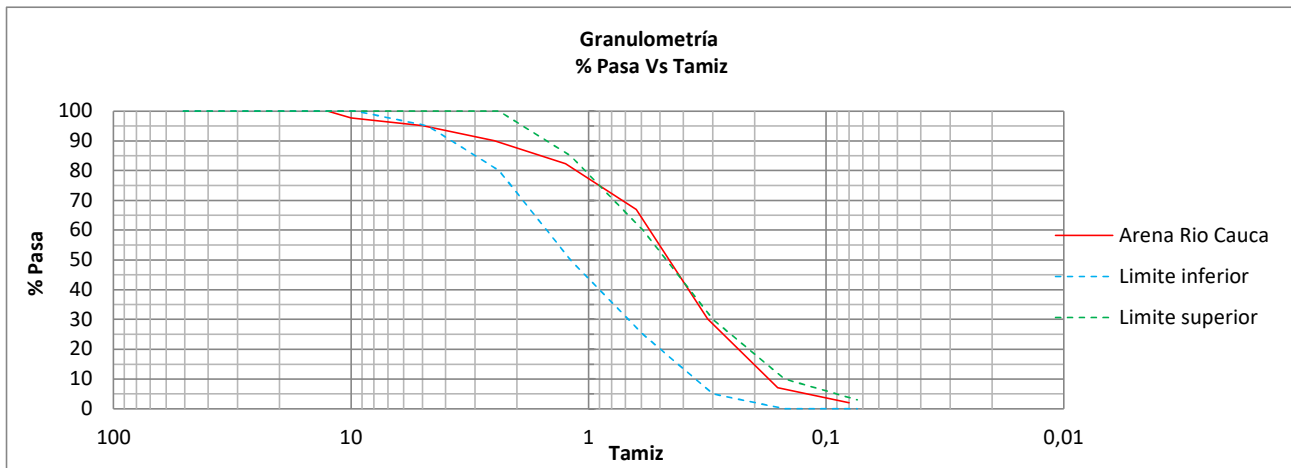
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS
NTC 77

PROYECTO _____	LOTE _____
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL _____ Arenas del Río Cauca	MUESTRA _____
CLASIFICACIÓN _____	FECHA _____
HOJA No. _____	DE _____

Peso Inicial seco antes de lavado	g	623,6
Peso seco después de lavado sobre malla 200	g	611,2

Tamiz	Diámetro mm	Peso Retenido g	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	MF
1/2"	12,5	0	0	0	100	2,305644644
3/8"	10	14,6	2	2	98	ok
#4	5	15,8	3	5	95	ok
#8	2,5	31,7	5	10	90	ok
#16	1,25	48,3	8	18	82	ok
#30	0,63	95,4	15	33	67	no
#50	0,315	229,3	37	70	30	ok
#100	0,16	144,3	23	93	7	ok
#200	0,08	31,4	5	98	2	ok
Fondo		12,8	2	100	0	ok

2.3 < MF < 3.1



OBSERVACIONES _____

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS
PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS
I.N.V. E - 222

PROYECTO	_____	LOTE	_____
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Arena de rio Cauca	MUESTRA	_____
CLASIFICACION	_____	FECHA	10/09/2021
		HOJA No.	DE

Ensayo No.		1	2	3
Picnómetro No.		E	F	D
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g	(S)	500	500	500
Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g	(C)	962,2	959,1	962,4
Temperatura de ensayo (°C)		28	28	28
Masa del picnómetro aforado lleno de agua, g	(B)	652,9	649,8	653,2
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g	(A)	487,5	487,3	487,5

CALCULOS				
Gravedad específica bulk,	Gsb	2,556	2,555	2,555
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca,	Gsb sss	2,622	2,622	2,621
Gravedad específica aparente,	Gsa	2,736	2,738	2,734
Absorción	%Abs	2,564	2,606	2,564
Densidad seca 997.5 A / (B+A-C)	Gsa	2728,851	2730,796	2727,321
Densidad aparente seca 997.5 A / (B+A-C)	Gsa	2615,364	2615,364	2613,994

$Gsb = A/(B+S-C)$
 $Gsb sss = S/(B+S-C)$
 $Gsa = A/(B+A-C)$
 $\%Absorción = (S-A)/A * 100$

OBSERVACIONES

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA Y LOS VACÍOS ENTRE PARTÍCULAS DE AGREGADOS
NTC 95

PROYECTO _____	LOTE _____
DESCRIPCION DEL MATERIAL _____	MUESTRA _____
CLASIFICACION _____	FECHA _____
	HOJA No. _____ DE _____

Calibracion de Recipiente

Ensayo No	1	2	3	
Masa de recipiente kg (A)				
Masa placa de vidrio kg (B)				
Masa recipiente + placa de vidrio + agua kg (C)				
Temperatura de agua				
Densidad Relativa del agua a temperatura de ensayo ρ_{H_2O} kg/m ³				Promedio
Volumen de Recipiente m ³ (V)				

$$V = ((C-A-B)/\rho_{H_2O})$$

AGREGADOS COMPACTADOS

Método de compactación				
Ensayo No.		1	2	3
Masa del agregado más la del recipiente de medida, kg (G)		6,494	6,504	6,524
Masa del recipiente de medida, kg (T)		1,8621	1,8621	1,8621
Volumen del recipiente de medida, m ³ (V)		0,00278	0,00278	0,00278
CALCULOS				
Densidad bulk del agregado, kg/m ³ (M)		1666,15	1669,75	1676,94

AGREGADOS SUELTOS

Ensayo No.		1	2	3
Masa del agregado más la del recipiente de medida, kg (G)		6,002	6,024	6,036
Masa del recipiente de medida, kg (T)		1,8621	1,8621	1,8621
Volumen del recipiente de medida, m ³ (V)		0,00278	0,00278	0,00278
CALCULOS				
Densidad bulk del agregado, kg/m ³ (M)		1489,17	1497,09	1501,40
Densidad bulk en condición SSS, kg/m ³ (M _{sss})		1527,56	1535,68	1540,11

$$M = (G-T)/V$$

PARA M_{sss} SE TOMA EL VALOR DEL % ABSORCION (A) SEGÚN LAS NORMAS INVE 222 (AGREGADOS FINOS) Y INVE 223 (AGREGADOSGRUESOS)

$$M_{sss} = m(1+(A/100))$$

OBSERVACIONES

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ

ANEXO 2 CEMENTO



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
ENSAYO FLUIDEZ
NTC 110

PROYECTO		LOTE	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento ART	MUESTRA	
CLASIFICACION	FECHA	HOJA No.	DE

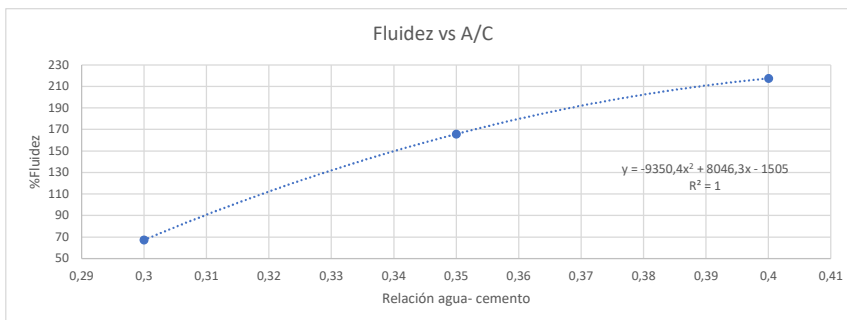
MUESTRA 1	
Agua (gr)	240
Cemento(gr)	600
a/c	0,4
Diametro de Pasta(cm)	Diametro de Pasta (mm)
32	320
32	320
33	330
32	320
promedio	322,5
%fluidéz	217

MUESTRA 2	
Agua (gr)	210
Cemento(gr)	600
a/c	0,35
Diametro de Pasta(cm)	Diametro de Pasta (mm)
27	270
27	270
27	270
27	270
promedio	270
%fluidéz	166

MUESTRA 3	
Agua (gr)	180
Cemento(gr)	600
a/c	0,3
Diametro de Pasta(cm)	Diametro de Pasta (mm)
17	170
17	170
17	170
17	170
promedio	170
%fluidéz	67

MUESTRA 4	
Agua (gr)	150
Cemento(gr)	600
a/c	0,25
Diametro de Pasta(cm)	Diametro de Pasta (mm)
4	40
3	30
2	20
3	30
promedio	30
%fluidéz	-70

Ensayo descartado



OBSERVACIONES

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ

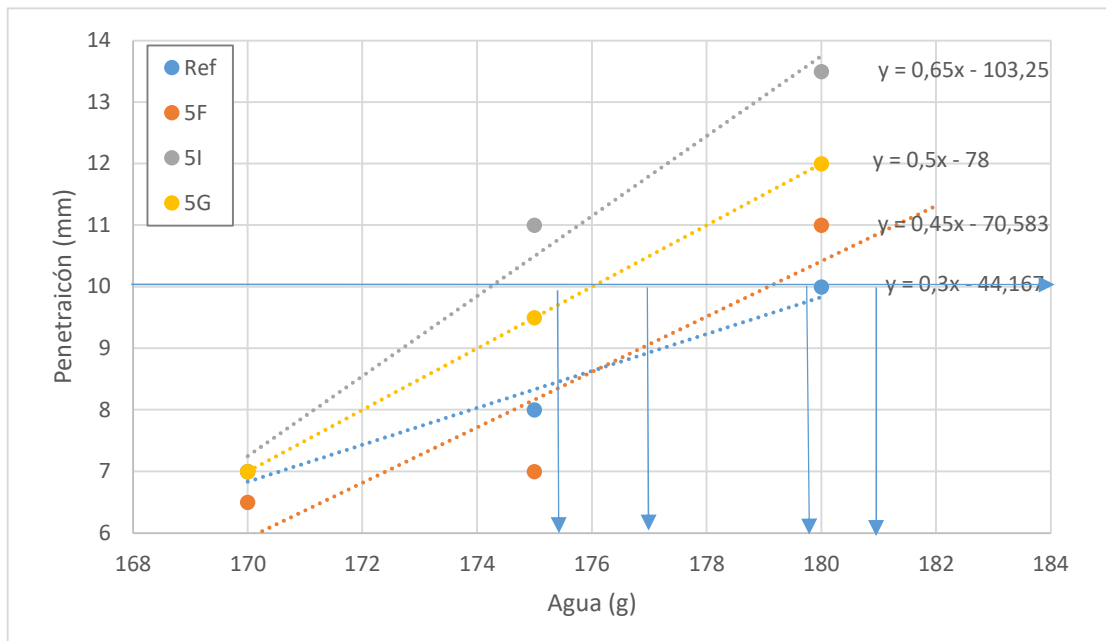


PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
 CONCISTENCIA NORMAL
 NTC 110

PROYECTO _____	LOTE _____
DESCRIPCION DEL MATERIAL _____	MUESTRA _____
CLASIFICACION _____	FECHA _____
	HOJA No. _____ DE _____

Penetración (mm)

Agua (g)	Ref	5F	5I	5G	Ecuación	ACN
170	7	6,5	7	7		
175	8	7	11	9,5		
180	10	11	13,5	12		



OBSERVACIONES

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
GRAVEDAD ESPECIFICA

PROYECTO	_____	LOTE	_____
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento ART	MUESTRA	_____
CLASIFICACION	_____	FECHA	_____
		HOJA No.	DE

Ensayo 1 Lechatelier 1	
masa cemento (gr)	64
lectura cm3 gasolina	0,3
lectura cm3 gasolina+ cemento	20,5
Gravedad especifica (gr/cm3)	2,822

Ensayo 2 Lechatelier 3	
masa cemento (gr)	64
lectura cm3 gasolina	0,4
lectura cm3 gasolina+ cemento	20,3
Gravedad especifica (gr/cm3)	2,753

Ensayo 3 Lechatelier 5	
masa cemento (gr)	64
lectura cm3 gasolina	0,2
lectura cm3 gasolina+ cemento	20,4
Gravedad especifica (gr/cm3)	2,937

promedio (gr/cm3)	2,880
--------------------------	--------------

OBSERVACIONES _____

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ

ANEXO 3 ESCORIA ALUMINO

Result Analysis Report

Sample Name:
Escoria de aluminio - Average

Sample Source & type:
Pontificia Universidad Javeriana-Cali

Sample bulk lot ref:
Código interno LGMC-270

SOP Name:
Alúmina

Measured by:
RUBY

Result Source:
Averaged

Measured:
viernes, 07 de octubre de 2022 11:21:43 a.m.

Analysed:
viernes, 07 de octubre de 2022 11:21:44 a.m.

Particle Name:
Alumina 0.01

Particle RI:
1.760

Dispersant Name:
Water

Accessory Name:
Hydro 2000MU (A)

Absorption:
0.1

Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Weighted Residual:
0.601 %

Sensitivity:
Normal

Obscuration:
18.34 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0466 %Vol

Specific Surface Area:
0.316 m²/g

Span :
5.715

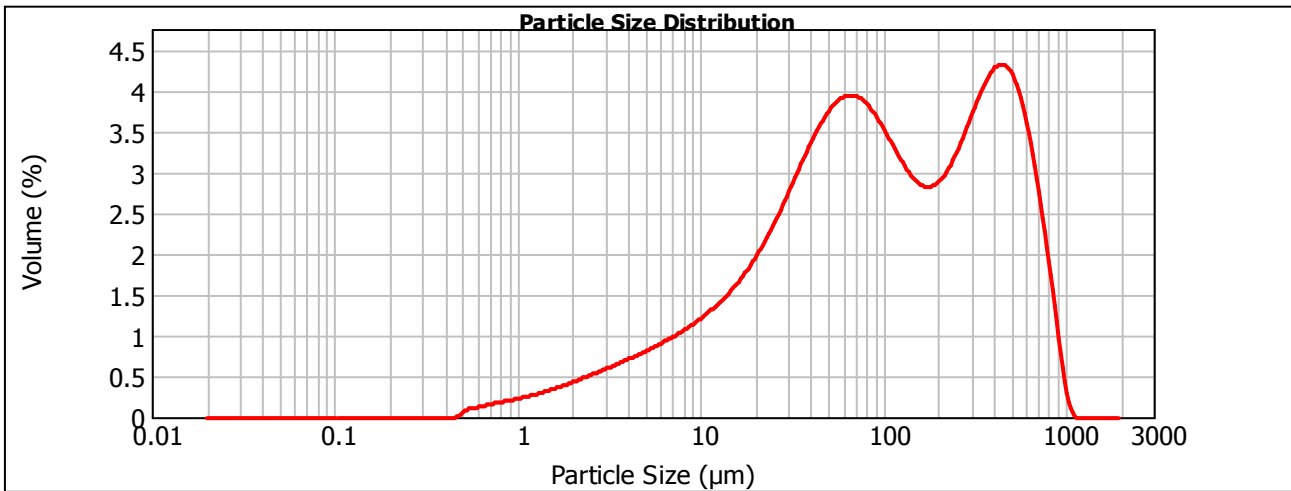
Surface Weighted Mean D[3,2]:
19.009 um

Uniformity:
1.71

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
194.277 um

Result units:
Volume

d(0.1): 9.537 um d(0.5): 92.432 um d(0.9): 537.795 um



— Escoria de aluminio - Average, viernes, 07 de octubre de 2022 11:21:43 a.m.

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.24	11.482	1.25	120.226	2.81	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.27	13.183	1.37	138.038	2.64	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.31	15.136	1.51	158.489	2.55	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.35	17.378	1.68	181.970	2.58	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.40	19.953	1.87	208.930	2.72	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.44	22.909	2.10	239.883	2.97	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.49	26.303	2.35	275.423	3.27	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.54	30.200	2.62	316.228	3.58	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.60	34.674	2.89	363.078	3.82	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.65	39.811	3.15	416.869	3.91	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.71	45.709	3.36	478.630	3.79	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.07	5.012	0.76	52.481	3.50	549.541	3.41	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.11	5.754	0.83	60.256	3.54	630.957	2.78	6066.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.13	6.607	0.89	69.183	3.42	724.436	1.97	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.16	7.586	0.97	79.433	3.24	831.764	1.06	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.18	8.710	1.05	91.201	3.02	954.993	0.21	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.21	10.000	1.14	104.713	3.02	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.24	11.482	1.25	120.226	2.81	1258.925	0.00		

Operator notes: 3 minutos de ultrasonido a 10 micras de desplazamiento.

Result Analysis Report

Sample Name:
Polvo escoria de aluminio EL - Average

SOP Name:
Alúmina

Measured by:
UNIVALLE-EIMAT-GMC

Measured:
lunes, 25 de abril de 2022 02:44:14 p.m.

Sample Source & type:
Pontificia Universidad Javeriana-Cali

Analysed:
lunes, 25 de abril de 2022 02:44:15 p.m.

Sample bulk lot ref:
Código interno LGMC-90

Result Source:
Averaged

Particle Name:
Alumina 0.01

Accessory Name:
Hydro 2000MU (A)

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Normal

Particle RI:
1.760

Absorption:
0.1

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Obscuration:
12.63 %

Dispersant Name:
Water

Dispersant RI:
1.330

Weighted Residual:
0.279 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0844 %Vol

Span :
3.337

Uniformity:
1.03

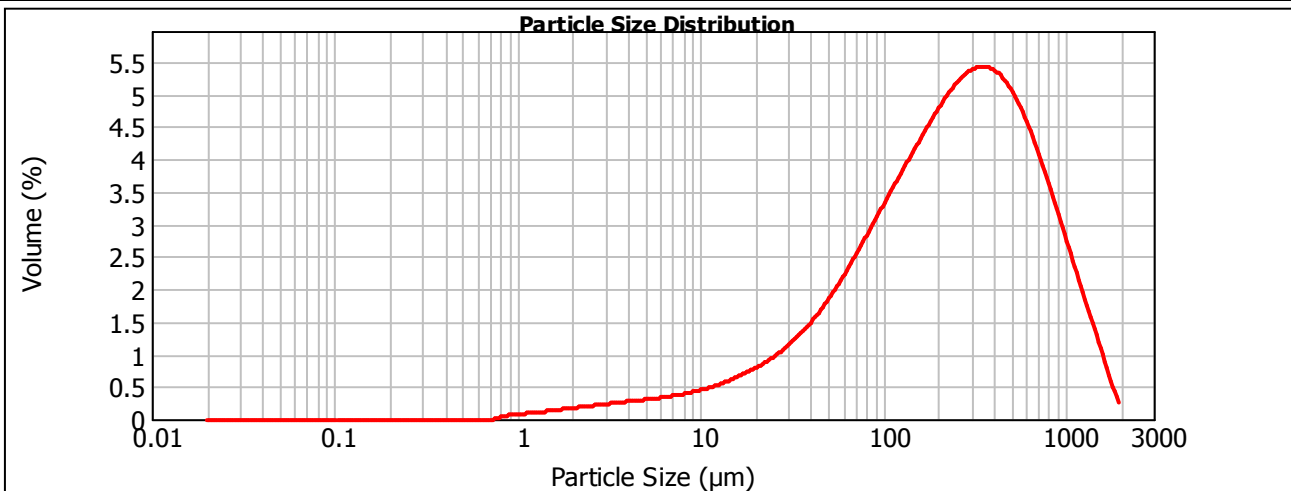
Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.121 m²/g

Surface Weighted Mean D[3,2]:
49.657 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
355.332 um

d(0.1): 34.228 um d(0.5): 243.105 um d(0.9): 845.402 um



— Polvo escoria de aluminio EL - Average, lunes, 25 de abril de 2022 02:44:14 p.m.

