UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Caracterización micro y macroestructural de los efectos de la incorporación de escoria de acero como sustitución parcial del cemento en morteros de cemento hidráulico

Carlos Fernando Herrera Corrales

Trabajo de grado presentado para optar al título de Magíster en Ingeniería

Directora
Alba Nury Gallego Hernández, Doctor (PhD) en Ciencias de la Tierra y Ciencias Geo Ambientales

Codirector
Edwin Fabián García Aristizábal, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Herrera , 2024)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Herrera Carlos F. (2024). *Caracterización micro y macroestructural de los efectos de la incorporación de escoria de acero como sustitución parcial del cemento en morteros de cemento hidráulico* [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

creative commons BY NC SA

Seleccione posgrado UdeA (A-Z), Cohorte XXXVI.

Grupo de Investigación Infraestructura (GII).

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Vicerrectoría de Docencia
Sistema de Bibliotecas
Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi padre Carlos, mi madre Gloria y mi hermana Carolina, mis tres grandes maestros, quienes con su amor incondicional me han enseñado a perseguir mis sueños.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, principalmente a mi hermana Carolina, quien ha estado de cerca durante este camino, gracias al apoyo incondicional de ustedes es que he podido llenarme de valor y motivación para afrontar este proyecto.

A (Meu bem) Maria Paula quien, con todo su amor, cada día me ha enseñado a escuchar, entregar, recibir y amar cada circunstancia durante este proceso.

A mi directora y maestra Alba Nury Gallego, por su paciencia y dedicación en su quehacer como docente, gracias a sus enseñanzas para la profesión y la vida.

A mi codirector y maestro Edwin García, por su dedicación y acompañamiento en todos los procesos, gracias por todos los conocimientos que me brindó durante este tiempo.

A mis compañeros de estudio, Roxana, Daniel y especialmente Magali, quienes en cada conversación y compartir en medio de tinto y aromática me transmitieron nuevas ideas y conocimiento.

Al Grupo de investigación en infraestructura por su apoyo económico y compromiso con la investigación durante la ejecución de este proyecto, sin sus aportes no hubiese sido posible llevar a cabo este proyecto.

Al Semillero de Investigación en Infraestructura y todos los estudiantes quienes cada día me llenan de inspiración y motivación para continuar aprendiendo y transmitiendo aprendizajes.

A la Universidad de Antioquia, en especial a la Escuela Ambiental por permitir el espacio y uso de los laboratorios para desarrollar los proyectos de investigación.

Tabla de contenido

Capítulo I: Introducción y objetivos 14

Capitulo II: Marco teórico 17

2.1. Mortero de cemento 17

2.2. Durabilidad de los concretos y morteros 19

2.3. Ataque de sulfatos 20

2.4. Ensayos para evaluar el ataque de sulfatos: 22

2.5. Adiciones en morteros 22

2.6. Escorias de acero 24

2.7. Polvo de Escorias de Horno de Arco Eléctrico (EAFD) 26

2.8. Escorias usadas como sustitución del cemento en mezclas de morteros 27

2.9. Caracterización física de morteros 28

2.9.1. Propiedades en estado fresco de los moteros 28

2.9.2. Propiedades en estado endurecido de los morteros: 28

2.10. Caracterización petrográfica de morteros 29

2.10.1. Microscopía óptica 29

2.10.2. Microscopía electrónica, SEM 32

Capitulo III: Metodología 34

3.1. Caracterización de escoria de acero 34

3.2. Materiales, dosificación y mezclas de morteros y barras 36

3.3. Dosificación de cubos y barras de mortero 37

3.4. Montaje e inmersión de barras: 39

3.5. Caracterización física de los morteros 40

3.6. Caracterización petrográfica de los morteros 42

Capitulo IV: Resultados y discusión 44

4.1. Caracterización de la escoria de acero 44

4.1.1. Caracterización física 44

4.1.2. Caracterización química de la escoria 49

4.2. Caracterización física y mecánica de los morteros 52

4.2.1. Fluidez de la mezcla 54

4.2.2. Resistencia a la compresión 58

4.3. Petrografía de mortero. 61

4.3.1 Análisis petrográfico de cubos de mortero. 61

4.3.2. Análisis petrográfico de barras de mortero. 80

4.2. Discusión de resultados 90

Capitulo V: Conclusiones 94

Referencias 97

Lista de tablas

Tabla 1. Compuestos químicos formados en el proceso de cocción del Clinker. Fuente: modificado de [ACI Education Bulletin E13-13]. 18

Tabla 2. Clasificación de aditivos para el concreto. Fuente: modificado de (Asocreto, 2010) y (Metha & Monteiro, 2006). 23

Tabla 3. Clasificación de adiciones minerales para concretos y morteros. Fuente: modificado de (Asocreto, 2010) y (Metha & Monteiro, 2006). 24

Tabla 4. Forma de las partículas. Tomado de y modificado de Hewlett, P., & Liska,2003.31

Tabla 5. Mortero de cemento. Porcentajes de sustitución de escoria por cemento. 37

Tabla 6. Barra de mortero. Porcentajes de sustitución de escoria por cemento. 37

Tabla 7. Resultado del análisis de tamaño de partícula por rayos láser, ATP 46

Tabla 8. Resultado del ensayo de área superficial por método BET 49

Tabla 9. Análisis de fluorescencia de rayos X - FRX 50

Tabla 10. Resultados de ensayo de fluidez en mezclas para elaboración de cubos de mortero. 54

Tabla 11. Resultados de resistencia a la compresión 58

Tabla 12. Relación arena:pasta:vacios en secciones de morteros 73

Lista de figuras

Figura 1. Proceso de hidratación del cemento portland. Elaboración propia..... 18

Figura 2. Esquema de ataque de los sulfatos en el concreto. Elaboración propia..... 21

Figura 3. a) Producción mundial de acero crudo Elaboración propia. Datos tomados de 2022 World Steel Asociation in Figures. b) Estimado de generación de escoria de acero... 25

Figura 4. Producción de acero y generación de EAFD. Elaboración propia..... 26

Figura 5. Esquema: etapas de desarrollo del proyecto. Elaboración propia..... 34

Figura 6. Esquema de compactación para vaciado de cubos de mortero. 38

Figura 7. Esquema de compactación para vaciado de barras de mortero..... 39

Figura 8. Esquema de montaje e inmersión de barras en ataque de sulfato de sodio..... 40

Figura 9. Montaje y ejecución del ensayo de fluidez en mesa de flujo..... 41

Figura 10. Preparación y montajes de cubos de mortero para el ensayo de resistencia a la compresión 41

Figura 11. Esquema de extracción de secciones delgadas para a) cubos y b) barras de mortero. 42

Figura 12. Equipos de análisis de secciones en a) Microscopio petrográfico Olympus y Microscopio electrónico de barridoJEOL JSM 6490 LV..... 43

Figura 13. Escoria de acero y cemento hidráulico observados con un objetivo de 10 aumentos en un estereomicroscopio. a) Escoria de acero que pasa tamiz No 200. b) Cemento gris referencia Argos c) Cemento gris referencia Argos y escoria de acero d) Cemento gris referencia Argos mezclado por agitación manual con escoria de acero..... 45

Figura14. Escoria de acero disgregada, después de prueba de granulometría por tamizado, 100% de las partículas con tamaño inferior a 0.075 mm. 46

Figura 15. Curva granulométrica y distribución volumétrica de tamaño de partícula de la escoria de acero. 48

Figura 16. Difractograma de muestra en polvo escoria de acero. 50

Figura 17. Electrones retrodipersados SEM, escoria de acero, muestra en polvo..... 51

Figura 18. Análisis composicional SEM-EDX puntual en partículas de escoria de acero.. 51

Figura 19. Curva granulométrica de la arena estandarizada para las mezclas de mortero.. 52

Figura 20. Arena en el estereomicroscopio. a) y b) agregado de arena c) minerales con foliación del grupo de las micas d) diferentes granos de arena estandarizada, incluidos fragmentos de roca..... 53

Figura 21. Calibración de la fluidez para mezcla control M0. 54

Figura 22. Porcentaje de fluidez en estado fresco de las mezclas de mortero..... 56