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.09	11.482	0.48	120.226	3.48	1258.925	1.46
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.10	13.183	0.53	138.038	3.75	1445.440	1.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.12	15.136	0.60	158.489	4.01	1659.587	0.50
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.14	17.378	0.67	181.970	4.27	1905.461	0.11
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.16	19.953	0.76	208.930	4.50	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.17	22.909	0.85	239.883	4.70	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.19	26.303	0.97	275.423	4.83	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.21	30.200	1.10	316.228	4.90	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.23	34.674	1.25	363.078	4.88	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.25	39.811	1.43	416.869	4.75	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.27	45.709	1.63	478.630	4.54	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.28	52.481	1.86	549.541	4.23	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.30	60.256	2.11	630.957	3.85	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.32	69.183	2.38	724.436	3.40	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.02	7.586	0.35	79.433	2.65	831.764	2.92	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.06	8.710	0.39	91.201	2.93	954.993	2.43	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.08	10.000	0.43	104.713	3.21	1096.478	1.94		
0.105	0.00	1.096	0.08	11.482		120.226		1258.925			

Operator notes:

Result Analysis Report

Sample Name:
Polvo escoria de aluminio EL - Average

SOP Name:
Alúmina

Measured by:
UNIVALLE-EIMAT-GMC

Measured:
lunes, 25 de abril de 2022 02:44:14 p.m.

Sample Source & type:
Pontificia Universidad Javeriana-Cali

Analysed:
lunes, 25 de abril de 2022 02:44:15 p.m.

Sample bulk lot ref:
Código interno LGMC-90

Result Source:
Averaged

Particle Name:
Alumina 0.01

Accessory Name:
Hydro 2000MU (A)

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Normal

Particle RI:
1.760

Absorption:
0.1

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Obscuration:
12.63 %

Dispersant Name:
Water

Dispersant RI:
1.330

Weighted Residual:
0.279 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0844 %Vol

Span :
3.337

Uniformity:
1.03

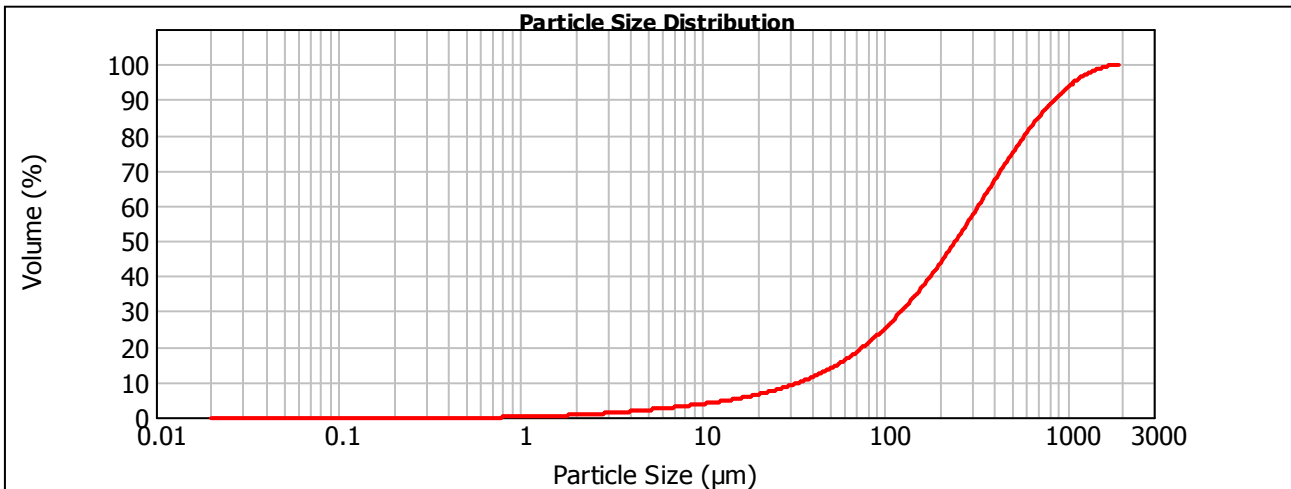
Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.121 m²/g

Surface Weighted Mean D[3,2]:
49.657 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
355.332 um

d(0.1): 34.228 um d(0.5): 243.105 um d(0.9): 845.402 um



— Polvo escoria de aluminio EL - Average, lunes, 25 de abril de 2022 02:44:14 p.m.

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.09	11.482	0.48	120.226	3.48	1258.925	1.46
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.10	13.183	0.53	138.038	3.75	1445.440	1.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.12	15.136	0.60	158.489	4.01	1659.587	0.50
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.14	17.378	0.67	181.970	4.27	1905.461	0.11
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.16	19.953	0.76	208.930	4.50	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.17	22.909	0.85	239.883	4.70	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.19	26.303	0.97	275.423	4.83	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.21	30.200	1.10	316.228	4.90	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.23	34.674	1.25	363.078	4.88	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.25	39.811	1.43	416.869	4.75	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.27	45.709	1.63	478.630	4.54	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.28	52.481	1.86	549.541	4.23	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.30	60.256	2.11	630.957	3.85	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.32	69.183	2.38	724.436	3.40	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.02	7.586	0.35	79.433	2.65	831.764	2.92	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.06	8.710	0.39	91.201	2.93	954.993	2.43	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.08	10.000	0.43	104.713	3.21	1096.478	1.94		
0.105	0.00	1.096	0.08	11.482		120.226		1258.925			

Operator notes:

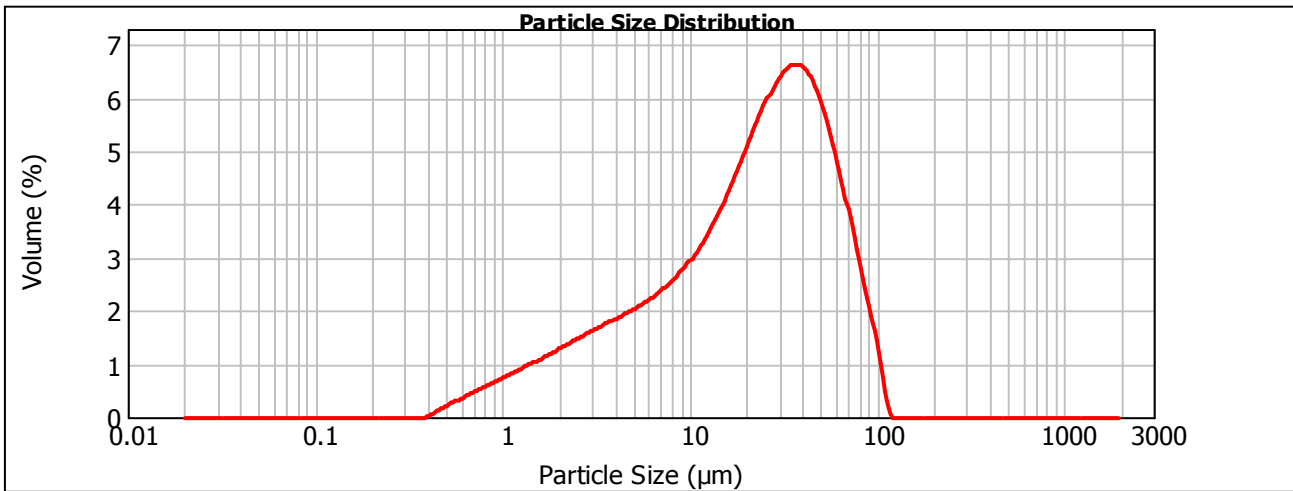
Result Analysis Report

Sample Name: Polvo escoria de aluminio EL-T1 - Average	SOP Name: Alúmina	Measured: lunes, 25 de abril de 2022 09:56:40 a.m.
Sample Source & type: Pontificia Universidad Javeriana-Cali	Measured by: UNIVALLE-EIMAT-GMC	Analysed: lunes, 25 de abril de 2022 09:56:42 a.m.
Sample bulk lot ref: Código interno LGMC-87	Result Source: Averaged	

Particle Name: Alumina 0.01	Accessory Name: Hydro 2000MU (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.760	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 15.61 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 0.661 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0146 %Vol	Span : 2.598	Uniformity: 0.809	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.829 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 7.240 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 28.251 um	

d(0.1): 2.803 um d(0.5): 22.912 um d(0.9): 62.330 um



— Polvo escoria de aluminio EL-T1 - Average, lunes, 25 de abril de 2022 09:56:40 a.m.

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.77	11.482	3.09	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.87	13.183	3.45	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.97	15.136	3.85	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.07	17.378	4.31	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.18	19.953	4.78	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.28	22.909	5.24	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	1.38	26.303	5.63	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	1.48	30.200	5.99	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	1.58	34.674	6.31	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	1.68	39.811	6.58	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.10	4.365	1.78	45.709	6.85	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.20	5.012	1.89	52.481	7.12	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.40	5.754	2.01	60.256	7.39	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.31	6.607	2.15	69.183	7.66	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.50	7.586	2.33	79.433	7.93	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.59	8.710	2.53	91.201	8.20	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.68	10.000	2.79	104.713	8.47	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.68	11.482	3.09	120.226	8.74	1258.925	0.00		

Operator notes: 1 minuto de ultrasonido a 10 micras de desplazamiento

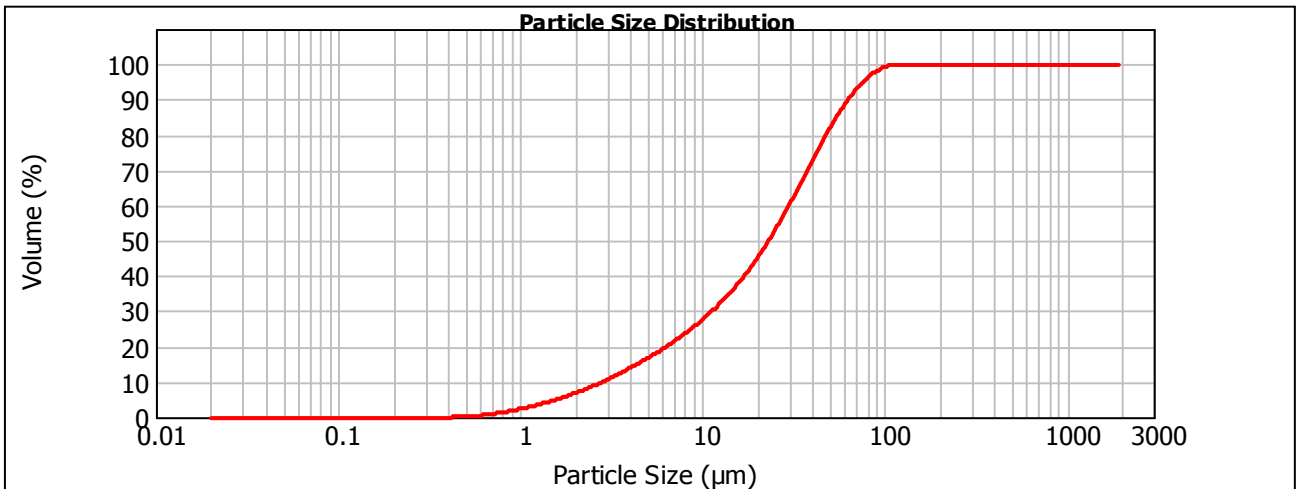
Result Analysis Report

Sample Name: Polvo escoria de aluminio EL-T1 - Average	SOP Name: Alúmina	Measured: lunes, 25 de abril de 2022 09:56:40 a.m.
Sample Source & type: Pontificia Universidad Javeriana-Cali	Measured by: UNIVALLE-EIMAT-GMC	Analysed: lunes, 25 de abril de 2022 09:56:42 a.m.
Sample bulk lot ref: Código interno LGMC-87	Result Source: Averaged	

Particle Name: Alumina 0.01	Accessory Name: Hydro 2000MU (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.760	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 15.61 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 0.661 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0146 %Vol	Span : 2.598	Uniformity: 0.809	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.829 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 7.240 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 28.251 um	

d(0.1): 2.803 um d(0.5): 22.912 um d(0.9): 62.330 um



— Polvo escoria de aluminio EL-T1 - Average, lunes, 25 de abril de 2022 09:56:40 a.m.

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.77	11.482	3.09	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.87	13.183	3.45	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.97	15.136	3.85	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.07	17.378	4.31	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.18	19.953	4.78	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.28	22.909	5.24	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	1.38	26.303	5.63	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	1.48	30.200	5.99	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	1.58	34.674	6.31	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	1.68	39.811	6.58	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.10	4.365	1.78	45.709	6.85	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.20	5.012	1.89	52.481	7.12	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.31	5.754	2.01	60.256	7.38	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.40	6.607	2.15	69.183	7.63	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.50	7.586	2.33	79.433	7.87	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.59	8.710	2.53	91.201	8.10	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.68	10.000	2.79	104.713	8.31	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.68	11.482	2.79	120.226	0.28	1258.925	0.00		

Operator notes: 1 minuto de ultrasonido a 10 micras de desplazamiento

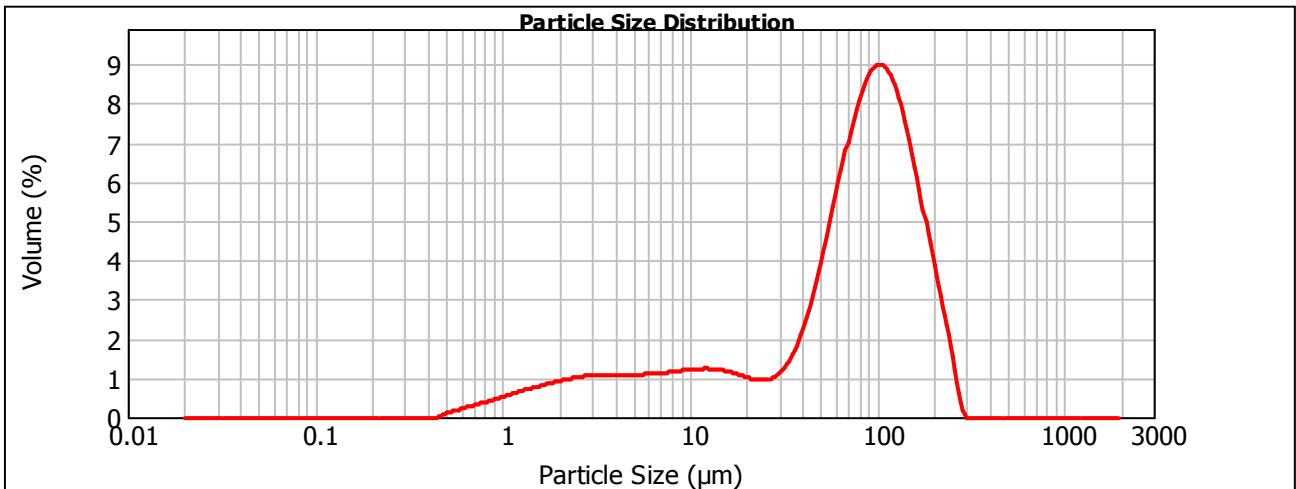
Result Analysis Report

Sample Name: Polvo escoria de aluminio EL-T2 - Average	SOP Name: Alúmina	Measured: lunes, 25 de abril de 2022 11:06:04 a.m.
Sample Source & type: Pontificia Universidad Javeriana-Cali	Measured by: UNIVALLE-EIMAT-GMC	Analysed: lunes, 25 de abril de 2022 11:06:05 a.m.
Sample bulk lot ref: Código interno LGMC-88	Result Source: Averaged	

Particle Name: Alumina 0.01	Accessory Name: Hydro 2000MU (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.760	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 13.86 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 0.782 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0209 %Vol	Span : 2.065	Uniformity: 0.624	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.5 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 12.000 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 84.513 um	

d(0.1): 4.365 um d(0.5): 80.022 um d(0.9): 169.576 um



— Polvo escoria de aluminio EL-T2 - Average, lunes, 25 de abril de 2022 11:06:04 a.m.

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.56	11.482	1.12	120.226	7.46	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.64	13.183	1.10	138.038	6.46	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.71	15.136	1.04	158.489	5.19	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.78	17.378	0.97	181.970	3.80	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.84	19.953	0.89	208.930	2.50	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.84	22.909	0.86	239.883	1.19	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.90	26.303	0.93	275.423	0.03	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.96	30.200	1.18	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.97	34.674	1.65	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.98	39.811	2.37	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.98	45.709	3.34	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.11	5.012	0.98	52.481	4.49	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.18	5.754	0.99	60.256	5.69	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.25	6.607	1.01	69.183	6.80	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.32	7.586	1.04	79.433	7.65	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.40	8.710	1.08	91.201	8.08	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.48	10.000	1.11	104.713	8.02	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.56	11.482	1.12	120.226	8.02	1258.925	0.00		

Operator notes: 4 minutos de ultrasonido a 10 micras de desplazamiento

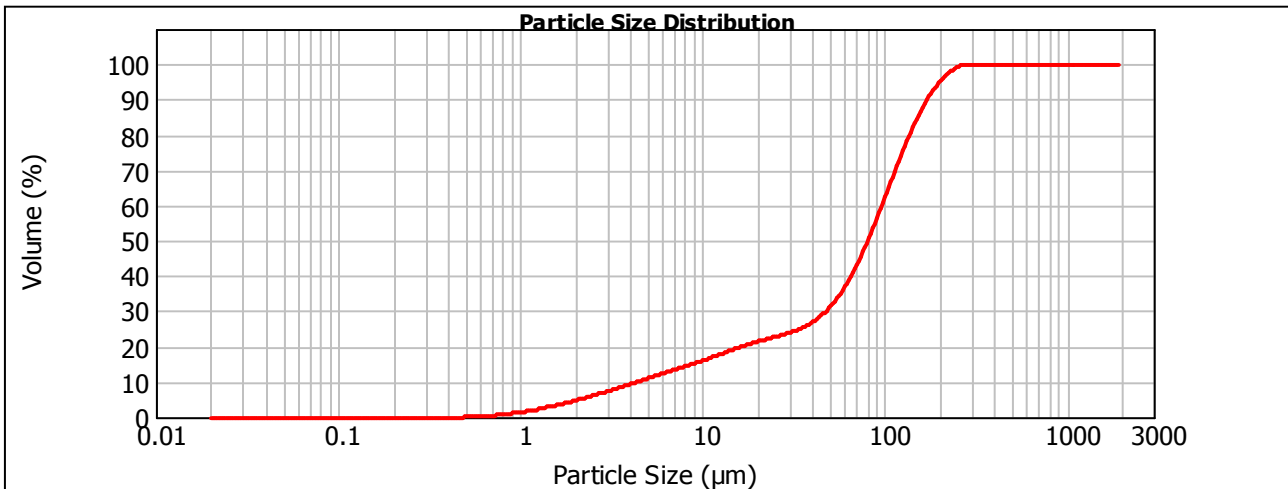
Result Analysis Report

Sample Name: Polvo escoria de aluminio EL-T2 - Average	SOP Name: Alúmina	Measured: lunes, 25 de abril de 2022 11:06:04 a.m.
Sample Source & type: Pontificia Universidad Javeriana-Cali	Measured by: UNIVALLE-EIMAT-GMC	Analysed: lunes, 25 de abril de 2022 11:06:05 a.m.
Sample bulk lot ref: Código interno LGMC-88	Result Source: Averaged	

Particle Name: Alumina 0.01	Accessory Name: Hydro 2000MU (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.760	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 13.86 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 0.782 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0209 %Vol	Span : 2.065	Uniformity: 0.624	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.5 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 12.000 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 84.513 um	

d(0.1): 4.365 um d(0.5): 80.022 um d(0.9): 169.576 um



— Polvo escoria de aluminio EL-T2 - Average, lunes, 25 de abril de 2022 11:06:04 a.m.

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.56	11.482	1.12	120.226	7.46	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.64	13.183	1.10	138.038	6.46	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.71	15.136	1.04	158.489	5.19	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.78	17.378	0.97	181.970	3.80	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.84	19.953	0.89	208.930	2.50	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.84	22.909	0.86	239.883	1.19	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.90	26.303	0.93	275.423	0.03	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.96	30.200	1.18	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.97	34.674	1.18	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.98	39.811	1.65	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.98	45.709	2.37	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.98	52.481	3.34	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.11	5.754	0.98	60.256	4.49	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.18	6.607	0.99	69.183	5.69	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.25	7.586	1.01	79.433	6.80	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.32	8.710	1.04	91.201	7.65	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.40	10.000	1.08	104.713	8.08	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.48	11.482	1.11	120.226	8.02	1258.925	0.00		

Operator notes: 4 minutos de ultrasonido a 10 micras de desplazamiento

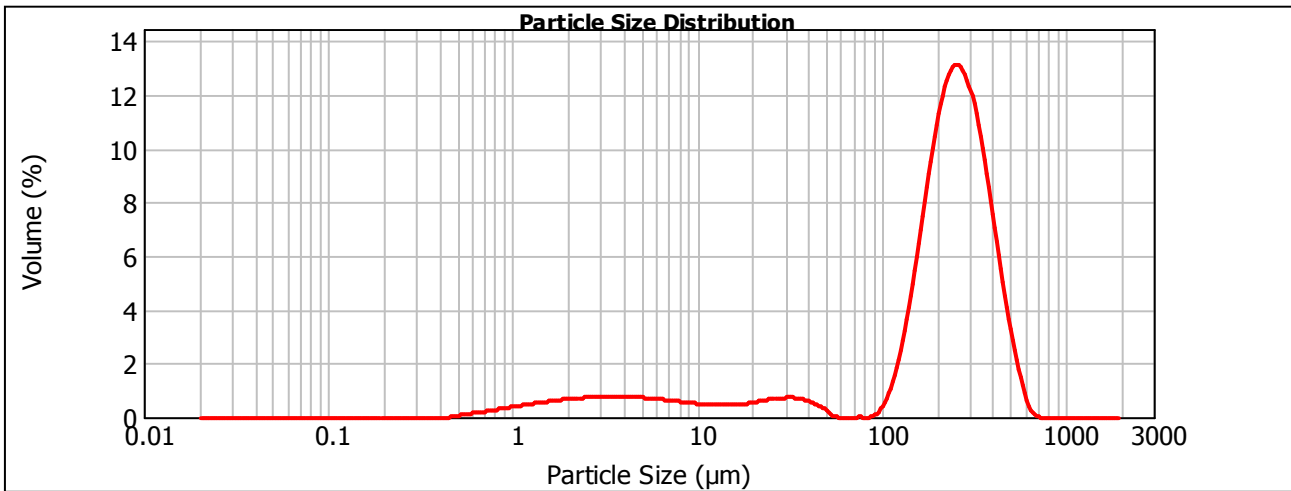
Result Analysis Report

Sample Name: Polvo escoria de aluminio EL-T3 - Average	SOP Name: Alúmina	Measured: lunes, 25 de abril de 2022 02:12:43 p.m.
Sample Source & type: Pontificia Universidad Javeriana-Cali	Measured by: UNIVALLE-EIMAT-GMC	Analysed: lunes, 25 de abril de 2022 02:12:44 p.m.
Sample bulk lot ref: Código interno LGMC-89	Result Source: Averaged	

Particle Name: Alumina 0.01	Accessory Name: Hydro 2000MU (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.760	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 18.94 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 0.771 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0441 %Vol	Span : 1.672	Uniformity: 0.448	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.329 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 18.216 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 231.962 um	

d(0.1): 8.254 um d(0.5): 234.895 um d(0.9): 401.108 um



— Polvo escoria de aluminio EL-T3 - Average, lunes, 25 de abril de 2022 02:12:43 p.m.

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.41	11.482	0.41	120.226	2.33	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.47	13.183	0.41	138.038	4.41	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.52	15.136	0.41	158.489	6.88	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.57	17.378	0.45	181.970	9.35	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.61	19.953	0.51	208.930	11.15	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.64	22.909	0.58	239.883	11.87	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.67	26.303	0.64	275.423	11.30	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.67	30.200	0.66	316.228	9.59	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.68	34.674	0.66	363.078	7.23	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.69	39.811	0.60	416.869	4.71	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.67	45.709	0.26	478.630	2.56	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.07	5.012	0.64	52.481	0.01	549.541	0.91	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.12	5.754	0.61	60.256	0.00	630.957	0.06	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.17	6.607	0.57	69.183	0.00	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.23	7.586	0.52	79.433	0.00	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.29	8.710	0.48	91.201	0.21	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.35	10.000	0.44	104.713	0.21	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.41	11.482	0.44	120.226	0.94	1258.925	0.00		

Operator notes: 5 minutos de ultrasonido a 10 mcra de desplazamiento

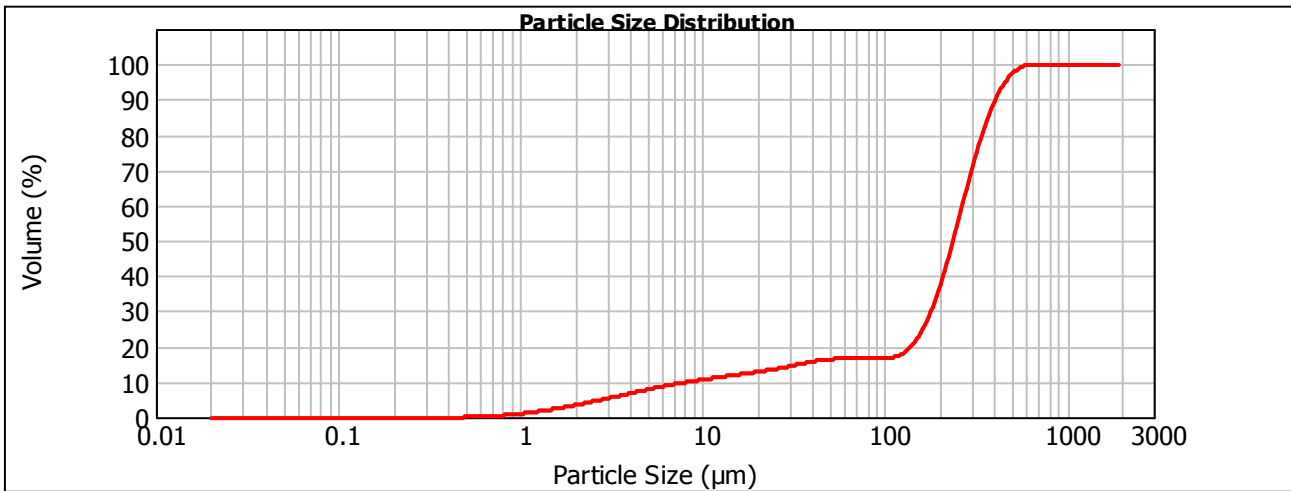
Result Analysis Report

Sample Name: Polvo escoria de aluminio EL-T3 - Average	SOP Name: Alúmina	Measured: lunes, 25 de abril de 2022 02:12:43 p.m.
Sample Source & type: Pontificia Universidad Javeriana-Cali	Measured by: UNIVALLE-EIMAT-GMC	Analysed: lunes, 25 de abril de 2022 02:12:44 p.m.
Sample bulk lot ref: Código interno LGMC-89	Result Source: Averaged	

Particle Name: Alumina 0.01	Accessory Name: Hydro 2000MU (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.760	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 18.94 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 0.771 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0441 %Vol	Span : 1.672	Uniformity: 0.448	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.329 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 18.216 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 231.962 um	

d(0.1): 8.254 um d(0.5): 234.895 um d(0.9): 401.108 um



— Polvo escoria de aluminio EL-T3 - Average, lunes, 25 de abril de 2022 02:12:43 p.m.

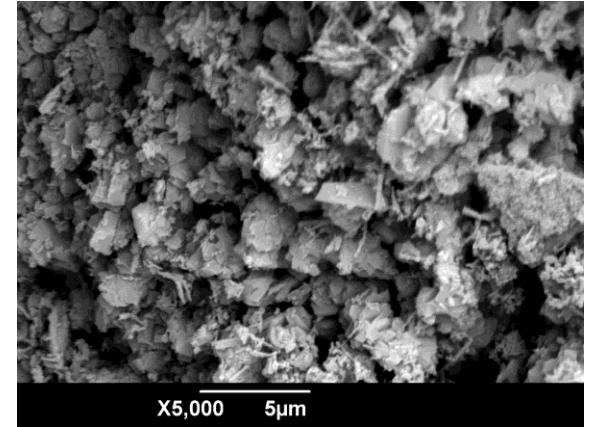
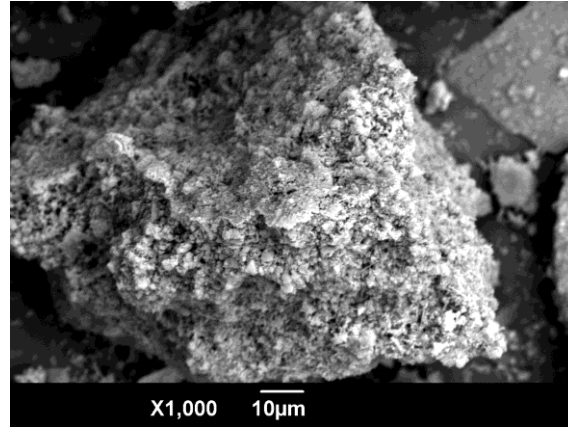
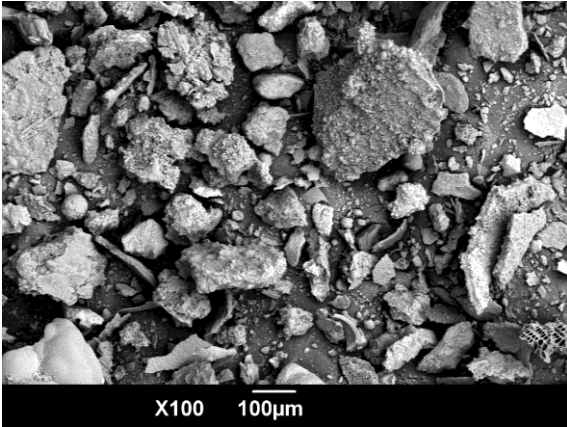
Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.41	11.482	0.41	120.226	2.33	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.47	13.183	0.41	138.038	4.41	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.52	15.136	0.41	158.489	6.88	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.57	17.378	0.45	181.970	9.35	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.61	19.953	0.51	208.930	11.15	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.64	22.909	0.58	239.883	11.87	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.67	26.303	0.64	275.423	11.30	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.68	30.200	0.66	316.228	9.59	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.69	34.674	0.60	363.078	7.23	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.68	39.811	0.47	416.869	4.71	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.67	45.709	0.26	478.630	2.56	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.07	5.012	0.64	52.481	0.01	549.541	0.91	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.12	5.754	0.57	60.256	0.00	630.957	0.06	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.17	6.607	0.52	69.183	0.00	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.23	7.586	0.48	79.433	0.00	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.29	8.710	0.44	91.201	0.21	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.35	10.000	0.44	104.713	0.21	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.35	11.482	0.44	120.226	0.94	1258.925	0.00		

Operator notes: 5 minutos de ultrasonido a 10 mcra de desplazamiento

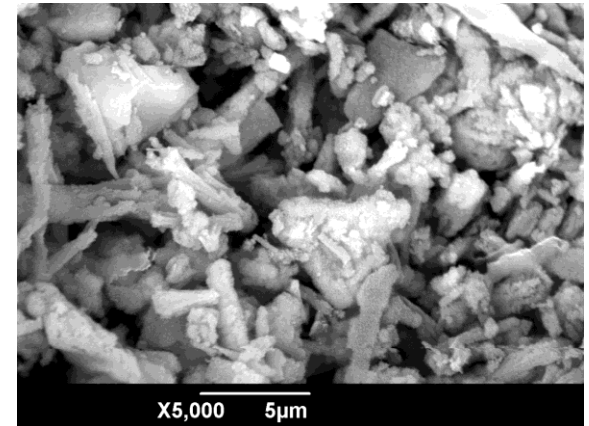
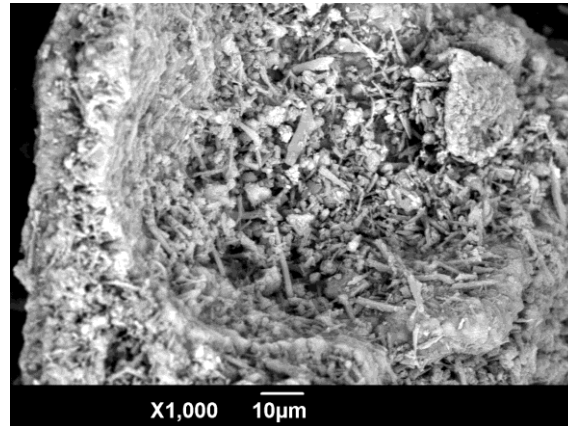
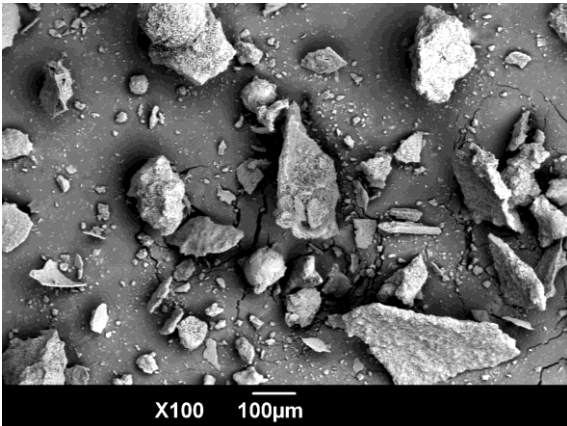
SEM-EDS UNIVALLE

9-Feb-2022

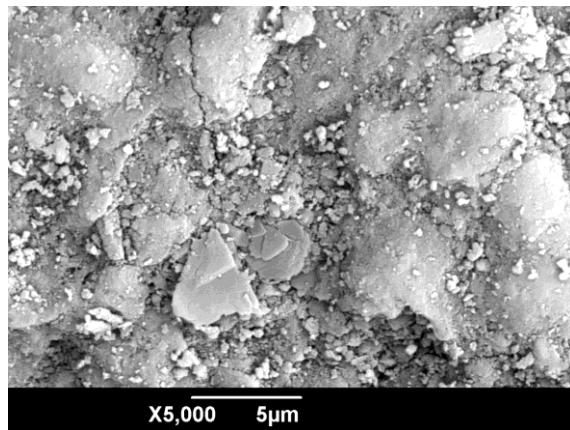
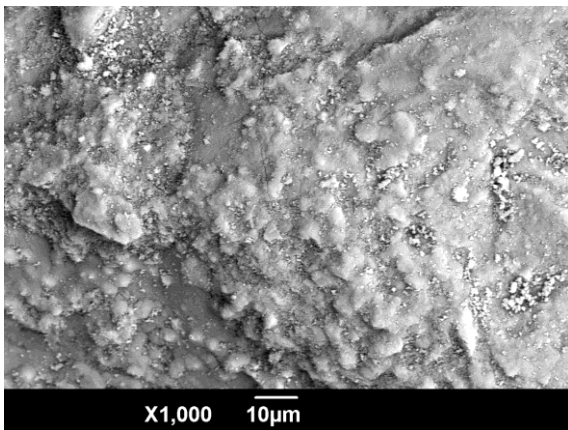
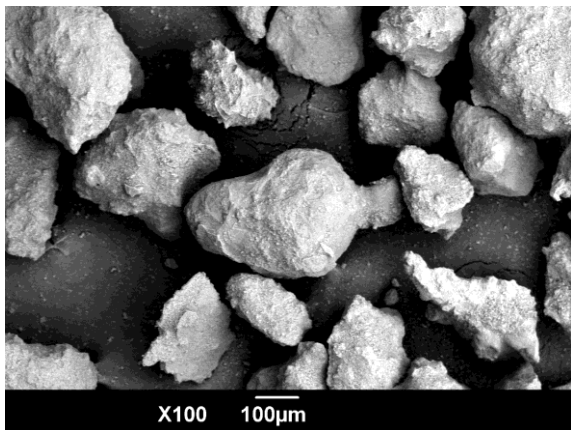
Escoria (E)