Figura 23. Tiempos de fraguado e inmersión de los cubos de mortero. 57

Figura 24. Consistencia de cubos con sustituciones de cemento por escoria 24 horas después del vaciado. 58

Figura 25. Resistencia a la compresión de cubos de mortero a los 28 días de curado. 59

Figura 26. Falla de cubos de mortero a los 28 días de curado..... 60

Figura 27. Comparación de los cambios físicos y mecánicos entre los morteros adicionados con escoria de acero y su blanco. 61

Figura 28. M0 estereomicroscopio. Fractura de cubo M0. 62

Figura 29. M10 estereomicroscopio. Fractura de cubo M10..... 63

Figura 30. M20 estereomicroscopio. Fractura de cubo M20..... 63

Figura 31. M30 estereomicroscopio. Fractura de cubo M30..... 64

Figura 32. Cristales de biotita (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados. 65

Figura 33. Cristales de muscovita (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados. 65

Figura 34. Cristales de cuarzo (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados. 66

Figura 35. Cristales de plagioclasa (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados. 67

Figura 36. Cristales de anfíbol (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados 68

Figura 37. Grano con diferentes fases minerales – Fragmento de Roca (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados. 68

Figura 38. Granos de material amorfo (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados. 69

Figura 39. Sección delgada M0 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 50x. 70

Figura 40. Sección delgada M10 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 50x. 70

Figura 41. Sección delgada M20 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 50x. 71

Figura 42. Sección delgada M30 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 50x. 71

Figura 43. Inducción de fisuración paralelo a los planos de foliación de micas. 72

Figura 44. Endurecimiento de pasta al interior de granos de biotita. 72

Figura 45. Contraste entre pastas (cemento+escoria) M0 y M30..... 74

Figura 46. Tipos de fisuras en pasta y granos de la arena. Secciones delgadas de cubos. .. 75

Figura 47. Difractograma. Cubo de mortero M0..... 75

Figura 48. Difractograma. Cubo de mortero M30..... 76

Figura 49. Electrones retrodispesaro en cubo M0 a) 70x b) Grano de Bt 1000x c) Fases minerales del cemento 2000x. 77

Figura 50. Electrones retrodispersados. Cubos de mortero M0, M5, M10, M15, M20 y M30..... 78

Figura 51. Mapeo composicional EDX. Cubo M0..... 79

Figura 52. Mapeo composicional EDX. Cubo M30. 80

Figura 53. Barras de morteros BM0, BM10 y BM20 después de dos meses de inmersión en solución de sulfato de sodio. 81

Figura 54. Sección delgada BM0 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 20x. 81

Figura 55. Sección delgada BM10 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 20x. 82

Figura 56. Sección delgada BM20 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 20x. 82

Figura 57. Cambios en la pasta de las barras expuestas a sulfato de sodio. 83

Figura 58. Formación de microfisuras en el agregado de las barras de mortero expuestas a sulfato de sodio. 84

Figura 59. Micrografías SEM barras de mortero expuestas a ataque de sulfato de sódio. BM0, BM10 y BM20. 84

Figura 60. Mapeo composicional EDX. Barra BM0. 85

Figura 61. Mapeo composicional EDX. Barra BM10. 86

Figura 62. Mapeo composicional EDX. Barra BM20. 87

Figura 63. Comparación entre la aparición y propagación de fisuras en las barras a) atacadas con respecto a los morteros b) que no fuero atacas. 88

Figura 64. Diferencias entre a) color de pasta en los bordes de las barras y b) la pasta al interior de las barras de mortero expuestas. 89

Figura 65. Abertura de plano de foliación de mineral de biotita. 90

Figura 66. Relación entre el tiempo inmersión en agua y resistencia a la compresión. 91

Figura 67. Relación entre propiedades macroestructural y microestructurales. 92

Resumen

En este trabajo de investigación, se compararon los efectos micro y macroestructurales de la incorporación de escoria de acero en distintas mezclas de morteros analizando el comportamiento de sus propiedades en estado fresco y endurecido. Porcentajes de sustitución en peso de cemento por escoria de acero del 0, 5, 10 15, 20 y 30 % fueron estudiados a través de la caracterización de cubos y barras de morteros.

La escoria de acero empleada en esta investigación fue caracterizada físicamente mediante pruebas de inspección visual, granulometría, densidad, área específica y químicamente con pruebas de Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Difracción de Rayos X (DRX). La descripción física permitió encontrar una distribución de tamaños de partícula entre 0.1 y 140 μm y en la parte química se encontró que la escoria tiene una composición significativa en metales con Zn (57.97%) y Fe (21.32%) como componentes principales. Estas características permitieron clasificar la escoria de acero como polvo de escoria de acero de horno eléctrico - EAFD.

Cubos de 50 x 50 mm con porcentajes de sustitución de 0, 5, 10 15, 20 y 30 % fueron elaborados con arena estandarizada y caracterizados física y petrográficamente. Para la caracterización física, en cada tipo de mezcla se evaluó la fluidez en estado fresco y la resistencia a la compresión en estado endurecido. La fluidez de las mezclas respecto a la mezcla control se mantuvo casi igual para el 5 % de sustitución y cayó solo un 10 % para el 10 % de sustitución. Los resultados de resistencia a la compresión mostraron que sustituciones de cemento por escoria de acero hasta un 10 % tal vez servirían en aplicaciones no estructurales. Los porcentajes del 15, 20 y 30% de sustitución presentaron disminución superior al 15 % en el desempeño de las propiedades con respecto a la muestra control M0.

La caracterización petrográfica se hizo a partir de fragmentos y secciones delgadas tomadas de los cubos después de la falla por compresión. Se llevó a cabo un análisis con microscopía óptica y electrónica en las muestras con porcentajes de sustitución del 0, 10 y 20 %. Las características superficiales de apariencia, forma y color de los fragmentos de los cubos se describieron con ayuda del estereomicroscopio. Mediante secciones delgadas, se analizó la textura, forma, fases minerales, reacciones, efectos, distribución e interacción entre la pasta (Cemento+Escoria), el agregado, vacíos. En el microscopio electrónico de barrido - SEM se encontraron mapas composiciones en zonas intersticiales de interés y se compararon las fases cristalinas de la pasta (Cemento+Escoria) desarrolladas durante la hidratación del cemento. Los resultados mostraron la correspondencia entre el aumento de sustitución de cemento por escoria con la pérdida de adherencia entre el agregado y las pasta, además, se encontró que la arena está compuesta principalmente por cuarzo (43.35 %), Fragmentos de roca (31.45 %) y biotita Bt (11.26 %). En los granos de biotita se evidenció tendencia preferencial a fallar en la dirección de la foliación, además de la inclusión de pasta al interior de los planos abiertos. Las micrografías SEM mostraron los cambios en la presencia de microporos y la ausencia de fase como la Ettringita.

Por otro lado, barras de 25 x 25 x 100 mm con porcentajes de sustitución de cemento por escoria del 0, 10 y 20 % fueron elaborados con arena estandarizada y caracterizadas

petrográficamente. Las barras de mortero fueron colocadas en inmersión en solución de agua con sulfato de sodio Na_2SO_4 (al 50 %), con control de PH y agitación constante. Se evaluó a nivel microestructural con secciones delgadas y fragmentos de las barras la respuesta de las mezclas expuestas a ambientes con presencia de iones de sulfato, analizando condiciones de deterioro en los diferentes tipos de mezcla. Las barras mostraron diferencias significativas en la pasta de cemento, desde los extremos o bordes hacia el interior de la sección delgada se notaron cambios en los colores de la pasta (Cemento+Escoria), además, aparecieron microfisuras al interior de los granos de arena como consecuencia de la interacción con el ataque en la solución. En el SEM se encontró el desarrollo de cristales cúbicos de sal y no fue posible identificar las fases del cemento en la matriz de la muestra control que fue expuesta, Barra de Mortero con 0 % de sustitución (BM0). El análisis composicional arrojó la presencia de elementos como sodio, azufre y zinc en las mezclas con sustituciones. El análisis petrográfico permitió contrastar y correlacionar el desempeño microestructural de la matriz del mortero con las propiedades físicas y mecánicas a nivel macro.

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten valorar la posibilidad de darle una disposición final a las escorias de acero dentro de materiales de construcción en aplicaciones de uso no estructural como el mortero de cemento, de manera que se reduzca el impacto ambiental y, como consecuencia, se reduzca la cantidad de cemento utilizado en obras y haya una contribución con los Objetivos de Desarrollo Sostenible - ODS.

Palabras clave: petrografía de morteros, mortero de cemento hidráulico, escoria de acero.

Abstract

In this research work, micro and macrostructural effects of the steel slag in different mortar mixtures were compared by analyzing the behavior of their properties in the fresh and hardened state. Percentages of 0, 5, 10, 20 and 30 % were studied through the characterization of mortar cubes and bars.

The steel slag used in this research was characterized physically and chemically. Physical analyses were used visual inspection, granulometry, density and specific area tests. On the other side, for chemical analysis were used X-Ray Fluorescense (FRX) and X-Ray Diffraction (DRX) tests. The physical description allowed identifying a particle size distribution between 0.1 and 140 μm and the chemical component steel slag had a significant composition in metals with Zn (57.97%) and Fe (21.32%) as main components. These characteristics allowed classifying the steel slag as Electric Arc Furnace Powder EAFD.

Cubes of 50x50 mm with substitution percentages of 0, 5, 10, 15, 20 and 30 % were made with standardized sand and characterized physically and petrographically. For the physical characterization. The flow of the mixtures remained almost constant for the 5% substitution and for the 10% substitution decreased. The compressive strength showed that up to 10% substitutions the mortar could be evaluated for use in non-structural applications.

The petrographic characterization was made through fragments and thin sections taken from the cubes after compression failure. An analysis with optical and electron microscopy was carried out on samples with substitution percentages of 0, 10 and 20%. The surface characteristics such as appearance, shape and color of the cube's fragments were described using a stereoscope. Through thin sections, texture, shape, mineralogical phases, reaction, effects, distribution and itereaction between the paste (cement+slag), aggregate, voids were analyzed. In the SEM, compositional maps were found in inerstitia zones of interest, and the crystalline phases of paste (cement+slag) developed during cement hydration were compared. The results showed that there is relation between the increase of cement substitution by slag with decrease of adherence between aggregate and paste. In addition, sand was found that is mainly composed of quartz (43.35%), rock fragments (31.45%) and biotite (11.26%). Biotite grains showed a preferential orientation in the grain's foliation direction, in addition to the inclusion of paste inside the open planes. SEM micrographs showed changes in the presence of micropores and the absence of phases such as ettringite.

On the other hand, bars of 25x25x100 mm with percentages of cement substitution by slag of 0, 10 and 20% were made with standardized sand and petrographically characterized. The mortar bars were immersed in water solution with sodium sulfate Na_2SO_4, under controlled PH and agitation conditions. Response of mixtures exposed to environments with the presence of sulfate ions was evaluated at the microstructural level with thin section and bars fragments. Bars showed significant differences in the cement paste, from the ends of the edges towards the interior of the thin section, changes in the interference colors of the paste (cement+slag) were detected. Moreover, microcracks come into viewed inside the consequence of the interaction with the solution. The SEM exhibited the development of

cubic salt crystals, and it was not possible to identify the cement phases in the matrix of control sample BM0 exposure. Compositional EDX showed the presence of sodium sulfate and zinc oxide in the mixtures with substitutions. The petrographic analysis allowed contrasting and correlating the microstructural performance of the matrix with the physical an mechanical properties at the macro scale.

The results obtained in this research allow us to evaluate the possibility of providing a final disposal for steel slag in construction material in non-structural applications such a cement mortar, in order to reduce the environmental impact and, as a consequence, reduce the amount of cement used in construction and contribute to development toward the ODS.

Keywords: mortar petrographic, hydraulic cement, steel slag.

Capítulo I: Introducción y objetivos

La demanda de infraestructura resiliente y sostenible necesaria para la adaptación al cambio climático convierten al cemento por su versatilidad y durabilidad en un material protagonista para atender eventos climáticos cada vez más fuertes (Ferro Beltrán, 2021). Sabemos por cifras de la industria mundial de cemento que en los últimos años son más de 4000 millones de toneladas de cemento las que se producen anualmente, esto hace que el cemento en forma de concreto y mortero sea responsable de una parte importante de las emisiones globales por CO_2 (Ficem, 2019; Galusnyak et al., 2022). Por esa razón, la industria cementera se encuentra actualmente comprometida con aportar en la reducción de emisiones de Gas de Efecto Invernado (GEI) a través de diferentes estrategias, buscando contribuir con una producción de cemento más limpia en términos de generación de CO_2 y que permita suavizar el cambio climático acelerado, que de acuerdo con Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), podría llegar a superar la temperatura media global llegando hasta 2 ºC y generando problemas irreversibles (Ficem, 2020; Ficem & Procemco, 2021; IPCC, 2021; Marsh et al., 2022; Kusuma et al., 2022; Rocha et al., 2022)

Por otro lado, la alta demanda del cemento trae consigo no solo el problema por alta emisión de CO_2 sino también la necesidad de extraer caliza, arcilla, roca, arena, entre otros recursos de índole geológica y clasificados como recursos no renovables (Kirthika et al., 2020). La presión y agotamiento de estos recursos naturales empieza a ser evidente cerca de grandes centros poblados donde la extracción desenfrenada de arena de ríos o canteras, han encrudecido problemas ambientales (Kirthika et al., 2020). Por citar algunos ejemplos: la sobreexplotación de arena de río puede generar problemas de estabilidad y reducción de niveles freáticos en los ríos, así como daños en ecosistemas aguas abajo e incluso amenaza de disponibilidad de agua a poblaciones próximas (Srivastava & Singh, 2020). La explotación de roca en canteras suele realizarse por medio de procesos de minería a cielo abierto, donde se intervienen profundamente el paisaje y en consecuencia la vegetación y flujos de aguas; podría también, de no ser bien manejado, un desencadenante de proceso de inestabilidad en las laderas (Srivastava & Singh, 2020). Así pues, investigaciones que de forma directa o indirecta apoyen la búsqueda de alternativas para contar con los materiales de construcción que requiere la población, entre ellos el cemento y los agregados, y que además sean materiales en cuya producción haya una disminución de emisiones de CO_2 y menos impactos ambientales en los territorios, es parte de lo que tanto la industria cementera como los investigadores buscan hoy en día (Sun et al., 2021).

Al mismo tiempo, la industria de acero, en su proceso de producción, por cada tonelada de acero crudo genera aproximando 200 kilogramos de residuos y escorias siderúrgicas (Rashad, 2022), algunas de esas escorias, son consideradas residuos peligros por su alto contenido de metales contaminantes como Zn, Fe, Mn, Pb (Nair et al., 2022). Estos residuos ocupan grandes áreas en forma de vertederos desperdiciando recursos y contaminando en forma de lixiviados el suelo y ecosistemas en el ambiente (Pang et al., 2022). Una alternativa a la disposición de estas escorias en vertederos sería su reutilización como materia prima en la producción de materiales a base de cemento (Martins et al., 2021), y de esa forma contribuir desde estrategias limpias de obtención de recursos, por ejemplo, aumentando el uso de

adiciones minerales en la producción de cemento, y por tanto tener una reducción del factor clinker. Adicional a la reducción del uso de clinker, es posible que la estabilización de estos residuos en matrices cementantes mediante la solidificación sea una solución más sostenible para su disposición final, comúnmente realizada en vertederos. Para interés de esta investigación las escorias de acero presentan potencial como material suplementario de cemento y agregado, algunos estudios reportan mejoras de las propiedades físico-mecánicas (Martins et al., 2021)(Nair et al., 2022).

Adicionalmente, en la actualidad el estudio del cemento con adiciones va más allá del estudio de las propiedades a edades tempranas y busca entender el comportamiento de cementos en condiciones de deterioro, por ejemplo, ambientes con presencia de iones de sulfato. Herrera-Mesen et al., 2020, evaluó la influencia de ataques acelerados de sulfato a diferentes edades de exposición como mecanismo de degradación para estudiar la durabilidad de morteros; Colman et al., 2021, analiza el ataque de sulfatos en mortero con agregado reciclado a nivel microestructural; Hou et al., 2022, estudia la resistencia de mezclas adicionadas con humo de sílice y nanosílice frente ataques agresivos de sulfatos. Es claro entonces que no solo se realizan estudios convencionales, o establecidos por normas de construcción, sino que se evalúa de forma detallada el comportamiento de diferentes dosificaciones y adiciones innovadoras que podrían tener un gran potencial. Estás adiciones eventualmente mejoran las propiedades de las fases cementantes o sirven como llenante de modo que se disminuye la presión sobre materia prima virgen y se da una solución de disposición adecuada a otros recursos; es decir, se apoyan procesos de economía circular.