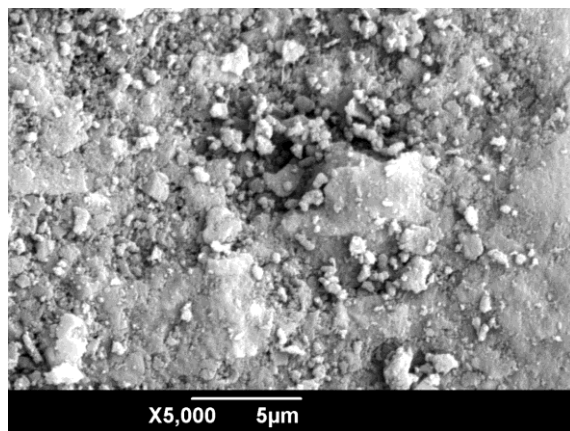
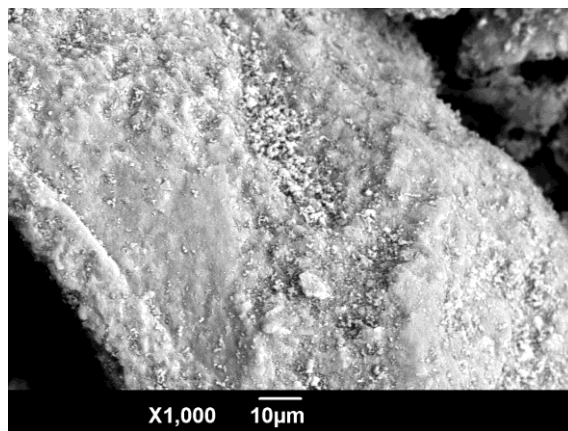
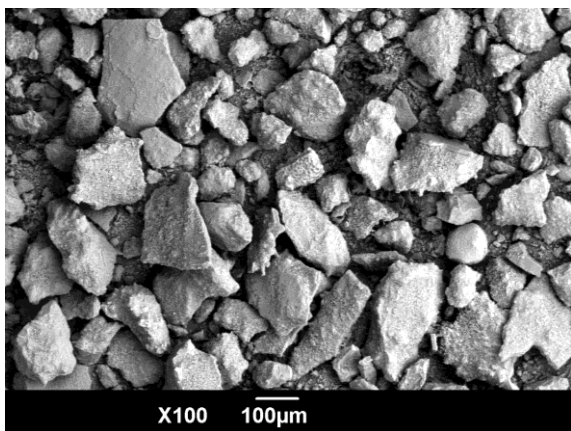
Escoria Lavada (EL)



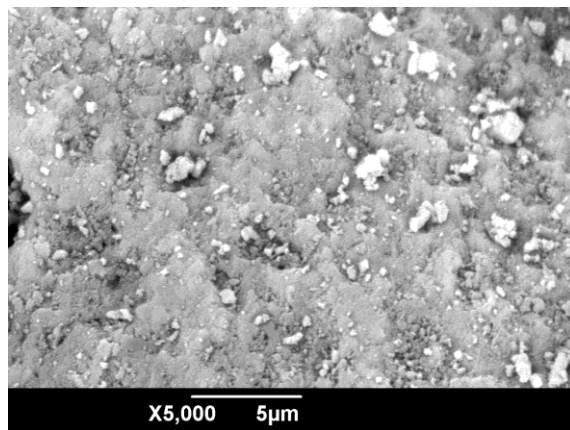
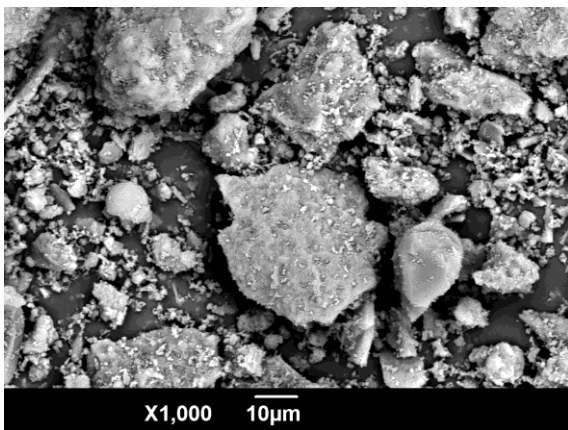
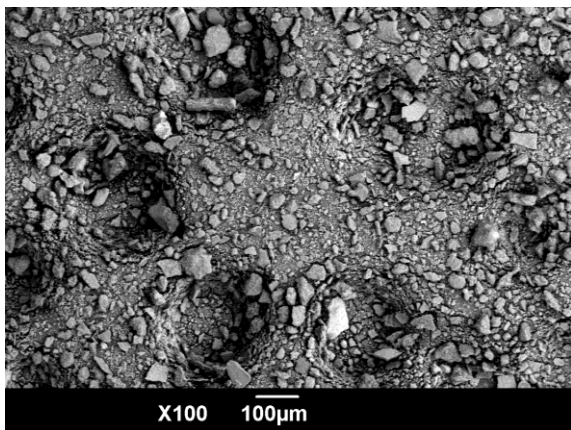
Escoria (EL-T3)



Escoria (EL-T2)



Escoria (EL-T1)



SEM-EDS UNIVALLE
9-Feb-2022

Muestra/Elementos	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe
	% en peso									
E	38.63	0.00	11.24	38.72	3.51	5.51	0.00	1.08	1.31	0.00
EL	46.92	1.57	2.37	30.86	7.03	0.88	0.00	1.95	0.71	7.70
ELT3	44.67	1.19	2.44	35.81	6.07	0.80	1.73	2.41	0.00	4.88
ELT2	44.83	1.59	4.12	42.06	1.62	0.98	1.94	1.35	0.00	1.51
ELT1	46.43	0.89	3.46	40.10	2.74	1.02	0.43	3.42	0.00	1.50

ANEXO 4 DISEÑO MEZCLA



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
DISEÑO DE MEZCLA

PROYECTO	_____	LOTE	_____
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento ART	MUESTRA	REFERENCIA _____
CLASIFICACION	_____	FECHA	17/02/2022 HOJA No. _____ DE _____

1. Datos de caracterización de los materiales

Cemento Argos		Ag. Fino - Río Cauca	
Gc	2,88	MF	2,31
MUSc	-	TMN	No 4
		Gsb sss	2,681944
		%Abs	2,56
		% Hum	
		MUS	1,606
		MUC	1,865

Datos a ingresar

Datos calculados (No modificar)

2. Dosificación del Concreto

	Agua	Cemento	Ag. Fino
Masas SSS (kg/m3)	340	550	1255
Tecnológica	0,618	1,000	2,282
Volumen (l/m3)	340,00	190,97	467,94
Masa SSS (kg)	1,496	2,420	5,522

3. Determinación de la humedad de los agregados

Humedad de Ag Fino	
Recipiente	0,00 g
Arhum+recip	108,50 g
Arseca+recip	100,00 g
Hum Tot Ar	8,50 %
Abs Ar	2,56 %

4. Dosificación Ajustada para 22 litros

	Agua	Cemento	Ag. Fino
Masa Húm 22 l (kg)	1,176	2,420	5,842

Parametros iniciales	Unidad	Valor
Resistencia a la compresion	kg/cm2	280
Modulo de Finura arena		2,31
Densidad SSS arena	g/cm3	2,68
Densidad especifico cemento	g/cm3	2,88
Consistencia Plastica	%	110

Parametros arena	Unidad	Valor
Densidad SSS arena	g/cm3	2,68
Tamaño maximo nominal	Tamiz	No 4
Absorcion	%	2,56
Humedad natural	%	8,5
Modulo de Finura arena		2,31

4,4 Litros

OBSERVACIONES

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
DISEÑO DE MEZCLA

PROYECTO	_____	LOTE	_____
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento ART	MUESTRA	5% SUSTITUCION
CLASIFICACION	_____	FECHA	18/02/2022 HOJA No. _____ DE _____

1. Datos de caracterización de los materiales

Cemento Argos		Ag. Fino - Río Cauca	
Gc	2,88	MF	2,31
MUSc	-	TMN	No 4
		Gsb sss	2,681944
		%Abs	2,56
		% Hum	
		MUS	1,606
		MUC	1,865

Datos a ingresar

Datos calculados (No modificar)

Parametros iniciales	Unidad	Valor
Resistencia a la compresion	kg/cm2	280
Modulo de Finura arena		2,31
Densidad SSS arena	g/cm3	2,68
Densidad especifico cemento	g/cm3	2,88
Consistencia Plastica	%	110

Parametros arena	Unidad	Valor
Densidad SSS arena	g/cm3	2,68
Tamaño maximo nominal	Tamiz No 4	
Absorcion	%	2,56
Humedad natural	%	8,5
Modulo de Finura arena		2,31

2. Dosificación del Concreto

	Agua	Cemento	Ag. Fino
Masas SSS (kg/m3)	340	550	1255
Tecnológica	0,618	1,000	2,282
Volumen (l/m3)	340,00	190,97	467,94
Masa SSS (kg)	1,496	2,420	5,522

4,4 Litros

3. Determinación de la humedad de los agregados

Humedad de Ag Fino	
Recipiente	0,00 g
Arhum+recip	108,50 g
Arseca+recip	100,00 g
Hum Tot Ar	8,50 %
Abs Ar	2,56 %

4. Dosificación Ajustada para 22 litros

	Agua	Cemento	Ag. Fino	% sustitucion	escoria aluminio	
base	Masa Húm 22 l (kg)	1,176	2,420	5,842	5,00%	0,121
sustitucion	Masa Húm 22 l (kg)	1,176	2,299	5,842	5,00%	0,121

realizar

OBSERVACIONES

ESTE DISEÑO DE MEZCLA APLICA PARA LOS TRES TAMAÑOS

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
DISEÑO DE MEZCLA

PROYECTO	_____	LOTE	_____
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento ART	MUESTRA	10% SUSTITUCION
CLASIFICACION	_____	FECHA	4/03/2022
		HOJA No.	DE

1. Datos de caracterización de los materiales

Cemento Argos		Ag. Fino - Río Cauca	
Gc	2,88	MF	2,31
MUSc	-	TMN	No 4
		Gsb sss	2,681944
		%Abs	2,56
		% Hum	
		MUS	1,606
		MUC	1,865

Datos a ingresar

Datos calculados (No modificar)

Parametros iniciales	Unidad	Valor
Resistencia a la compresion	kg/cm2	280
Modulo de Finura arena		2,31
Densidad SSS arena	g/cm3	2,68
Densidad especifico cement	g/cm3	2,88
Consistencia Plastica	%	110

Parametros arena	Unidad	Valor
Densidad SSS arena	g/cm3	2,68
Tamaño maximo nominal	Tamiz	No 4
Absorcion	%	2,56
Humedad natural	%	8,5
Modulo de Finura arena		2,31

2. Dosificación del Concreto

	Agua	Cemento	Ag. Fino
Masas SSS (kg/m3)	340	550	1255
Tecnológica	0,618	1,000	2,282
Volumen (l/m3)	340,00	190,97	467,94
Masa SSS (kg)	1,496	2,420	5,522

4,4 Litros

3. Determinación de la humedad de los agregados

Humedad de Ag Fino	
Recipiente	0,00 g
Arhum+recip	108,50 g
Arseca+recip	100,00 g
Hum Tot Ar	8,50 %
Abs Ar	2,56 %

4. Dosificación Ajustada para 22 litros

		Agua	Cemento	Ag. Fino	% sustitucion	escoria aluminio
base	Masa Húm 22 l (kg)	1,176	2,420	5,842	10,00%	0,242
sustitucion	Masa Húm 22 l (kg)	1,176	2,178	5,842	10,00%	0,242

diseño

OBSERVACIONES

ESTE DISEÑO DE MEZCLA APLICA PARA LOS TRES TAMAÑOS

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
DISEÑO DE MEZCLA

PROYECTO	_____	LOTE	_____
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento ART	MUESTRA	20% SUSTITUCION
CLASIFICACION	_____	FECHA	16/03/2022 HOJA No. _____ DE _____

1. Datos de caracterización de los materiales

Cemento Argos		Ag. Fino - Río Cauca	
Gc	2,88	MF	2,31
MUSc	-	TMN	No 4
		Gsb sss	2,681944
		%Abs	2,56
		% Hum	
		MUS	1,606
		MUC	1,865

Datos a ingresar

Datos calculados (No modificar)

2. Dosificación del Concreto

	Agua	Cemento	Ag. Fino
Masas SSS (kg/m3)	340	550	1255
Tecnológica	0,618	1,000	2,282
Volumen (l/m3)	340,00	190,97	467,94
Masa SSS (kg)	1,496	2,420	5,522

4,4 Litros

3. Determinación de la humedad de los agregados

Humedad de Ag Fino	
Recipiente	0,00 g
Arhum+recip	108,50 g
Arseca+recip	100,00 g
Hum Tot Ar	8,50 %
Abs Ar	2,56 %

4. Dosificación Ajustada para 22 litros

		Agua	Cemento	Ag. Fino	% sustitucion	escoria aluminio
base	Masa Húm 22 l (kg)	1,176	2,420	5,842	20,00%	0,484
sustitucion	Masa Húm 22 l (kg)	1,176	1,936	5,842	20,00%	0,484

diseño

OBSERVACIONES

ESTE DISEÑO DE MEZCLA APLICA PARA LOS TRES TAMAÑOS

 EJECUTÓ

 CALCULÓ-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
DISEÑO DE MEZCLA

PROYECTO _____	LOTE _____
DESCRIPCION DEL MATERIAL _____	Cemento ART _____ MUESTRA 20% SUSTITUCION _____
CLASIFICACION _____	FECHA 24/03/2022 HOJA No. _____ DE _____

1. Datos de caracterización de los materiales

Cemento Argos		Ag. Fino - Río Cauca	
Gc	2,88	MF	2,31
MUSc	-	TMN	No 4
		Gsb sss	2,681944
		%Abs	2,56
		% Hum	
		MUS	1,606
		MUC	1,865

Parametros iniciales	Unidad	Valor
Resistencia a la com	kg/cm2	280
Modulo de Finura arena		2,31
Densidad SSS arena	g/cm3	2,68
Densidad especifico	g/cm3	2,88
Consistencia Plastic:	%	110

Datos a ingresar

Datos calculados (No modificar)

Parametros arena	Unidad	Valor
Densidad SSS arena	g/cm3	2,68
Tamaño maximo no Tamiz	No 4	
Absorcion	%	2,56
Humedad natural	%	8,5
Modulo de Finura arena		2,31

2. Dosificación del Concreto

	Agua	Cemento	Ag. Fino
Masas SSS (kg/m3)	340	550	1255
Tecnológica	0,618	1,000	2,282
Volumen (l/m3)	340,00	190,97	467,94
Masa SSS (kg)	1,496	2,420	5,522

4,4 Litros

3. Determinación de la humedad de los agregados

Humedad de Ag Fino	
Recipiente	115,00 g
Arhum+recip	499,00 g
Arseca+recip	464,50 g
Hum Tot Ar	9,87 %
Abs Ar	2,56 %

4. Dosificación Ajustada para 22 litros

	Agua	Cemento	Ag. Fino	% sustitucion	escoria aluminio
base	1,102	2,420	5,916	20,00%	0,484
sustitucion	1,102	1,936	5,916	20,00%	0,484

diseño

OBSERVACIONES _____
 ESTE DISEÑO DE MEZCLA APLICA PARA LOS TRES TAMAÑOS

 EJECUTÓ

 CALCULÓ-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
DISEÑO DE MEZCLA

PROYECTO _____	LOTE _____
DESCRIPCION DEL MATERIAL _____	MUESTRA _____
CLASIFICACION _____	FECHA 25/03/2022 HOJA No. _____ DE _____

1. Datos de caracterización de los materiales

Cemento Argos		Ag. Fino - Río Cauca	
Gc	2,88	MF	2,31
MUSc	-	TMN	No 4
		Gsb sss	2,681944
		%Abs	2,56
		% Hum	
		MUS	1,606
		MUC	1,865

Parametros iniciales	Unidad	Valor
Resistencia a la comp	kg/cm ²	280
Modulo de Finura arena		2,31
Densidad SSS arena	g/cm ³	2,68
Densidad especifico	g/cm ³	2,88
Consistencia Plastic	%	110

Datos a ingresar

Datos calculados (No modificar)

Parametros arena	Unidad	Valor
Densidad SSS arena	g/cm ³	2,68
Tamaño maximo no Tamiz	No 4	
Absorcion	%	2,56
Humedad natural	%	8,5
Modulo de Finura arena		2,31

2. Dosificación del Concreto

	Agua	Cemento	Ag. Fino
Masas SSS (kg/m ³)	340	550	1255
Tecnológica	0,618	1,000	2,282
Volumen (l/m ³)	340,00	190,97	467,94
Masa SSS (kg)	1,496	2,420	5,522

4,4 Litros

3. Determinación de la humedad de los agregados

Humedad de Ag Fino	
Recipiente	0,00 g
Arhum+recip	722,90 g
Arseca+recip	663,40 g
Hum Tot Ar	8,97 %
Abs Ar	2,56 %

4. Dosificación Ajustada para 22 litros

	Agua	Cemento	Ag. Fino	% sustitucion	escoria aluminio
base	1,151	2,420	5,867	20,00%	0,484
sustitucion	1,151	1,936	5,867	20,00%	0,484

diseño

OBSERVACIONES

ESTE DISEÑO DE MEZCLA APLICA PARA LOS TRES TAMAÑOS

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ

ANEXO 5 MORTEROS



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
ENSAYO A COMPRESION

PROYECTO _____	LOTE _____
DESCRIPCION DEL MATERIAL _____ Cemento ART	MUESTRA _____ 5 % SUSTITUCION
CLASIFICACION _____	FECHA _____ HOJA No. _____ DE _____

MORTERO	MUESTRA	BASE	ANCHO	ALTO	MASA	7 DIAS		28 DIAS		56 DIAS	
		mm	mm	mm	g	KN	MPA	KN	MPA	KN	MPA
RE	1	50,65	50,45	50,09	271,8	74,113	29,21				
	2	50,2	49,41	50,68	273,4			96,281	38,817		
	3	50,27	49,97	49,59	273,8					107,66	43,4466
	4	50,35	50,8	49,9	275,9	82,722	32,925				
	5	50,14	49,87	50,77	273,8			100,345	40,13		
	6	50	50,25	49,42	274,2					111,798	45,019
	7	50,35	50,7	49,85	270,4	79,212	31,599				
	8	50,25	49,87	50,69	272,7			96,207	38,391		
	9	49,95	50,3	49,35	273,9					112,943	45,499
MAX		50,65	50,80	50,77	275,90	82,72	32,93	100,35	40,13	112,94	45,50
MIN		49,95	49,41	49,35	270,40	74,11	29,21	96,21	38,39	107,66	43,45
PROMEDIO		50,24	50,18	50,04	273,32	78,68	31,24	97,61	39,11	110,80	44,65
DESV ESTANDAR		0,20814658	0,44387498	0,55746699	1,55946928	4,32887172	1,88267638	2,36800253	0,90641841	2,77921326	1,07356008
5%G	1	50,08	52,87	50,97	276,6	56,158	22,000				
	2	50,15	52,46	50,67	275,7			66,244	25,179		
	3	49,98	52,27	50,33	278					85,123	32,357
	4	50,22	52,23	50,25	274,3	50,727	20,101				
	5	50,18	52,03	50,14	275,6			68,35	26,179		
	6	49,95	52,03	50,03	274,4					81,392	31,268
	7	50,23	50,66	51,28	270,6	55,049	21,372				
	8	50,19	52,09	50,4	276,3			73,744	28,207		
	9	49,94	52,45	50,22	277,7					83,904	31,854
MAX		50,23	52,87	51,28	278,00	56,16	22,00	73,74	28,21	85,12	32,36
MIN		49,94	50,66	50,03	270,60	50,73	20,10	66,24	25,18	81,39	31,27
PROMEDIO		50,1022222	52,12	50,48	275,47	53,98	21,16	69,45	26,52	83,47	31,83
DESV ESTANDAR		0,1178747	0,61	0,42	2,23	2,87	0,97	3,87	1,54	1,90	0,55
5%I	1	50,09	50,37	50,8	271,2	65,985	26,153				
	2	50,23	50,15	50,74	270,6			83,387	33,103		
	3	50,19	50,38	50,61	271					90,074	35,622
	4	50,06	50,42	50,17	270,2	65,579	25,982				
	5	50,04	50,42	50,27	271,2			78,658	31,176		
	6	50,15	50,42	50,54	270,5					91,736	36,28
	7	50,43	50,39	50,63	271,3	65,653	25,836				
	8	50,71	50,22	50,08	273,5			69,163	27,158		
	9	50,12	50,32	50,53	272,5					91,773	36,389
MAX		50,71	50,42	50,80	273,50	65,99	26,15	83,39	33,10	91,77	36,39
MIN		50,04	50,15	50,08	270,20	65,58	25,84	69,16	27,16	90,07	35,62
PROMEDIO		50,2244444	50,34	50,49	271,33	65,74	25,99	77,07	30,48	91,19	36,10
DESV ESTANDAR		0,21645502	0,10	0,25	1,04	0,22	0,16	7,24	3,03	0,97	0,41
5%F	1	49,18	49,29	49,66	271,6	75,665	31,214				
	2	50,26	50,12	50,3	272			89,039	35,22		
	3	50,11	49,56	50,39	271,1					93,768	37,757
	4	49,1	48,64	49,57	269,9	47,372	30,557				
	5	50,26	50,44	50,63	270,6			89,446	35,319		
	6	50,22	50,05	50,38	271,5					99,569	39,613
	7	49,21	48,51	49,84	270,9	75,148	30,640				
	8	50,01	50,88	50,67	262,5			88,596	34,988		
	9	50,19	50,21	50,44	274					99,236	39,379
MAX		50,26	50,88	50,67	274,00	75,67	31,21	89,45	35,32	99,57	39,61
MIN		49,1	48,51	49,57	262,50	47,37	30,56	88,60	34,99	93,77	37,76
PROMEDIO		49,8377778	49,74	50,21	270,46	66,06	30,80	89,03	35,18	97,52	38,92
DESV ESTANDAR		0,51253726	0,81	0,41	3,19	16,19	0,36	0,43	0,17	3,26	1,01

OBSERVACIONES

EJECUTO

CALCULO-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
ENSAYO A COMPRESION

PROYECTO _____	LOTE _____
DESCRIPCION DEL MATERIAL _____ Cemento ART	MUESTRA _____ 10% SUSTITUCION
CLASIFICACION _____	FECHA _____ HOJA No. _____ DE _____

MORTERO	MUESTRA	BASE	ANCHO	ALTO	MASA	7 DIAS		28 DIAS		56 DIAS	
		mm	mm	mm	g	KN	MPA	KN	MPA	KN	MPA
RE	1	50,65	50,45	50,09	271,8	74,113	29,21				
	2	50,2	49,41	50,68	273,4			96,281	38,817		
	3	50,27	49,97	49,59	273,8					107,66	43,4466
	4	50,35	50,8	49,9	275,9	82,722	32,925				
	5	50,14	49,87	50,77	273,8			100,345	40,13		
	6	50	50,25	49,42	274,2					111,798	45,019
	7	50,35	50,7	49,85	270,4	79,212	31,599				
	8	50,25	49,87	50,69	272,7			96,207	38,391		
	9	49,95	50,3	49,35	273,9					112,943	45,499
MAX		50,65	50,80	50,77	275,90	82,72	32,93	100,35	40,13	112,94	45,50
MIN		49,95	49,41	49,35	270,40	74,11	29,21	96,21	38,39	107,66	43,45
PROMEDIO		50,24	50,18	50,04	273,32	78,68	31,24	97,61	39,11	110,80	44,65
DESV ESTANDAR		0,20814658	0,44387498	0,55746699	1,55946928	4,32887172	1,88267638	2,36800253	0,90641841	2,77921326	1,07356008
10%G	1	50,86	50,98	51,81	277,76	49,951	18,956				
	2	50,25	52,1	50,22	267,9			63,325	24,188		
	3	50,24	52,41	50,06	271					71,749	27,249
	4	50,97	51,01	52,43	267,9	54,052	20,226				
	5	50,17	51,91	50,62	271,3			61,7	23,691		
	6	50,57	51,94	50,21	273,1					73,781	28,09
	7	50,79	50,85	52,27	267,7	55,899	21,056				
	8	50,18	52,17	50,37	269,7			66,244	25,309		
	9	50,54	52,02	50,12	271,3					67,131	25,534
MAX		50,97	52,41	52,43	277,76	55,90	21,06	66,24	25,31	73,78	28,09
MIN		50,17	50,85	50,06	267,70	49,95	18,96	61,70	23,69	67,13	25,53
PROMEDIO		50,5077778	51,71	50,90	270,85	53,30	20,08	63,76	24,40	70,89	26,96
DESV ESTANDAR		0,31264108	0,59	0,98	3,20	3,04	1,06	2,30	0,83	3,41	1,30
10%I	1	50,58	50,77	51,3	265,7	46,478	18,099				
	2	50,54	51,1	50,07	268,3			57,709	22,346		
	3	50,72	50,55	50,18	267,9					67,241	26,226
	4	50,3	50,48	51,25	269,2	51,576	20,312				
	5	50,17	51,24	50,54	269			60,961	23,714		
	6	50,17	50,31	50,3	270,8					69,273	27,445
	7	50,11	50,3	50,45	266,4	50,874	20,184				
	8	50,53	50,84	50,07	268,1			59,704	23,241		
	9	50,29	50,91	50,22	268,6					70,012	27,346
MAX		50,72	51,24	51,30	270,80	51,58	20,31	60,96	23,71	70,01	27,45
MIN		50,11	50,30	50,07	265,70	46,48	18,10	57,71	22,35	67,24	26,23
PROMEDIO		50,3788889	50,72	50,49	268,22	49,64	19,53	59,46	23,10	68,84	27,01
DESV ESTANDAR		0,21774093	0,34	0,47	1,51	2,76	1,24	1,64	0,69	1,43	0,68
10%F	1	49,99	49,61	50,41	267	58,374	23,538				
	2	50,29	49,47	50,6	268,3			68,313	27,459		
	3	50,12	49,45	50,54	267,5					82,574	33,317
	4	50,37	50,02	50,05	267,7	53,461	21,219				
	5	50,07	49,72	50,46	266,3			74,298	29,845		
	6	50,44	49,66	50,02	268,1					79,397	31,697
	7	50,07	49,71	50,56	267,4	58,005	23,305				
	8	50,25	49,85	50,55	268,8			73,744	29,439		
	9	50,15	49,81	50,39	268,4					82,796	33,145
MAX		50,44	50,02	50,60	268,80	58,37	23,54	74,30	29,85	82,80	33,32
MIN		49,99	49,45	50,02	266,30	53,46	21,22	68,31	27,46	79,40	31,70
PROMEDIO		50,1944444	49,70	50,40	267,72	56,61	22,69	72,12	28,91	81,59	32,72
DESV ESTANDAR		0,15150174	0,18	0,22	0,77	2,74	1,28	3,31	1,28	1,90	0,89

OBSERVACIONES

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
ENSAYO A COMPRESION

PROYECTO _____	LOTE _____
DESCRIPCION DEL MATERIAL _____	MUESTRA _____ 20% SUSTITUCION
CLASIFICACION _____	FECHA _____ HOJA No. _____ DE _____

MORTERO	MUESTRA	BASE	ANCHO	ALTO	MASA	7 DIAS		28 DIAS		56 DIAS	
		mm	mm	mm	g	KN	MPA	KN	MPA	KN	MPA
RE	1	50,65	50,45	50,09	271,8	74,113	29,21				
	2	50,2	49,41	50,68	273,4			96,281	38,817		
	3	50,27	49,97	49,59	273,8					107,66	43,4466
	4	50,35	50,8	49,9	275,9	82,722	32,925				
	5	50,14	49,87	50,77	273,8			100,345	40,13		
	6	50	50,25	49,42	274,2					111,798	45,019
	7	50,35	50,7	49,85	270,4	79,212	31,599				
	8	50,25	49,87	50,69	272,7			96,207	38,391		
	9	49,95	50,3	49,35	273,9					112,943	45,499
MAX		50,65	50,80	50,77	275,90	82,72	32,93	100,35	40,13	112,94	45,50
MIN		49,95	49,41	49,35	270,40	74,11	29,21	96,21	38,39	107,66	43,45
PROMEDIO		50,24	50,18	50,04	273,32	78,68	31,24	97,61	39,11	110,80	44,65
DESV ESTANDAR		0,20814658	0,44387498	0,55746699	1,55946928	4,32887172	1,88267638	2,36800253	0,90641841	2,77921326	1,07356008
20%G	1	50,12	52,56	50,5	263,5	30,554	11,599				
	2	49,9	50,34	53,99	264,9			40,345	14,844		
	3	50,71	53,08	50,15	267,8					42,968	15,963
	4	50,59	53,51	50,22	265,4	32,365	11,956				
	5	50,29	53,91	49,86	266,3			45,443	16,762		
	6	50,07	52,8	50,32	266,5					44,483	16,826
	7	50,13	53,51	50,41	264,5	29,520	10,976				
	8	49,85	50,08	54,06	263,6			43,3	15,994		
	9	50,26	53,15	50,16	264,8					39,236	14,688
MAX		50,71	53,91	54,06	267,80	32,37	11,96	45,44	16,76	44,48	16,83
MIN		49,85	50,08	49,86	263,50	29,52	10,98	40,35	14,84	39,24	14,69
PROMEDIO		50,21333333	52,55	51,07	265,26	30,81	11,51	43,03	15,87	42,23	15,83
DESV ESTANDAR		0,28788018	1,39	1,68	1,41	1,44	0,50	2,56	0,97	2,70	1,08
20%I	1	50,12	53,07	50,62	272,2	46,663	17,543				
	2	50,11	52,6	50,65	273,4			58,855	22,329		
	3	50,25	51,92	50,62	273					62,919	24,116
	4	50,21	52,61	50,32	270,9	49,397	18,7				
	5	50,25	53,02	50,39	271,8			58,781	22,063		
	6	50,39	52,16	50,03	272,2					58,966	22,434
	7	50,56	53,74	50,28	277,3	45,554	16,766				
	8	50,47	53,01	50,21	275,5			50,727	18,96		
	9	50,47	52,57	50,05	275,5					57,894	21,82
MAX		50,56	53,74	50,65	277,30	49,40	18,70	58,86	22,33	62,92	24,12
MIN		50,11	51,92	50,03	270,90	45,55	16,77	50,73	18,96	57,89	21,82
PROMEDIO		50,31444444	52,74	50,35	273,53	47,20	17,67	56,12	21,12	59,93	22,79
DESV ESTANDAR		0,16325678	0,54	0,24	2,11	1,98	0,97	4,67	1,87	2,65	1,19
20%F	1	50,15	50,81	50,66	272,8	57,746	22,662				
	2	50,84	50,24	50,95	273,2			65,616	25,689		
	3	50,18	50,83	50,46	273,3					71,232	27,927
	4	50,32	50,62	50,24	267,3	45,813	17,986				
	5	50,3	50,34	50,26	270			69,163	27,314		
	6	50,19	50,38	50,5	272,9					68,424	27,06
	7	50,17	50,31	50,53	269,2	52,796	20,917				
	8	50,26	50,36	50,58	269,9			67,648	26,727		
	9	50,17	50,46	50,45	272,2					67,537	26,678
MAX		50,84	50,83	50,95	273,30	57,75	22,66	69,16	27,31	71,23	27,93
MIN		50,15	50,24	50,24	267,30	45,81	17,99	65,62	25,69	67,54	26,68
PROMEDIO		50,2866667	50,48	50,51	271,20	52,12	20,52	67,48	26,58	69,06	27,22
DESV ESTANDAR		0,21644861	0,22	0,21	2,16	6,00	2,36	1,78	0,82	1,93	0,64

OBSERVACIONES _____

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
 LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
 ENSAYO A FLEXION Y COMPRESION MITADES DE VIGAS

PROYECTO	LOTE		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento ART	MUESTRA	5 % SUSTITUCION
CLASIFICACION	FECHA	HOJA No.	DE

MORTERO	MUESTRA	BASE	ANCHO	ALTURA	MASA	7 DIAS		28 DIAS		56 DIAS		COMPRESION 7 DIAS				COMPRESION 28 DIAS				COMPRESION 56 DIAS			
		mm	mm	mm	g	KN	MPA	KN	MPA	KN	MPA	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
RE	1	160,140	40,410	40,370	546,400	2,014	5,639					47,106	29,441	49,618	31,011	59,667	37,292	55,456	34,660	65,135	40,710	62,291	38,932
	2	160,030	40,060	40,130	556,100			1,773	4,964														
	3	160,020	40,020	40,150	563,400					2,595	7,266												
	4	160,350	40,520	40,230	557,500	1,595	4,466					47,291	29,557	51,872	32,420								
	5	160,100	40,080	40,350	561,900			2,153	6,028							59,150	36,969	58,374	36,484				
	6	159,880	40,110	40,060	561,700					1,939	5,429									69,606	43,504	68,128	42,580
	7	160,230	40,290	40,220	560,400	1,445	4,046					48,251	30,157	50,800	31,750								
	8	160,290	41,160	40,190	572,700			1,830	5,124							63,621	39,763	58,005	36,253				
	9	160,140	40,600	40,770	562,800					2,401	6,723									70,862	44,289	67,463	42,164
MAX	160,350	41,160	40,770	572,700	2,014	5,639	2,153	6,028	2,595	7,266	48,251	30,157	51,872	32,420	63,621	39,763	58,374	36,484	70,862	44,289	68,128	42,580	
MIN	159,880	40,020	40,060	546,400	1,445	4,046	1,773	4,964	1,939	5,429	47,106	29,441	49,618	31,011	59,150	36,969	55,456	34,660	65,135	40,710	62,291	38,932	
PROMEDIO	160,131	40,361	40,274	560,322	1,685	4,717	1,919	5,372	2,312	6,473	47,549	29,718	50,763	31,727	60,813	38,008	57,278	35,799	68,534	42,834	65,961	41,225	
DESV ESTANDAR	0,146	0,367	0,211	7,007	0,295	0,826	0,205	0,574	0,337	0,944	0,615	0,384	1,127	0,705	2,446	1,528	1,589	0,993	3,010	1,881	3,195	1,997	
5%G	1	161,030	40,660	40,240	562,100	1,864	5,219					34,397	21,500	37,131	23,207								
	2	160,070	41,940	40,100	562,300			1,751	4,903							45,406	28,379	43,929	27,455				
	3	160,220	40,450	41,300	559,900					2,221	6,219									51,281	32,050	50,579	31,612
	4	160,330	40,810	41,940	552,000	1,610	4,508					35,357	22,098	34,840	21,775								
	5	160,490	41,580	40,100	558,500					1,775	4,970					46,478	29,049	48,067	30,042				
	6	160,740	40,020	41,800	559,500						1,827	5,116								52,980	33,113	54,938	34,337
	7	160,930	40,520	42,270	568,700	1,523	4,264			1,529	4,281			33,953	21,221	33,436	20,897						
	8	160,250	41,910	40,140	559,000			1,529	4,281							45,998	28,748	44,409	27,756				
	9	160,030	40,380	42,750	571,600					2,268	6,350									51,938	32,489	52,943	33,090
MAX	161,030	41,940	42,750	571,600	1,864	5,219	1,775	4,970	2,268	6,350	35,357	22,098	37,131	23,207	46,478	29,049	48,067	30,042	52,980	33,113	54,938	34,337	
MIN	160,030	40,020	40,100	552,000	1,523	4,264	1,529	4,281	1,827	5,116	33,953	21,221	33,436	20,897	45,406	28,379	43,929	27,455	51,281	32,050	50,579	31,612	
PROMEDIO	160,454	40,919	41,182	561,511	1,666	4,664	1,685	4,718	2,105	5,895	34,969	21,606	35,136	21,960	45,961	28,725	45,468	28,418	52,066	32,551	52,820	33,013	
DESV ESTANDAR	0,367	0,709	1,056	5,776	0,177	0,496	0,136	0,380	0,242	0,678	0,718	0,448	1,865	1,166	0,537	0,336	2,263	1,415	0,857	0,534	2,182	1,364	
5%I	1	160,640	40,260	41,770	563,300	1,970	5,516					42,118	25,046	39,273	23,354								
	2	160,080	40,980	40,210	556,900			1,616	4,525							50,542	31,589	51,170	31,981				
	3	160,160	40,960	40,250	558,300					1,992	5,578									57,118	35,699	53,830	33,644
	4	160,520	40,350	40,950	559,200	1,963	5,496					28,337	17,150	41,527	25,132								
	5	160,200	40,220	40,170	546,600			1,545	4,326							49,914	31,196	49,803	31,127				
	6	160,330	40,820	40,160	556,800						1,916	5,365								55,493	34,683	58,153	36,345
	7	160,010	39,990	40,770	551,500	2,035	5,698					40,530	24,859	39,791	24,406								
	8	160,190	40,540	40,200	556,000			1,971	5,519							55,049	34,406	54,015	33,759				
	9	160,240	40,630	40,230	555,400					1,882	5,270									55,825	34,891	53,645	33,528
MAX	160,640	40,980	41,770	563,300	2,035	5,698	1,971	5,519	1,992	5,578	42,118	25,046	41,527	25,132	55,049	34,406	54,015	33,759	57,118	35,699	58,153	36,345	
MIN	160,010	39,990	40,160	546,600	1,963	5,496	1,545	4,326	1,882	5,270	28,337	17,150	39,273	23,354	49,914	31,196	49,803	31,127	55,493	34,683	53,645	33,528	
PROMEDIO	160,263	40,528	40,523	556,000	1,989	5,570	1,711	4,790	1,930	5,404	36,995	22,352	40,197	24,297	51,835	32,397	51,663	32,289	56,145	35,091	55,209	34,506	
DESV ESTANDAR	0,203	0,349	0,550	4,733	0,040	0,111	0,228	0,639	0,056	0,158	7,540	4,506	1,181	0,894	2,801	1,751	2,149	1,343	0,859	0,537	2,551	1,594	
5%F	1	158,950	38,380	39,180	553,200	1,406	3,937					40,899	27,198	44,335	29,483								
	2	160,210	40,830	40,200	561,600			2,219	6,213							56,379	35,237	55,788	34,868				
	3	160,240	40,490	40,280	560,100					2,175	6,090									67,057	41,910	66,318	41,449
	4	159,040	38,730	39,160	551,700	1,816	5,085					43,264	28,525	34,951	23,044								
	5	160,180	41,520	40,500	555,800			2,040	5,712							57,192	35,745	55,677	34,798				
	6	160,250	39,840	40,160	552,400					2,082	5,830									69,495	43,434	56,342	35,214
	7	159,100	38,880	39,750	551,900	1,938	5,426					45,111	29,189	47,697	30,862								
	8	160,230	40,580	39,830	562,800			2,172	6,082							57,635	36,022	56,342	35,214				
	9	160,190	40,080	40,160	553,200					2,350	6,580									64,397	40,248	63,695	39,809
MAX	160,250	41,520	40,500	562,800	1,938	5,426	2,219	6,213	2,350	6,580	45,111	29,189	47,697	30,862	57,635	36,022	56,342	35,214	69,495	43,434	66,318	41,449	
MIN	158,950	38,380	39,160	551,700	1,406	3,937	2,040	5,712	2,082	5,830	40,899	27,198	34,951	23,044	56,379	35,237	55,677	34,798	64,397	40,248	56,342	35,214	
PROMEDIO	159,821	39,926	39,913	555,856	1,720	4,816	2,144	6,002	2,202	6,167	43,091	28,304	42,328	27,796	57,069	35,668	55,936	34,960	66,983	41,864	62,118	38,824	
DESV ESTANDAR	0,595	1,064	0,477	4,447	0,279	0,780	0,093	0,260	0,136	0,381	2,111	1,014	6,606	4,173	0,637	0,398	0,356	0,223	2,550	1,593	5,172	3,232	