En esta investigación se busca evaluar los efectos del comportamiento físico-mecánico y químico de morteros preparados con adición de escorias de acero; esta investigación aportará en la caracterización de morteros con escorias de acería, de manera que su posible reincorporación en la cadena productiva sea una alternativa y se logren beneficios económicos con el ahorro de recursos, promoción de la economía circular, su contribución a la reducción de emisiones de CO_2 y al desarrollo de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles ODS.

Objetivos del proyecto

General

Evaluar los efectos en las propiedades físico mecánicas de morteros de cemento hidráulico con incorporación de escoria de acero y su relación a nivel micro y macroestructural.

Específicos

- Caracterizar las propiedades físicas y químicas de una escoria de acero a través de pruebas de análisis de tamaño de partícula, gravedad específica, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, microscopía óptica y microscopia electrónica de barrido.

- Analizar el efecto de la incorporación de la escoria de acero en la fluidez de las mezclas de mortero en estado fresco.
- Evaluar la respuesta mecánica de los morteros con y sin incorporación de escoria de acero.
- Caracterizar el deterioro físico y químico de los morteros con y sin incorporación de escoria de acero frente al ataque de sulfato.
- Caracterizar petrográficamente los componentes del mortero con y sin incorporación de escoria de acero.

Capitulo II: Marco teórico

Desde la antigüedad la curiosidad y pesquisa del ser humano por encontrar nuevos materiales de construcción dan testimonio y soportan los avances en infraestructura de las ciudades contemporáneas. El desarrollo del mortero de cemento actual se remite a pruebas de ensayo y error que desde siglos atrás los egipcios, griegos y romanos comenzaron a experimentar en la concepción de sus estructuras y monumentos (Hewlett, P., & Liska, 2003; Sánchez de Guzmán, 2001). Esas estructuras antiguas y los edificios modernos demuestran como el cemento a lo largo de la historia se ha convertido en un material esencial en la construcción. En este capítulo se abordan algunos conceptos acerca del mortero de cemento hidráulico, la forma de caracterizar este material y su comportamiento frente a modificaciones en sus componentes y respuesta frente a ataque por sulfatos, un ataque que se puede presentar en ambientes de la región (Arango-L., 2022).

2.1. Mortero de cemento

El mortero es un material de construcción formado de la mezcla de un componente cementante, arena, agua, y adiciones (Zhang, 2011). El mortero como material de construcción tiene múltiples aplicaciones, entre las cuales están: nivelación de pisos, protección de taludes, recubrimiento de elementos estructurales y unión de elementos de mampostería, siendo esta última la aplicación con mayor uso (Mamlouk & Zaniewski, 2009). El mortero se clasifica según el tipo de cementante en mortero de cemento, mortero de cal o mortero de cemento y cal (Mamlouk & Zaniewski, 2009). El mortero de cemento, objeto de esta investigación, se forma a partir de la reacción química del cemento hidráulico con el agua, permitiendo la unión del agregado fino con la pasta formada hasta la consolidación de un material sólido (Metha & Monteiro, 2006).

- **Cemento hidráulico:** el cemento hidráulico es un material aglutinante con propiedades de adherencia y cohesión que permiten la unión de fragmentos minerales para formar un material sólido y compacto (Metha & Monteiro, 2006). El cemento hidráulico o cemento portland, es la mezcla de clinker (polvo gris fino), producto de la molienda y calcinación (1400 °C) de óxido de calcio, sílice, alúmina, óxido de hierro, más pequeñas adiciones de sulfato de calcio (ACI Education Bulletin E3-13, 2013). El cemento hidráulico es el resultado del proceso de clinkerización y está compuesto esencialmente por los óxidos presentados en la Tabla 1 (ACI Education Bulletin E3-13, 2013).

  La alita (Silicato tricálcico - C_3S), es de reacción rápida y como fase principal contribuye al desarrollo de la resistencia mecánica a edades tempranas del fraguado; la belita (Silicato dicálcico - C_2S) es de reacción lenta, aporta al desarrollo de resistencia de la pasta a partir de siete días de iniciado el proceso de mezcla; ambas fases representan aproximadamente un 75 % del cemento (Metha & Monteiro, 2006). El aluminato de calcio (C_3A) y el ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), componen entre un 5-15 % y contribuyen al calor de hidratación y la obtención de alta resistencia inicial respectivamente (Metha & Monteiro, 2006). El cemento hidráulico al ser mezclado con agua forma una pasta capaz de fraguar y endurecer debido a reacciones

exotérmicas de hidrólisis e hidratación presentes en la mezcla, dando lugar a la formación de productos hidratados estables y altamente resistentes (Tobón, 2011).

Tabla 1. Compuestos químicos formados en el proceso de cocción del Clinker. Fuente: modificado de [ACI Education Bulletin E13-13].

Compuesto	Oxido	Abreviatura[a]
Silicato tricálcico	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF

[a] Nomenclatura empleada en la química del cemento. Abreviaciones para los compuestos: CaO: C, SiO_2:S, Al_2O_3:A, Fe_2O_3:F

En la Figura 1 se observan las fases silicato de calcio hidratado (C-S-H), hidróxido de calcio (CH-portlandita) y sulfoaluminato calcio (C-A-C-H-ettringita) que se forman durante el proceso de hidratación del cemento hidráulico (Metha & Monteiro, 2006). Esta reacción de hidratación se da por la disolución de las fases en sus iones constituyentes, formando hidratos en la solución saturada y debido a la baja solubilidad de los compuestos, se da la precipitación de los hidratos, estos hidratos solo se pueden observar con el uso de técnicas de microscopia (Metha & Monteiro, 2006). Para lograr el proceso de hidratación el cemento hidráulico, y la formación de las fases C-S-H, Portlandita y ettringita, el cemento debe cumplir con las características especificadas en la normas ASTM C150/NTC 121 antes de ser mezclado con agua natural (Kosmatka et al., 2008).

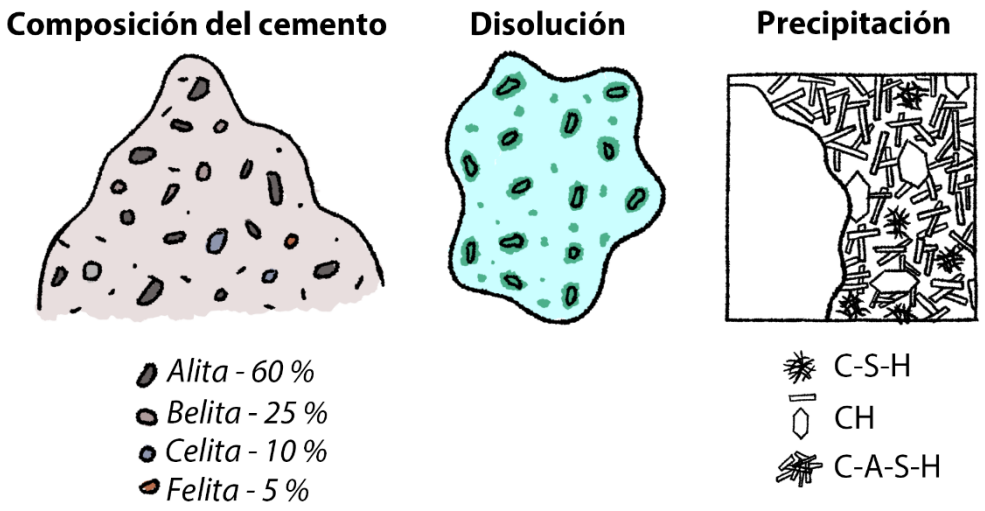


Figura 1. Proceso de hidratación del cemento portland. Adaptado de Metha & Monteiro, 2006.

- **Agua:** el agua en la elaboración de morteros permite que el cemento inicie el proceso de hidratación, se mezcle con la arena y finalmente endurezca como un sólido continuo (Metha & Monteiro, 2006). El agua para uso de fabricación de morteros deber ser pura, sin color y olor, según las normas ASTM C1602/ NTC 3459 (AIS, 2010), el agua usada en la mezcla debe ser clara, de apariencia limpia y libre de sustancias perjudiciales como aceites, sales, materiales orgánicos entre otros que puedan ser dañinos para la formación del compuesto (Kosmatka et al., 2008).

- **Arena (agregado):** la arena son partículas sólidas con tamaños comprendidos entre 0.075 y 4,75 mm, suele ser el resultado de proceso de meteorización, trituración de roca en cantera o recuperación de material seleccionado por cauces de agua (Metha & Monteiro, 2006). Además del cemento y el agua, la arena en la composición del mortero constituye un factor determinante en la economía, trabajabilidad y durabilidad del mortero, pues en volumen y masa es el mayor constituyente (Asocreto, 2010). Las propiedades de la arena tienen gran influencia en el comportamiento del mortero, por ejemplo: la granulometría entrega información acerca de la distribución de tamaño de las partículas, lo que determina la compacidad y demanda de agua de la arena; la forma y textura de las partículas brinda información sobre la trabajabilidad y adherencia de las partículas. Todas las arenas para uso de concreto y morteros deben estar normalizadas según la ASTM-C144/NTC 2240 (AIS, 2010) (Gutierrez de López, 2003).

2.2. Durabilidad de los concretos y morteros

La durabilidad de concretos y morteros se define como la capacidad que tienen estos para resistir las condiciones para las cuales fueron diseñados a lo largo de su vida útil (A.M. Neville, 1997). Existen múltiples definiciones de durabilidad, sin embargo, todas están asociadas al desempeño del mortero durante su vida útil dentro de la estructura, por ejemplo:

Según la ACI Comité 201, la durabilidad del mortero de cemento hidráulico es definida como la habilidad que tiene el mortero para resistir meteorización, ataques químicos, abrasión, o cualquier otro proceso de deterioro. Un mortero durable conservará su forma original, calidad y condiciones de servicio iniciales cuando es expuesto en su entorno de servicio previsto (Metha & Monteiro, 2006).

Cualquiera que sea la definición, la durabilidad de los concretos y morteros ha venido tomando gran importancia en el sector de la construcción debido a que involucra todas las etapas del proceso constructivo como: diseño, materiales, construcción, uso y mantenimiento (Gómez Cortés, 2022). Todas estas etapas tienen una relación directa con el deterioro del mortero en el tiempo, bien sea de carácter conceptual, físico, mecánico, químico o biológico, el resultado de la interacción entre los agentes del medio ambiente cambia la microestructura del mortero y consecuentemente sus propiedades (Sánchez de Guzmán, 2006). El diagnóstico o interpretación de la durabilidad se convierte en la actualidad en una rama del conocimiento necesario para entender las patologías que conllevan a la pérdida de funcionalidad de las

estructuras, en especial en aquellas ciudades donde hay infraestructura que por su antigüedad requiere de algún tratamiento o reparación (Arango-L., 2022). Es por ello, que un mortero alcanza el final de su vida de servicio cuando, bajo las condiciones de uso, presenta tal deterioro que su uso es inseguro o antieconómico (Metha & Monteiro, 2006). Entre los tipos de factores en el medio que afectan la durabilidad se encuentran los químicos, y entre ellos, el ataque de sulfatos ha sido reportado como uno de los que causa daños más severos (Sánchez de Guzmán, 2006).

2.3. Ataque de sulfatos

El ataque de sulfatos en concretos y morteros se puede dar de dos formas, a nivel interno cuando hay interacción entre los componentes químicos del cemento y los agregados; o nivel externo cuando hay exposición e interacción entre el mortero y ambientes con concentración de iones de sulfato (SO_4^{-2}). A este último se le conoce como ataque externo de sulfatos, External Sulfate Attack – ESA (Gómez Cortés, 2022). El ataque externo de sulfatos en morteros y concreto tiene como resultado la degradación del material debido a la reacción entre los productos hidratados del cemento y los iones de sulfato libres en el ambiente, provocando degradación de la microestructura, la resistencia mecánica y la estabilidad volumétrica (Hernández Moreno, 2019).

El origen de los iones de sulfatos se puede dar de forma natural o industrial. Entre los sulfatos de origen natural se encuentra sulfato de amonio (NH_4SO_4), sulfato de calcio ($CaSO_4$), sulfato de magnesio ($MgSO_4$), y sulfato de sodio (Na_2SO_4), los cuales se encuentran en suelos arcillosos y aguas freáticas. Los sulfatos de procedencia industrial como los sulfitos SO_3^{-2}, pueden aparecer en aguas residuales o aguas de procesos industriales (Sánchez de Guzmán, 2006). El Sulfato de sodio (Na_2SO_4), objeto de estudio en esta investigación es considerado agresivo para el cemento y su reacción aumenta con el aumento de la concentración del soluto (Gómez Cortés, 2022). El ataque de sulfatos puede manifestarse en forma de expansión y agrietamiento (cracking), y generalmente ocurre cuando:

- El mortero posee fisuras, lo que genera aumento de permeabilidad y por tanto aceleración del proceso de deterioro.
- Hay pérdida de cohesividad de los productos de hidratación del cemento y por tanto hay pérdida de masa y disminución de la resistencia (Hernández Moreno, 2019).

El mortero atacado por sulfatos presenta un aspecto blancuzco, el deterioro suele empezar en los bordes y esquinas y van seguidos de grietas y descascaramiento (Delayed) del mortero. La razón de este aspecto es que la esencia del ataque por sulfatos es la formación de sulfato cálcico y sulfoaluminato cálcico, ambos productos ocupan un volumen mayor que los compuestos a los que sustituyen, por lo que se produce una expansión y alteración del mortero endurecido (A.M. Neville, 1997).

- **Reacciones químicas en el ataque por sulfato:** asociadas al ataque de sulfato aparecen tres tipos de reacciones, la formación de yeso, ettringita y taumasita de acuerdo a las reacciones químicas expresadas en las ecuaciones (a), (b) y (c).

$$CH_{(limo)} \xrightarrow[H_2O]{SO_4^{=}} CSH_{2(yeso)} \quad \text{(a)}$$

$$C_3A \cdot CS \cdot H_{12\,(monosulfato)} \xrightarrow[Ca(OH)_2H_2O]{SO_4^{=}} C_3A \cdot 3C\bar{S} \cdot H_{32(ettringita)} \quad \text{(b)}$$

$$C-A-H \xrightarrow[H_2O]{SO_4^{=}} C_3A \cdot 3C\bar{S} \cdot H_{32(ettringita)} \quad \text{(c)}$$

Dependiendo del tipo de catión asociado a la solución de sulfato (es decir, Na^+, K^+, o Mg^{2+}), el silicato de calcio hidratado C-S-H presente en la pasta de cemento portland hidratada pueden convertirse en yeso por ataque de sulfatos. En Figura 2 se ilustra el proceso de ataque del sulfato en mortero, los iones entran reacción con la pasta y se produce ettringita y yeso expansivo que desintegra la matriz.

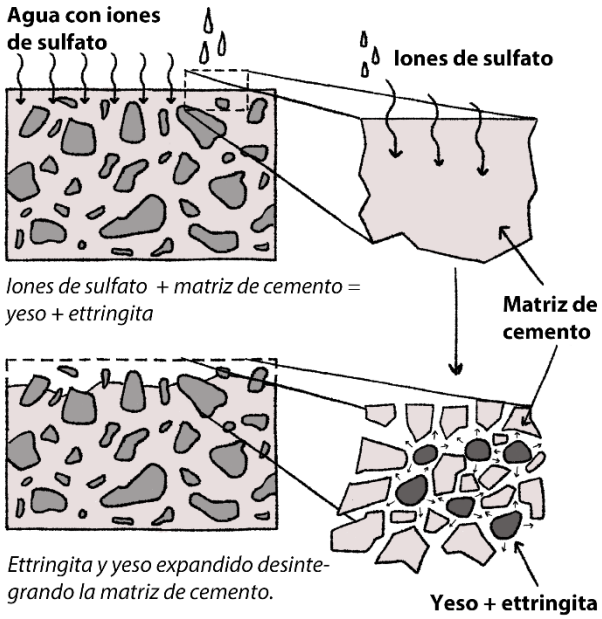


Figura 2. Esquema de ataque de los sulfatos en el concreto. Adaptado de Metha & Monteiro, 2006.