OBSERVACIONES

EJECUTO

CALCULO-REVISO



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
 LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
 ENSAYO A FLEXION Y COMPRESION MITADES DE VIGAS

PROYECTO _____ LOTE _____
 DESCRIPCION DEL MATERIAL Cemento ART MUESTRA 10 % SUSTITUCION
 CLASIFICACION _____ FECHA _____ HOJA No. _____ DE _____

MORTERO	MUESTRA	BASE		ANCHO		ALTURA		MASA		7 DIAS		28 DIAS		56 DIAS		COMPRESION 7 DIAS				COMPRESION 28 DIAS				COMPRESION 56 DIAS						
		mm	mm	mm	mm	g	KN	MPA	KN	MPA	KN	MPA	KN	MPA	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2						
RE	1	160,140	40,410	40,370	546,400	2,014	5,639							47,106	29,441	49,618	31,011			59,667	37,292	55,456	34,660			65,135	40,710	62,291	38,932	
	2	160,030	40,060	40,130	556,100			1,773	4,964																					
	3	160,020	40,020	40,150	563,400																									
	4	160,350	40,520	40,230	557,500	1,595	4,466																							
	5	160,100	40,080	40,350	561,900			2,153	6,028																					
	6	159,880	40,110	40,060	561,700																									
	7	160,230	40,290	40,220	560,400	1,445	4,046																							
	8	160,290	41,160	40,190	572,700																									
	9	160,140	40,600	40,770	562,800																									
MAX	160,350	41,160	40,770	572,700	2,014	5,639	2,153	6,028	2,595	7,266				48,251	30,157	51,872	32,420			63,621	39,763	58,374	36,484			70,862	44,289	68,128	42,580	
MIN	159,880	40,020	40,060	546,400	1,445	4,046	1,773	4,964	1,939	5,429				47,106	29,441	49,618	31,011			59,150	36,969	55,456	34,660			65,135	40,710	62,291	38,932	
PROMEDIO	160,131	40,361	40,274	560,322	1,685	4,717	1,919	5,372	2,312	6,473				47,549	29,718	50,763	31,727			60,813	38,008	57,278	35,799			68,534	42,834	65,961	41,225	
DESV ESTANDAR	0,146	0,367	0,211	7,007	0,295	0,826	0,205	0,574	0,337	0,944				0,615	0,384	1,127	0,705			2,446	1,528	1,589	0,993			3,010	1,881	3,195	1,997	
10%G	1	160,470	40,420	40,970	546,900	1,328	3,718							31,445	19,652	32,982	21,164													
	2	160,280	42,110	40,190	556,300			1,872	5,242																					
	3	160,490	41,520	40,190	554,200																									
	4	160,680	40,310	41,470	549,400	1,393	3,900																							
	5	160,430	42,140	40,200	550,700			1,851	5,183																					
	6	160,530	41,770	40,200	553,100																									
	7	160,430	40,380	40,460	539,900	1,439	4,029																							
	8	160,330	41,780	40,150	546,200			1,613	4,516																					
	9	160,270	42,070	40,140	554,600																									
MAX	160,680	42,140	41,470	556,300	1,439	4,029	1,872	5,242	1,897	5,312				34,286	21,429	32,982	21,164			41,379	25,862	41,490	25,931			43,005	26,878	42,451	26,532	
MIN	160,270	40,310	40,140	539,900	1,328	3,718	1,613	4,516	1,635	4,578				31,445	19,652	28,855	18,034			37,463	23,414	40,123	25,077			41,749	26,093	45,369	28,356	
PROMEDIO	160,434	41,389	40,441	550,144	1,387	3,883	1,779	4,980	1,762	4,935				32,699	20,436	31,154	19,655			39,569	24,730	40,776	25,485			42,549	26,593	42,648	26,655	
DESV ESTANDAR	0,130	0,789	0,469	5,182	0,056	0,156	0,144	0,403	0,131	0,367				1,450	0,907	2,104	1,568			1,975	1,234	0,686	0,428			0,695	0,435	2,629	1,643	
10%I	1	160,210	41,400	40,800	562,300	1,422	3,982							31,330	19,581	33,103	20,690													
	2	160,200	42,370	40,100	562,300			1,718	4,810																					
	3	160,180	41,760	40,130	556,900																									
	4	160,500	41,280	40,200	554,100	1,198	3,354																							
	5	160,370	41,800	40,100	554,900			1,610	4,508																					
	6	160,300	40,940	40,130	544,600																									
	7	160,430	42,140	40,430	550,900	1,210	3,388																							
	8	160,250	41,740	40,090	556,500			1,530	4,284																					
	9	160,250	42,220	40,180	562,600																									
MAX	160,500	42,370	40,800	562,600	1,422	3,982	1,718	4,810	1,864	5,219				33,621	21,013	33,362	20,851			39,754	24,846	39,865	24,915			44,926	28,079	45,776	28,610	
MIN	160,180	40,940	40,090	544,600	1,198	3,354	1,530	4,284	1,623	4,544				31,330	19,581	29,963	18,727			35,505	22,191	35,357	22,098			38,461	24,038	39,643	24,777	
PROMEDIO	160,299	41,739	40,240	556,122	1,277	3,575	1,619	4,534	1,738	4,867				32,352	20,220	32,143	20,089			37,020	23,137	36,934	23,083			40,948	25,593	41,909	26,193	
DESV ESTANDAR	0,111	0,469	0,235	5,965	0,126	0,353	0,094	0,264	0,121	0,338				1,165	0,728	1,892	1,183			2,373	1,483	2,541	1,588			3,481	2,176	3,365	2,103	
10%F	1	160,070	41,000	40,270	560,800	1,511	4,231							39,273	24,546	35,800	22,375													
	2	160,270	40,400	40,190	554,600			1,833	5,132																					
	3	160,120	41,250	40,120	567,400																									
	4	160,350	41,110	40,110	558,400	1,370	3,836																							
	5	160,300	40,710	40,180	555,500			1,739	4,869																					
	6	160,190	40,490	40,130	559,300																									
	7	160,340	39,400	40,300	540,200	1,447	4,052																							
	8	160,350	39,660	40,210	546,200			1,517	4,248																					
	9	160,300	39,970	40,110	552,800																									
MAX	160,350	41,250	40,300	567,400	1,511	4,231	1,833	5,132	1,621	4,539				39,458	24,661	37,057	23,160			48,251	30,157	48,695	30,434			54,163	33,852	51,318	32,074	
MIN	160,070	39,400	40,110	540,200	1,370	3,836	1,517	4,248	1,479	4,141				37,020	23,134	35,800	22,375			44,852	28,033	47,993	29,995			50,911	31,820	47,993	29,995	
PROMEDIO	160,254	40,443	40,180	555,022	1,443	4,039	1,696	4,750	1,566	4,384				38,584	24,114	36,285	22,675			46,675	29,172	48,301	30							



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
DENSIDAD Y ABSORCION

PROYECTO _____	LOTE _____
DESCRIPCION DEL MATERIAL _____	MORTERO _____ MUESTRA _____ 5% SUSTITUCION _____
CLASIFICACION _____	FECHA _____ HOJA No. _____ DE _____

		Masa SSS	Masa sumergida	Masa seca	Ds Bulk	Ds sss	Ds nominal	absorcion
		g	g	g	g	g	g	%
MORTERO	MUESTRA							
	10	272,30	148,90	244,30	1,97	2,20	2,55	11%
RE	11	274,80	149,60	246,80	1,97	2,19	2,53	11%
	12	272,40	147,70	245,00	1,96	2,18	2,51	11%
	MAX	274,80	149,60	246,80	1,97	2,20	2,55	11%
	MIN	272,30	147,70	244,30	1,96	2,18	2,51	11%
	PROMEDIO	273,17	148,73	245,37	1,97	2,19	2,53	11%
	DESV ESTANDAR	1,415	0,96	1,29	0,01	0,01	0,02	0%
5%G	10	274,66	144,80	244,80	1,88	2,11	2,44	12%
	11	274,70	146,20	244,70	1,90	2,13	2,48	12%
	12	273,90	146,50	244,60	1,92	2,14	2,49	12%
	MAX	274,70	146,50	244,80	1,92	2,14	2,49	12%
	MIN	273,90	144,80	244,60	1,88	2,11	2,44	12%
	PROMEDIO	274,42	145,83	244,70	1,90	2,13	2,47	12%
	DESV ESTANDAR	0,451	0,91	0,10	0,02	0,02	0,02	0%
5%I	10	272,60	145,00	241,00	1,88	2,13	2,50	13%
	11	273,10	146,40	240,90	1,90	2,15	2,54	13%
	12	270,90	146,10	238,90	1,91	2,17	2,57	13%
	MAX	273,10	146,40	241,00	1,91	2,17	2,57	13%
	MIN	270,90	145,00	238,90	1,88	2,13	2,50	13%
	PROMEDIO	272,20	145,83	240,27	1,90	2,15	2,54	13%
	DESV ESTANDAR	1,153	0,74	1,18	0,01	0,02	0,03	0%
5%F	10	273,70	148,90	241,90	1,93	2,19	2,59	13%
	11	273,10	148,80	241,10	1,93	2,19	2,61	13%
	12	272,90	147,60	241,40	1,92	2,17	2,57	13%
	MAX	273,70	148,90	241,90	1,93	2,19	2,61	13%
	MIN	272,90	147,60	241,10	1,92	2,17	2,57	13%
	PROMEDIO	273,23	148,43	241,47	1,93	2,18	2,59	13%
	DESV ESTANDAR	0,42	0,72	0,40	0,01	0,01	0,02	0%

OBSERVACIONES

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
DENSIDAD Y ABSORCION

PROYECTO		LOTE	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	MORTERO	MUESTRA	10% SUSTITUCION
CLASIFICACION	FECHA	HOJA No.	DE

		Masa SSS	Masa sumergida	Masa seca	Ds Bulk	Ds sss	Ds nominal	absorcion
MORTERO	MUESTRA	g	g	g	g	g	g	%
RE	10	272,30	148,90	244,30	1,97	2,20	2,55	11%
	11	274,80	149,60	246,80	1,97	2,19	2,53	11%
	12	272,40	147,70	245,00	1,96	2,18	2,51	11%
	MAX	274,80	149,60	246,80	1,97	2,20	2,55	11%
	MIN	272,30	147,70	244,30	1,96	2,18	2,51	11%
	PROMEDIO	273,17	148,73	245,37	1,97	2,19	2,53	11%
	DESV ESTANDAR	1,415	0,96	1,29	0,01	0,01	0,02	0%
10%G	10	269,30	137,00	237,40	1,79	2,03	2,36	13%
	11	268,90	138,10	236,90	1,81	2,05	2,39	14%
	12	267,10	136,90	235,00	1,80	2,05	2,39	14%
	MAX	269,30	138,10	237,40	1,81	2,05	2,39	14%
	MIN	267,10	136,90	235,00	1,79	2,03	2,36	13%
	PROMEDIO	268,43	137,33	236,43	1,80	2,04	2,38	14%
	DESV ESTANDAR	1,172	0,67	1,27	0,01	0,01	0,02	0%
10%I	10	268,70	140,20	233,30	1,81	2,09	2,50	15%
	11	268,80	140,10	233,70	1,81	2,08	2,49	15%
	12	269,90	139,80	233,80	1,79	2,07	2,48	15%
	MAX	269,90	140,20	233,80	1,81	2,09	2,50	15%
	MIN	268,70	139,80	233,30	1,79	2,07	2,48	15%
	PROMEDIO	269,13	140,03	233,60	1,80	2,08	2,49	15%
	DESV ESTANDAR	0,666	0,21	0,26	0,01	0,01	0,01	0%
10%F	10	270,30	144,80	237,20	1,89	2,15	2,56	14%
	11	269,40	144,60	236,40	1,89	2,15	2,57	14%
	12	271,30	145,40	237,50	1,88	2,15	2,57	14%
	MAX	271,30	145,40	237,50	1,89	2,15	2,57	14%
	MIN	269,40	144,60	236,40	1,88	2,15	2,56	14%
	PROMEDIO	270,33	144,93	237,03	1,89	2,15	2,57	14%
	DESV ESTANDAR	0,95	0,42	0,57	0,00	0,00	0,01	0%

OBSERVACIONES

EJECUTÓ

CALCULÓ-REVISÓ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
DENSIDAD Y ABSORCION

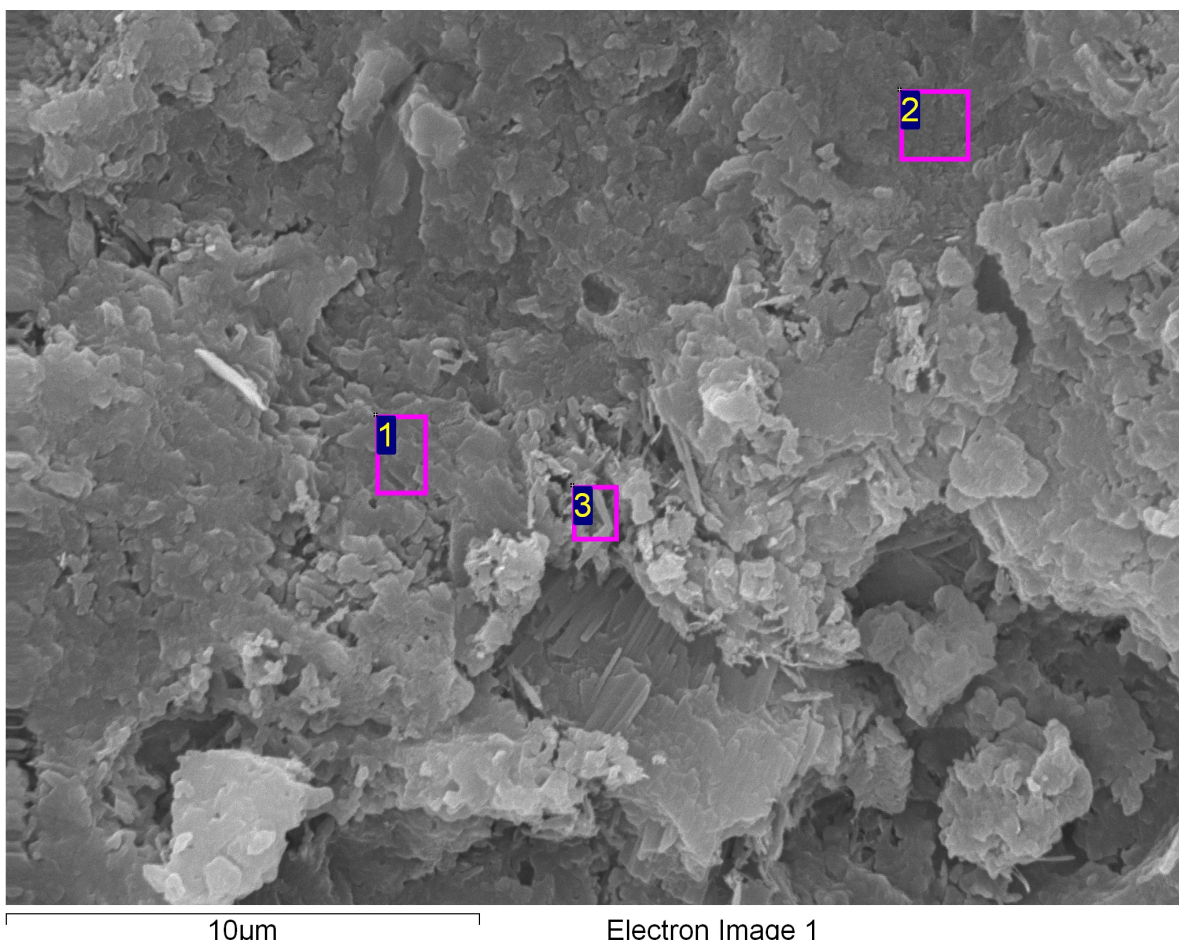
PROYECTO		LOTE	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	MORTERO	MUESTRA	20% SUSTITUCION
CLASIFICACION	FECHA	HOJA No.	DE