De acuerdo con algunos autores ((A.M. Neville, 1997); Hernández Moreno, 2019; Gómez Cortés, 2022) las consecuencias del ataque de sulfatos no sólo producen degradación por expansión y fisuración; sino también, una reducción en la resistencia mecánica debido a la pérdida de cohesión en la pasta del cemento. Lo anterior también conlleva una pérdida de adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de los agregados. El deterioro por lo general comienza en las aristas, siguiendo una microfisuración y una fisuración que astilla el

mortero y lo reduce a una condición friable y blanda (Gómez Cortés, 2022). Entre los factores que más contribuyen con la acción expansiva de los sulfatos, se encuentran los siguientes:

- Condiciones de exposición del mortero con iones de sulfato.
- Presencia de humedad.
- Permeabilidad del mortero, que influye en la velocidad de transporte de iones de sulfato.
- Composición del cemento, principalmente el tipo y cantidad de cemento (contenido de C_3A)

2.4. Ensayos para evaluar el ataque de sulfatos:

Existen múltiples ensayos para medir el ataque externo de sulfatos en morteros. Los más comunes consisten en inmersiones de barras de mortero en soluciones de sulfato, permitiendo la difusión de iones de sulfato a través de las muestras. La norma ASTM C1012 especifica un método que se usa para determinar el cambio en longitud que experimentan barras de mortero sumergidas en una solución de sulfato, bien sea para morteros de cemento hidráulico o de mezclas de este cemento con puzolanas o escoria (Jabbour et al., 2022).

El ataque de sulfato es un ataque lento que puede tardar en ocasiones años en aparecer, por lo cual se opta por hacer en laboratorio ensayos acelerados que permiten tener una evaluación de las reacciones en periodos de tiempo más cortos (Jabbour et al., 2022). El ataque acelerado de sulfatos se logra:

1. Utilizando altas concentraciones de solución de sulfato (por ejemplo, > 30 g/L) de manera que aumente la probabilidad de reacción del sulfato con las fases del cemento.
2. Almacenando las muestras a alta temperatura (por ejemplo, > 30 ºC) o bajas temperaturas (por ejemplo, < 15 ºC) para favorecer la cinética de reacción.
3. Reduciendo el tiempo de curado y el aumento la relación Agua/Cemento (A/C) para provocar un compuesto más poroso, lo que conduce a un aumento del proceso de difusión y transporte de iones de ataque.

Existen otros ensayos para evaluar el ataque de sulfatos en cubos y cilindros de mortero, sin embargo, por el área efectiva de exposición, el ensayo de las barras es el más usual y recomendado. Otras pruebas correlacionan la permeabilidad del mortero con la facilidad y la velocidad del ataque de los iones de sulfato, y por tanto, la degradación producida (Jabbour et al., 2022). Los ensayos anteriormente mencionados permiten reconocer las propiedades físicas de los morteros en el ataque, sin embargo, para entender las reacciones que se dan a nivel microestructural, es necesario recurrir a técnicas de caracterización como la petrografía, en la cual a través de secciones delgadas es posible observar los efectos a nivel microestructural que tienen los iones sobre el mortero y de esta manera correlacionar con la perdida de desempeño en las propiedades físicas macroestructurales (Lozano Peña, 2014)

2.5. Adiciones en morteros

Según la Norma ASTM C125 una adición de mortero es la incorporación de cualquier elemento diferente del agua, agregado o cemento hidráulico, que son adicionadas a la mezcla

antes o durante el mezclado (Metha & Monteiro, 2006). Las adiciones en morteros a nivel general se clasifican en:

- **Adiciones químicas:** son productos que alteran el comportamiento químico entre el cemento, el agregado y el agua de la mezcla del concreto o mortero (Metha & Monteiro, 2006). Los efectos físicos de este tipo de adiciones afectan el comportamiento reológico del mortero en estado fresco inmediatamente, pero los cambios en el comportamiento químico toman algunos días y hasta meses para manifestarse (Metha & Monteiro, 2006). La Tabla 2 muestras la clasificación de aditivos según su efecto, los aditivos tipo A - Reductores dan fluidez a la mezcla sin necesidad de aumentar la cantidad de agua; los B - Retardantes aumentan el tiempo en estado plástico disminuyendo la velocidad de reacción del cemento y los C-Acelerantes permiten altas resistencias a edades tempranas. Los D, E y F son combinaciones de los efectos generados por A, B y C.

Tabla 2. Clasificación de aditivos para el concreto. Fuente: modificado de (Asocreto, 2010) y (Metha & Monteiro, 2006).

Tipo de aditivo	Efecto
A-Reductor de agua	Aumenta la fluidez de la mezcla sin aumento de la relación Agua/Cemento (A/C).
B-Retardante	Retarda el tiempo de fraguado.
C-Acelerante	Reduce el tiempo de fraguado y acelera el desarrollo de resistencias a edades tempranas.
D- Reductor de agua-Retardante	Combina las propiedades de A y B.
E-Reductor de agua-acelerante	Combina las propiedades de A y C.
F- Superplastificantes	Superplastificante o reduce el agua y retardar el tiempo de fraguado.

- **Adiciones minerales:** son agregadas al concreto o mortero en grandes cantidades, reducen los costos de producción y mejoran la trabajabilidad del mortero en estado fresco (Metha & Monteiro, 2006), Además de proyectarse como una forma de disposición de residuos de otras actividades industriales (Collivignarelli et al., 2021; Marsh et al., 2022; Meshram et al., 2023). Son materiales insolubles finamente molidos, procedentes de fuentes naturales o de subproductos de algunas industrias (Metha & Monteiro, 2006). Las adiciones minerales comúnmente utilizadas son partículas con propiedades puzolánicas o subproductos de la industria, por ejemplo, cenizas volantes y escoria generalmente a este tipo de adiciones se les conoce como materiales suplementarios del cemento (Metha & Monteiro, 2006). En la Tabla 3 se

presentan algunas adiciones minerales, entre las cuales están las adiciones cementantes cuya función es reemplazar y mejorar las propiedades de la fase cementante; las puzolanas que pueden entrar como fase cementante o inerte, mejoran las propiedades físicas del material; y las inertes tiene la función de sustituir el agregado.

Tabla 3. Clasificación de adiciones minerales para concretos y morteros. Fuente: modificado de (Asocreto, 2010) y (Metha & Monteiro, 2006).

Tipo de adictivo	Efecto
Cementantes	Mejorar las propiedades cementantes. Sustituir parcialmente el cemento.
Puzolanas	Mejorar la trabajabilidad, la plasticidad, la resistencia a los sulfatos. Reducir la reacción álcali sílice – agregado, la permeabilidad y el calor de hidratación. Sustituir parcialmente el cemento y rellenar.
Inertes	Mejorar la trabajabilidad, rellenar, sustituir.

Las adiciones minerales se han convertido en fuente de especial interés debido a que sustituyen materia prima y podrían eventualmente generar una reducción de las emisiones de CO_2, esto hace que estudios donde se investigue la incorporación de subproductos de la construcción o cualquier otro proceso industrial, como el caso de este proyecto de investigación, se conviertan en una posibilidad para encontrar fuentes alternativas más sostenible y amigable con el medio ambiente, entre los subproductos industriales que han sido ampliamente investigados se encuentran el vidrio, las cenizas volantes y las escorias de acero, entre otros (Cholake et al., 2018; Chang et al., 2020 Marsh et al., 2022; Meshram et al., 2023)

2.6. Escorias de acero

El acero por su durabilidad, versatilidad y capacidad para ser reciclado se convierte en un material esencial en la evolución de infraestructura y transporte (Nair et al., 2022). En la Figura 3. a) se ilustra el crecimiento de la producción de acero a nivel mundial, la Figura 3. a) muestra que a partir de 2010 la producción de acero es superior a 1500 millones de toneladas por año (World Steel Asociation-2018) (Thomas et al., 2018). Lo anterior significa también un crecimiento en la generación de las escorias de acero, que son un subproducto obtenido de la producción del acero y se estima que se generan aproximadamente 200 kg por tonelada de acero, en la Figura 3. b) se representa la equivalencia para la generación de escoria (Thomas et al., 2018).

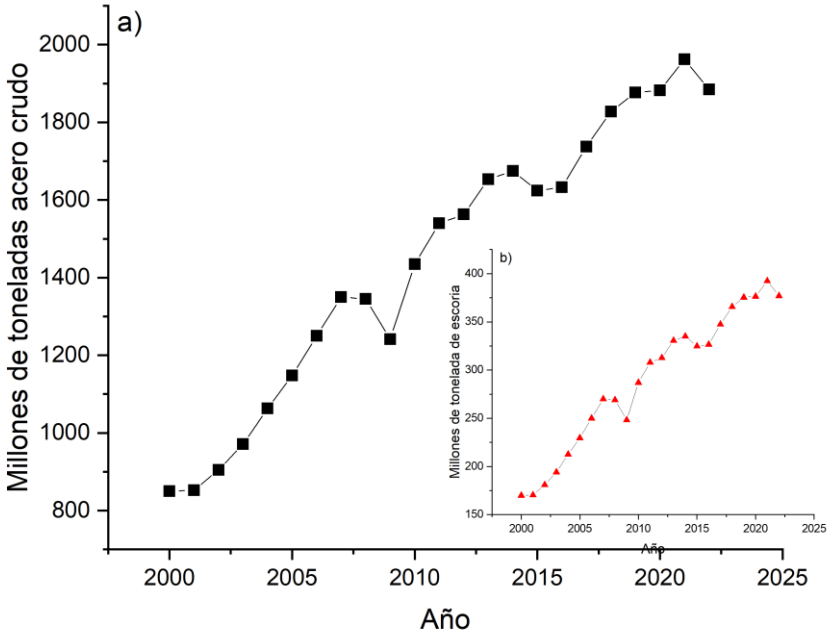


Figura 3. a) Producción mundial de acero crudo Elaboración propia. Datos tomados de 2022 World Steel Asociation in Figures. b) Estimado de generación de escoria de acero.

En la Figura 4 se observa el paso a paso del proceso de producción del acero. El paso 1 es la reducción del mineral de hierro, allí, se lleva a cabo la fabricación del arrabio. En hornos de alta temperatura se da la purificación del metal a partir de la oxidación de los constituyentes del mineral de hierro (Suárez hicapié, 2018). Esta etapa genera el arrabio fundido y escorias de alto horno (Blast Furnace Slag por sus siglas en ingles). Se generan unos 300 kg de BFS por tonelada de arrabio, este tipo de escoria es ampliamente usada como sustitución del cemento por su composición química rica en SiO_2 (30-40 %), CaO (29-50 %), Al_2O_3 (7-19 %), MgO (0 21 %) todos ellos son más del 90 % en la composición (Martins et al., 2021).

El paso 2 es el proceso de fusión, en este paso se purifica el arrabio con ayuda de algunos aditivos. Este paso se puede dar en plantas con proceso integrado o proceso semiintegrado, según se observa en la Esquema 3. El proceso integrado consiste en obtener el acero a partir de arrabio puro en hornos básicos de oxígeno (BOF), mientras que en el proceso semintregrado se obtiene el acero bruto a partir de chatarra en hornos de arco eléctrico (EAF). Ambas técnicas generan dos tipos de escoria, escorias de Horno Básico de Oxigeno (BOF) y las escorias de horno de arco eléctrico (EAF). Las EAF, a su vez se clasifican en EAF Slag y EAFD. Las EAF Slag son partículas duras, densas, parecidas a fragmentos de rocas. Las EAF Dust o en polvo, son el objeto de investigación y contiene metales pesado, se generan aproximadamente entre 120 -200 kg de escorias de arco eléctrico por tonelada de acero (Nair et al., 2022).

El paso 3 es el proceso de solidificación del acero, allí, el arrabio previamente dosificado y purificado es llevado a estado sólido en máquinas de colado continuo donde se da la forma requerida. Finalmente, el paso 4 consiste en la conformación mecánica del acero, donde generalmente se dan procesos de tratamiento térmico para laminar el acero.

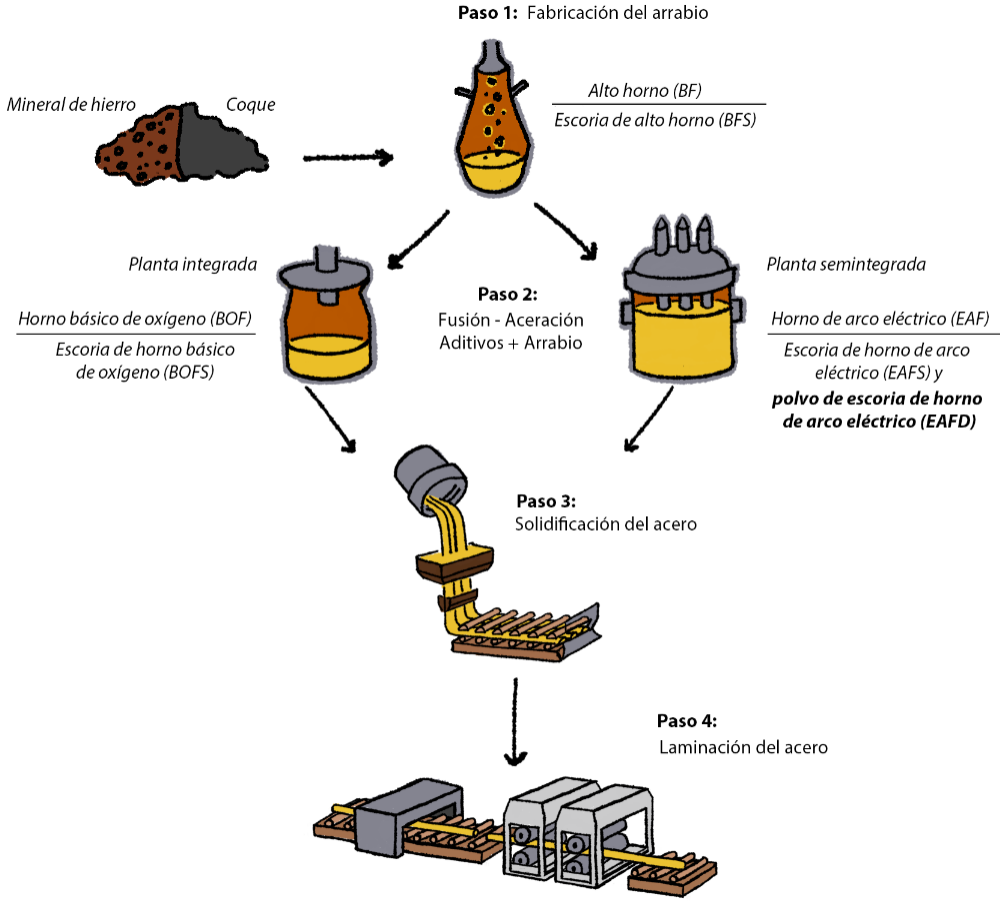


Figura 4. Producción de acero y generación de EAFD. Adaptado de Suárez hicapié, 2018.

2.7. Polvo de Escorias de Horno de Arco Eléctrico (Electric Arc Furnace Dust - EAFD)

El polvo de escoria de acero (EAFD) es considerada un residuo peligroso debido a su contenido de metales pesado como Zn, P, As, Cu, Co y Cr. El EAFD es dispuesto en grandes extensiones de tierra, generando contaminación por lixiviado en el suelo y aguas subterráneas (Nair et al., 2022) . El EAFD presenta tamaños de partículas inferiores a 100 µm, esta característica lo hace susceptible al transporte por medio de corrientes de aire y por tanto un potencial contaminante en la atmosfera. Por lo anterior, algunas agencias internacionales lo han clasificado como residuo peligroso para el medio ambiente (Cholake et al., 2018). Por cada tonelada de acero se generan entre 15-20 kg de EAFD. Solo el 30 % de la EAFD es reutilizada, mientras el que 70 % es dispuesta en vertederos (Nikolic et al., 2020). Si se considera una generación de 15 kg de escoria por tonelada de acero producido, implicaría generaciones de hasta 6 millones de toneladas anuales EAFD, con proyecciones para 2050

de hasta 18 millones de toneladas (Brandner et al., 2021). La alta acumulación de este tipo de residuos puede desencadenar graves efectos de contaminación, problemas asociados a la contaminación de suelos, fuentes hídricas hacen que necesario buscar alternativas de reúso (Nair et al., 2022).