		Masa SSS	Masa sumergida	Masa seca	Ds Bulk	Ds sss	Ds nominal	absorcion
MORTERO	MUESTRA	g	g	g	g	g	g	%
RE	10	272,30	148,90	244,30	1,97	2,20	2,55	11%
	11	274,80	149,60	246,80	1,97	2,19	2,53	11%
	12	272,40	147,70	245,00	1,96	2,18	2,51	11%
	MAX	274,80	149,60	246,80	1,97	2,20	2,55	11%
	MIN	272,30	147,70	244,30	1,96	2,18	2,51	11%
	PROMEDIO	273,17	148,73	245,37	1,97	2,19	2,53	11%
	DESV ESTANDAR	1,415	0,96	1,29	0,01	0,01	0,02	0%
20%G	10	268,90	132,00	234,10	1,71	1,96	2,29	15%
	12	267,80	131,90	232,60	1,71	1,97	2,30	15%
	13	267,20	132,40	232,90	1,72	1,98	2,31	15%
	MAX	268,90	132,40	234,10	1,72	1,98	2,31	15%
	MIN	267,20	131,90	232,60	1,71	1,96	2,29	15%
	PROMEDIO	267,97	132,10	233,20	1,71	1,97	2,30	15%
	DESV ESTANDAR	0,862	0,26	0,79	0,01	0,01	0,01	0%
20%I	10	273,30	141,60	242,30	1,84	2,07	2,40	13%
	12	270,80	141,80	240,80	1,86	2,09	2,43	12%
	13	273,50	143,20	243,10	1,86	2,09	2,43	13%
	MAX	273,50	143,20	243,10	1,86	2,09	2,43	13%
	MIN	270,80	141,60	240,80	1,84	2,07	2,40	12%
	PROMEDIO	272,53	142,20	242,07	1,85	2,09	2,42	13%
	DESV ESTANDAR	1,504	0,87	1,17	0,02	0,01	0,02	0%
20%F	10	272,40	144,60	241,70	1,89	2,13	2,48	13%
	12	271,40	142,70	240,00	1,86	2,10	2,46	13%
	13	271,70	147,40	241,10	1,93	2,18	2,57	13%
	MAX	272,40	147,40	241,70	1,93	2,18	2,57	13%
	MIN	271,40	142,70	240,00	1,86	2,10	2,46	13%
	PROMEDIO	271,83	144,90	240,93	1,89	2,14	2,50	13%
	DESV ESTANDAR	0,51	2,36	0,86	0,04	0,04	0,06	0%

OBSERVACIONES

EJECUTÓ

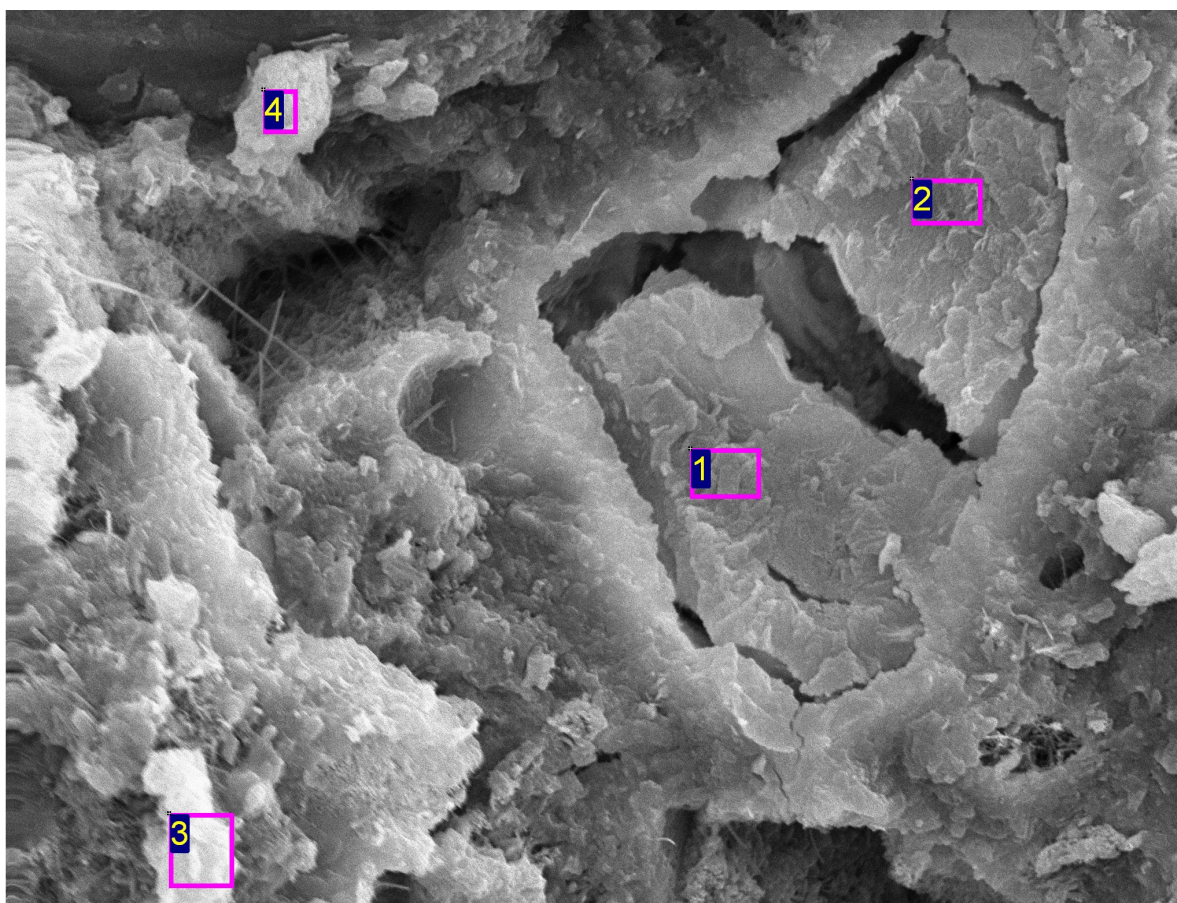
CALCULÓ-REVISÓ



Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	9.39	48.72		1.61	10.35	28.20	1.73	100.00
Spectrum 2	Yes	8.44	46.58	1.65	1.71	10.27	29.48	1.86	100.00
Spectrum 3	Yes	9.35	43.46		2.56	7.92	30.33	6.38	100.00
Max.		9.39	48.72	1.65	2.56	10.35	30.33	6.38	
Min.		8.44	43.46	1.65	1.61	7.92	28.20	1.73	

All results in weight%



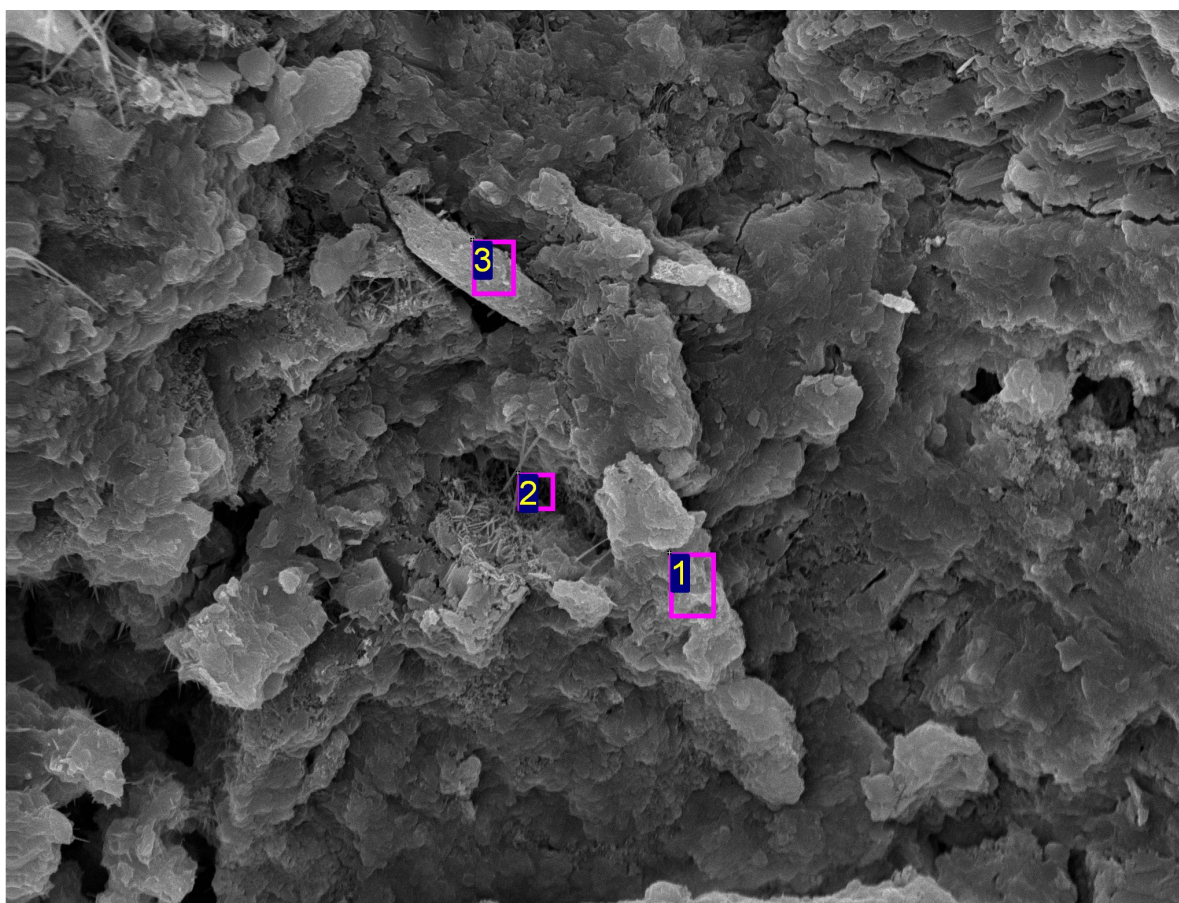
30um

Electron Image 1

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	13.38	47.22	2.67	2.45	17.20	13.33	3.76	100.00
Spectrum 2	Yes	11.47	49.55	2.49	2.63	20.21	9.97	3.67	100.00
Spectrum 3	Yes	12.30	55.89	0.63	1.65	5.67	22.07	1.79	100.00
Spectrum 4	Yes	13.77	58.47	1.14	2.59	4.44	16.96	2.63	100.00
Mean		12.73	52.78	1.73	2.33	11.88	15.58	2.96	100.00
Std. deviation		1.04	5.27	1.00	0.46	7.99	5.18	0.93	
Max.		13.77	58.47	2.67	2.63	20.21	22.07	3.76	
Min.		11.47	47.22	0.63	1.65	4.44	9.97	1.79	

All results in weight%



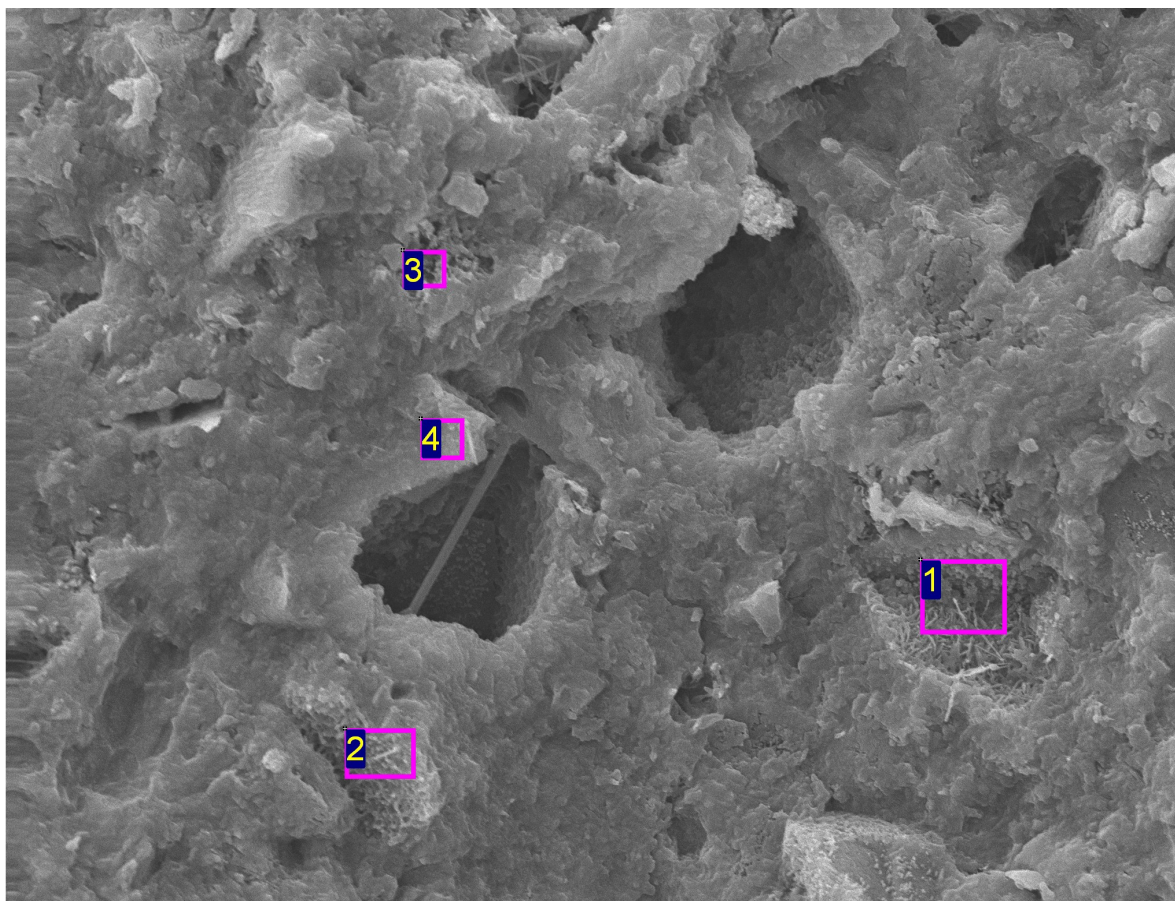
30µm

Electron Image 1

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Al	Si	Ca	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	9.29	46.34	1.80	7.96	32.40	2.21	100.00
Spectrum 2	Yes	7.77	41.23	1.16	7.02	39.96	2.87	100.00
Spectrum 3	Yes	5.70	44.00	4.71	2.48	39.08	4.02	100.00
Mean		7.59	43.85	2.56	5.82	37.15	3.03	100.00
Std. deviation		1.80	2.56	1.89	2.93	4.14	0.92	
Max.		9.29	46.34	4.71	7.96	39.96	4.02	
Min.		5.70	41.23	1.16	2.48	32.40	2.21	

All results in weight%



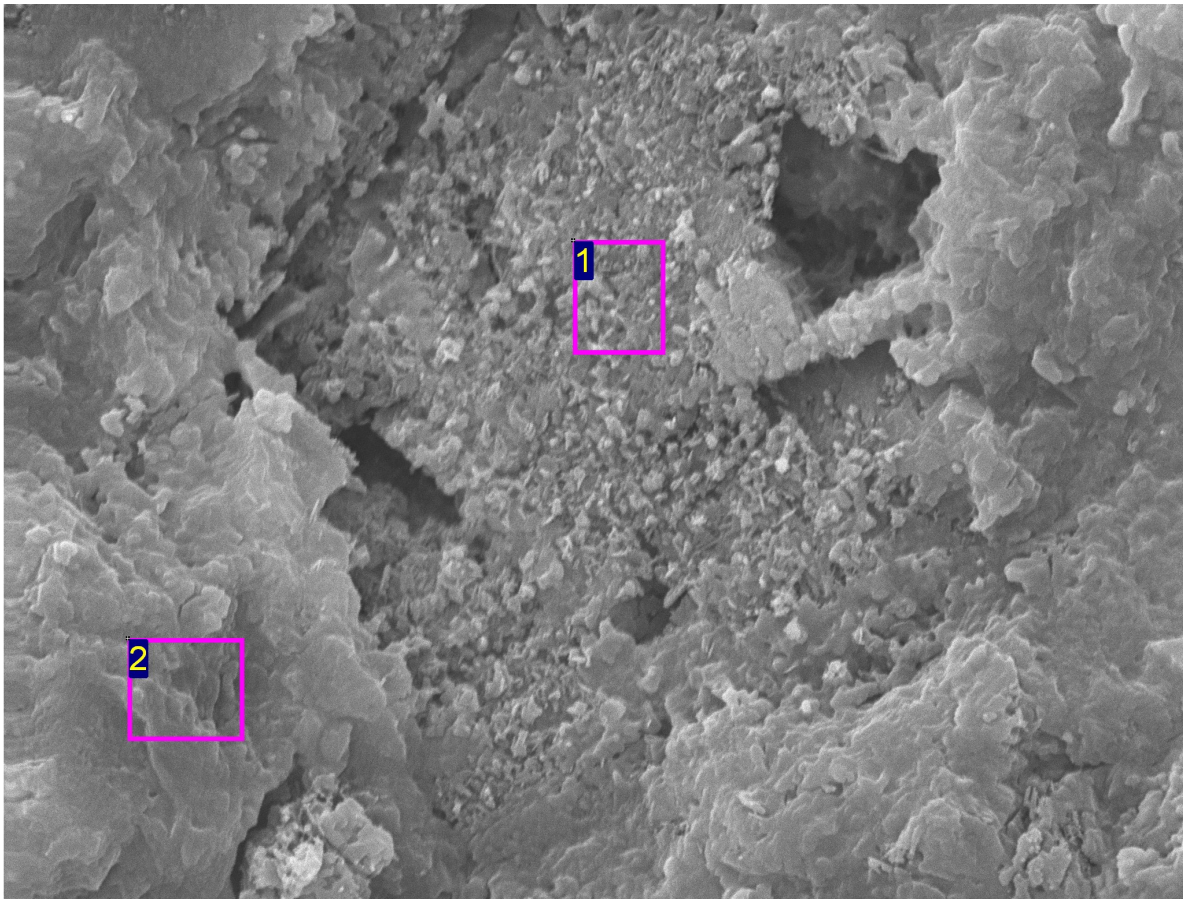
30um

Electron Image 1

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Total
1	Yes		45.53		3.13	8.62	33.40	9.33	100.00
2	Yes	9.98	50.07	1.45		5.02	33.47		100.00
3	Yes		47.21			7.36	45.43		100.00
4	Yes	8.00	48.30			4.79	38.91		100.00
Max.		9.98	50.07	1.45	3.13	8.62	45.43	9.33	
Min.		8.00	45.53	1.45	3.13	4.79	33.40	9.33	

All results in weight%



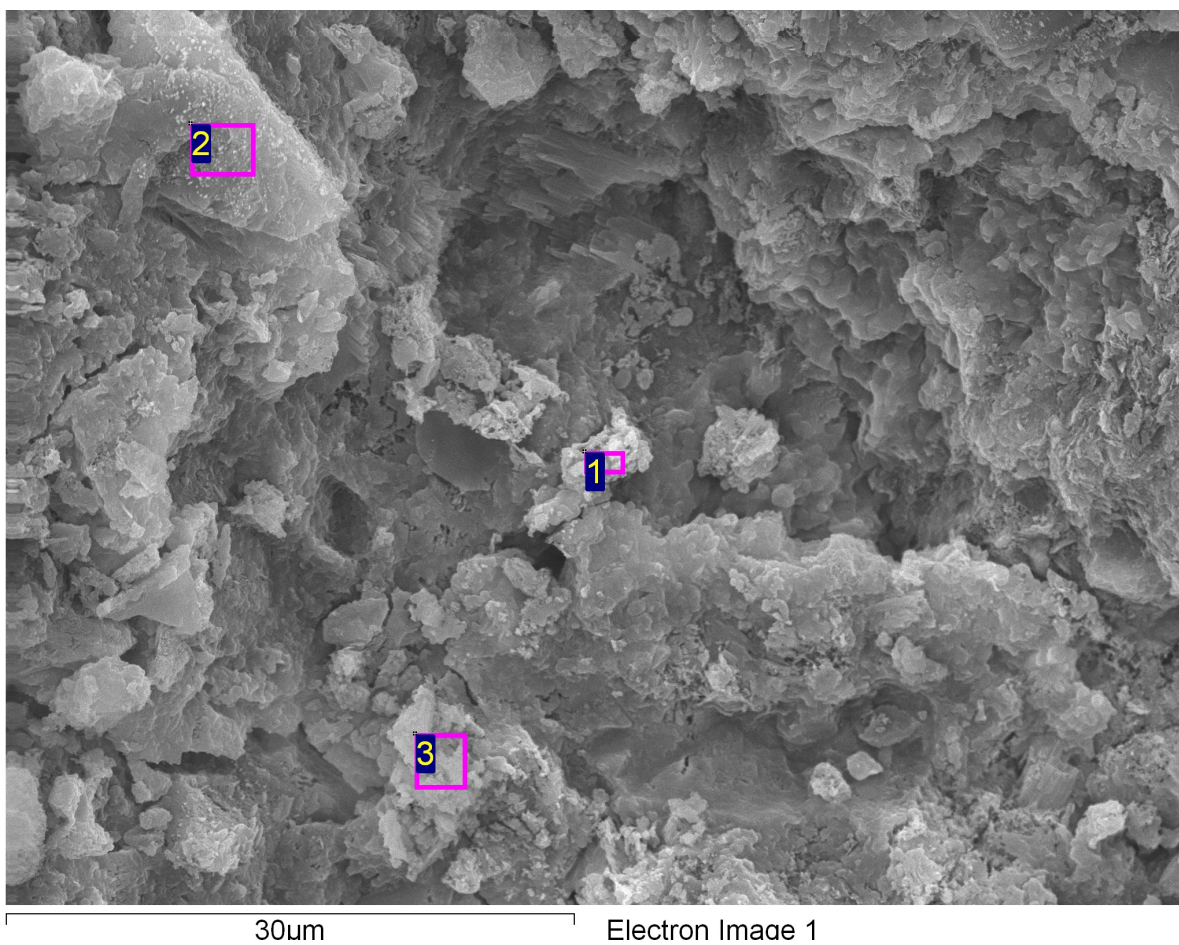
10µm

Electron Image 1

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Al	Si	Ca	Total
1	Yes	7.84	61.06	6.29		24.80	100.00
2	Yes		38.94	4.24	9.61	47.22	100.00
Max.		7.84	61.06	6.29	9.61	47.22	
Min.		7.84	38.94	4.24	9.61	24.80	

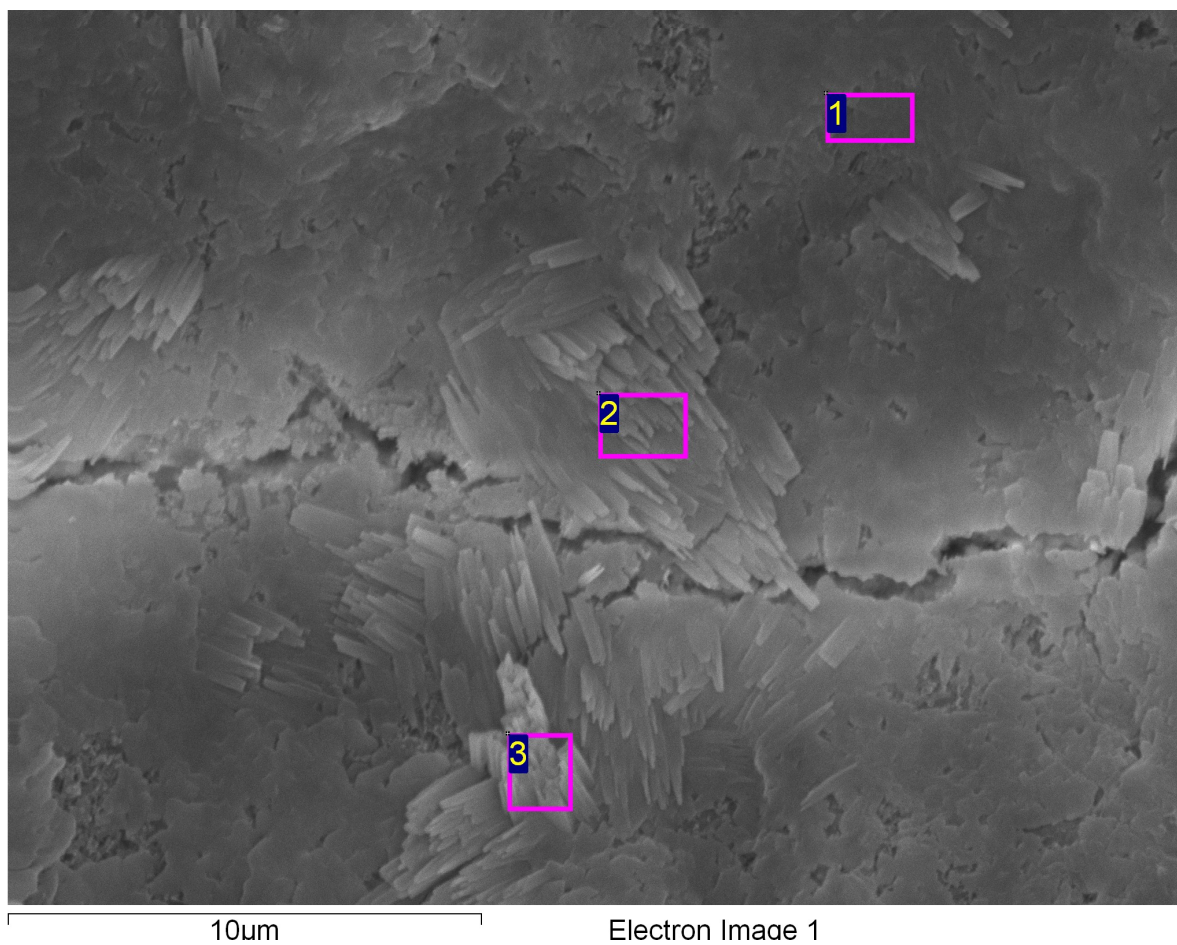
All results in weight%



Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Total
1	Yes	12.24	56.27	0.84	3.34	4.76		20.44	2.11	100.00
2	Yes	9.25	51.32		8.87	0.99	2.05	26.58	0.94	100.00
3	Yes	7.33	48.97		4.88	7.08		28.75	3.00	100.00
Max.		12.24	56.27	0.84	8.87	7.08	2.05	28.75	3.00	
Min.		7.33	48.97	0.84	3.34	0.99	2.05	20.44	0.94	

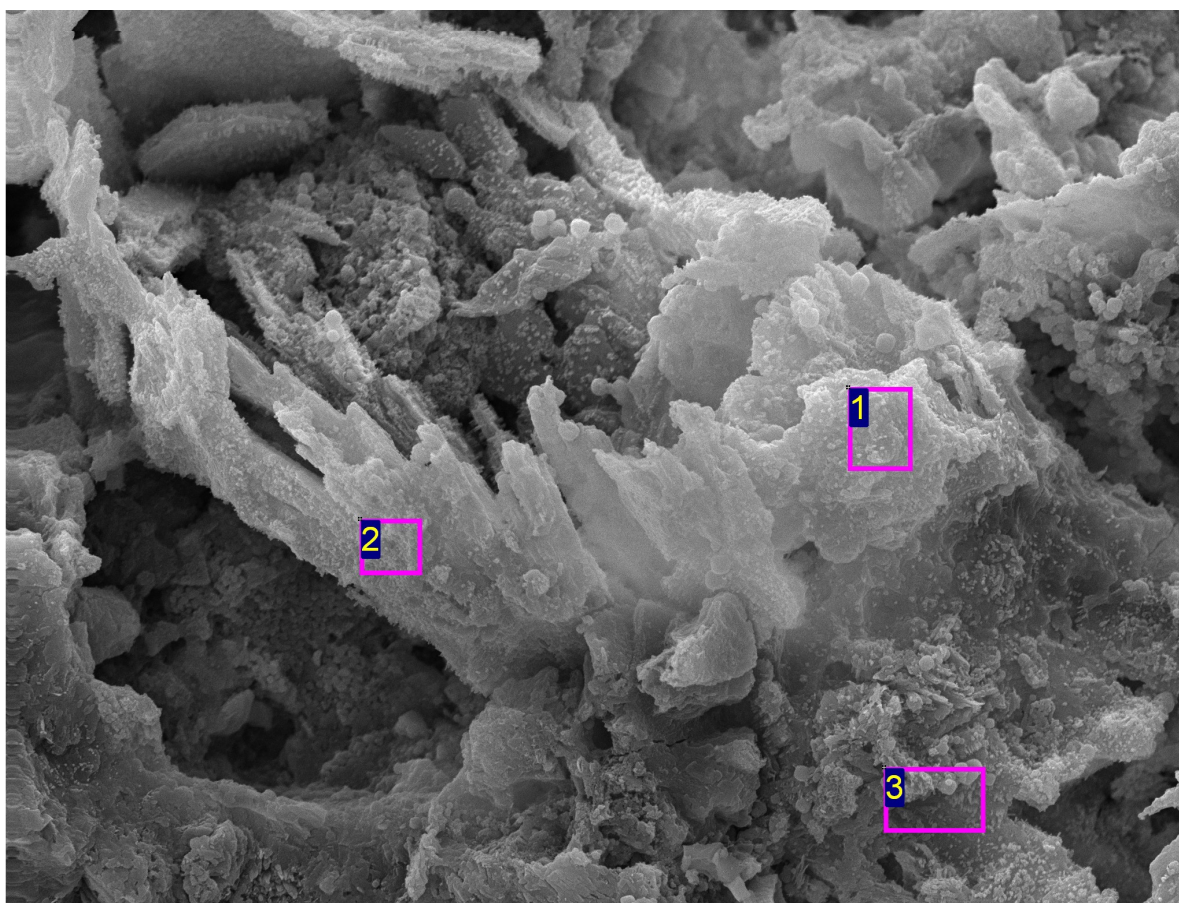
All results in weight%



Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	O	Si	Ca	Total
1	Yes	38.41	2.66	58.94	100.00
2	Yes	39.07	1.57	59.36	100.00
3	Yes	38.56	1.93	59.52	100.00
Mean		38.68	2.05	59.27	100.00
Std. deviation		0.35	0.55	0.30	
Max.		39.07	2.66	59.52	
Min.		38.41	1.57	58.94	

All results in weight%



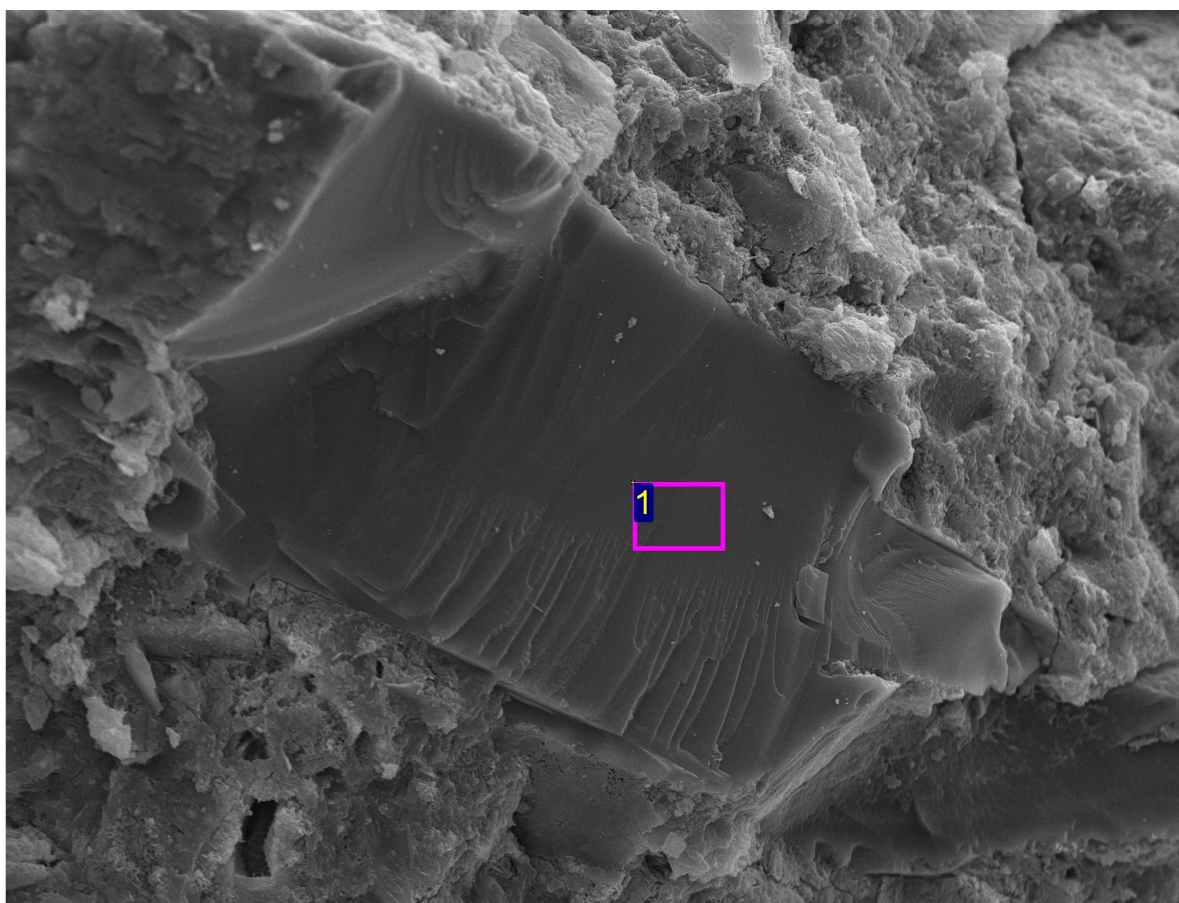
30um

Electron Image 1

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Total
1	Yes	10.24	59.08		7.72		22.96	100.00
2	Yes	9.42	63.39	1.28	8.91	0.67	16.34	100.00
3	Yes		49.57		11.94	2.57	35.91	100.00
Max.		10.24	63.39	1.28	11.94	2.57	35.91	
Min.		9.42	49.57	1.28	7.72	0.67	16.34	

All results in weight%



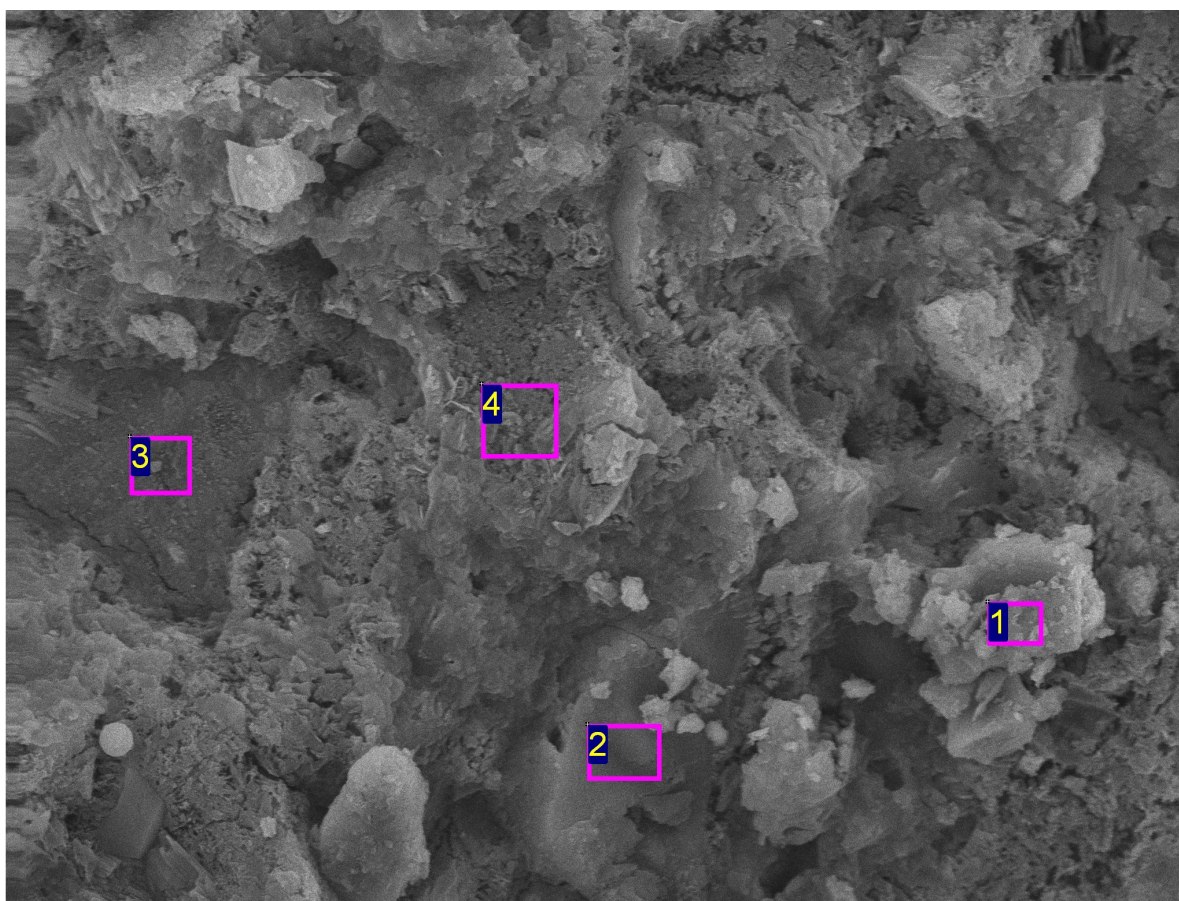
60µm

Electron Image 1

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	Na	Al	Si	Ca	Total
1	Yes	4.80	21.12	56.35	17.73	100.00
Mean		4.80	21.12	56.35	17.73	100.00
Std. deviation		0.00	0.00	0.00	0.00	
Max.		4.80	21.12	56.35	17.73	
Min.		4.80	21.12	56.35	17.73	

All results in weight%



30µm

Electron Image 1

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	5.97	47.46	7.40	3.77	21.05	8.69		5.65	100.00
Spectrum 2	Yes		33.82	2.24	6.82	10.79	22.04	1.47	22.82	100.00
Spectrum 3	Yes	7.48	51.25		10.25	1.68	27.02		2.32	100.00
Spectrum 4	Yes	6.13	50.42		5.48	10.29	25.88		1.81	100.00
Max.		7.48	51.25	7.40	10.25	21.05	27.02	1.47	22.82	
Min.		5.97	33.82	2.24	3.77	1.68	8.69	1.47	1.81	

All results in weight%