En Colombia, por ejemplo, la producción de acero se lleva a cabo en plantas integradas y semiintegradas, sin embargo, en el 80 % se hace por el proceso semiintegrado utilizando la chatarra como fuente de materia prima principal (Ferro Beltrán, 2021). Colombia cuenta con una capacidad de producción de acero de 2.2 millones de toneladas, lo que implica unas 30,000 toneladas EAFD que se deben disponer como residuo (Ferro Beltrán, 2021). En Colombia las escorias generadas en el horno de arco eléctrico son los principales residuos enviados a disposición final. Solo el 15 % de residuo generado es reutilizado, en consecuencia, se tiene como meta para la descarbonización, construir plantas de tratamiento de escoria en las que se pueda tratar para el año 2030 el 100 % de las escorias y puedan ser reincorporadas economía (Ferro Beltrán, 2021).

2.8. Escorias usadas como sustitución del cemento en mezclas de morteros

Son múltiples las investigaciones que han estudiado el uso de escorias de acero como sustitución del cemento dentro de morteros y concretos, sin embargo, la mayoría de las escorias estudiadas han sido escorias con composiciones químicas similares a las del cemento (CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3,). Este tipo de escoria provee efectos positivos a las mezclas como desarrollo de la resistencia, disminución de la permeabilidad y mayor trabajabilidad (Meshram et al., 2023).

Este proyecto de investigación pretende estudiar los efectos del uso del polvo de escoria de alto horno (EAFD) con alto contenido de Hierro y Zinc en morteros de cemento hidráulico, como una alternativa de disposición e inmovilización de este residuo con características perjudiciales por su alto contenido de metales pesados. Algunos estudios previos de este tipo de escoria reportan resultados favorables y desfavorables según el objetivo planteado. Por ejemplo, Colorado et al. 2016, estudió el comportamiento de pastas y morteros de cemento hidráulico con sustituciones de polvo de escoria de acero de alto contenido de Zinc, la escoria tuvo efectos en las propiedades mecánicas de los morteros y las pastas. Para sustituciones superiores al 20 % de polvo de escoria por cemento, la resistencia a compresión cayó en porcentajes mayores al 50 %; además, la escoria generó retraso en los tiempos de endurecimiento de las mezclas y aumentó la fluidez de la mezcla. Ledesma (2017) logró la estabilización de EAD en morteros con remplazos de relaciones EAFD/cemento de 6.67. Como resultado del aumento en la incorporación de la escoria, la resistencia a la compresión de los morteros disminuyó, lo que puede explicarse por varias razones, por ejemplo, el retraso en la hidratación de las mezclas, el desarrollo de nuevas fases en la matriz cementante, y el aumento de la relación A/C usada en las mezclas.

Lozano-Lunar et al., 2019, investigó en morteros autocompactantes sustituciones de escorias de acero de arco eléctrico. La incorporación de polvo de horno de arco eléctrico modificó la autocompactación y las reacciones de hidratación. La resistencia mecánica disminuyó con la incorporación de polvo de horno eléctrico, aunque el mortero con un 25 % de sustitución mostró una pérdida insignificante en comparación con el mortero autocompactante de

referencia. Nikolic et al., 2020, evaluó el uso de polvo de escoria de acero EAFD, en cementos activadas alcalinamente. Las propiedades mecánicas de las pastas del cemento activado disminuyen con el incremento del porcentaje de EAFD; sin embargo, para porcentajes de 5 %, sus propiedades son sutilmente menores, convirtiendo en potencial producto en aplicaciones de construcción. La sustitución de cemento por EAFD tiene un efecto retardador en la formación de la reacción de la fase C-S-H. Existen pocos estudios en los que se analiza el comportamiento de morteros con escoria y frente a ataques con sulfatos, lo cual se pretende estudiar en esta investigación.

2.9. Caracterización física de morteros

El mortero, al igual que el concreto durante su proceso de fabricación, pasa por tres estados: fresco (plástico), proceso de fraguado (endurecimiento) y endurecido, en estos tres momentos el mortero presenta características típicas con las cuales se determina su desempeño dentro de las estructuras (Asocreto, 2010).

2.9.1. Propiedades en estado fresco de los moteros

Las propiedades del mortero en estado freso determinan las condiciones de uso de la mezcla, ya que, lo hacen trabajable y deformable plásticamente bajo la acción de pequeños esfuerzos (Gutierrez de López, 2003). La trabajabilidad o manejabilidad del mortero, es una propiedad reológica que incluye características como, adhesión, cohesión, fluidez, plasticidad y viscosidad (Sánchez de Guzmán, 2001). No existe método directo para medir esta propiedad (Asocreto, 2010). El ensayo más empleado para tener una estimación del grado de trabajabilidad de las mezclas de mortero es la fluidez.

- **Fluidez:** indica la capacidad que tiene de la mezcla para fluir a través del porcentaje de aumento en el diámetro de la base de un cono truncado de mezcla de mortero. La mezcla en estado fresco es colocada al interior del cono sobre la mesa de flujo, levantándola 12.7 mm y dejándola caer 25 veces en 15 segundos, la fluidez se calcula con promedio de 4 diámetros finales según lo especificado en ASTM-C230.

2.9.2. Propiedades en estado endurecido de los morteros:

Las propiedades físicas y mecánicas en estado endurecido del mortero permiten evaluar la calidad del proceso de elección, dosificación y mezcla. La prueba que resistencia a la compresión es el parámetro que determina el uso final que se puede dar al mortero (Asocreto, 2010).

- **Resistencia a la compresión:** esta prueba comúnmente tiene correlación con otras propiedades como la adherencia, resistencia a la tensión y absorción (Asocreto, 2010). La resistencia a la compresión se obtiene usando cubos de $50 * 50\ mm$ con la aplicación del ensayo descrito por la norma ASTM-C109.

Existen otros tipos de ensayos que buscan evaluar la respuesta de los morteros frente a ambientes agresivos y de esta manera determinar el diseño más adecuado para la concepción del material y la estructura que será construida. Uno de ellos es la resistencia a sulfatos.

- **Resistencia a sulfatos:** la norma ASTM C1012 especifica un método mediante el cual a través de barras de mortero sumergidas en una solución de sulfato (50 g/L) es posible establecer la respuesta y desgaste del mortero. El cambio en las propiedades de las barras es medido a varios periodos de tiempo desde una semana hasta meses (ASTM C1012) (Hincapié, 2015).

La evaluación de la resistencia a la compresión y fluidez de mezclas de mortero son pruebas útiles a la hora de conocer el comportamiento mecánico a nivel macroestrutural de este material de construcción (Bedoya Henao et al., 2016). Sin embargo, la alta variabilidad en la concepción del mortero, selección de materias primas, dosificación, mezclado, vaciado, compactación y curado, establece que evaluar su resistencia a la compresión y fluidez sea insuficiente para obtener un análisis detallado a nivel global de este compuesto, de su estructura y comportamiento interno (Bedoya Henao et al., 2016).

El mortero tiene una alta heterogeneidad y compleja microestructura (Metha & Monteiro, 2006). La relación de las propiedades macroestructurales del mortero en estado fresco y endurecido con su comportamiento microestructural son el foco central de la ciencia e industria de los materiales de construcción con el fin de entender su comportamiento frente a cambios en las condiciones de diseño, mezclado y funcionamiento dentro de las estructuras (Metha & Monteiro, 2006). Existen algunos estudios que muestran las correlaciones entre las propiedades macro y micro estructurales, por citar algunos ejemplo, Hernandez et al., 2018, estudió la microestructura de los cristales del cemento para diferentes condiciones de curado en morteros de cemento. Sedaghatdoost et al., 2019 mediante técnicas petrográficas caracterizaron la matriz pasta-agregado en mezclas de morteros compuestas de agregados reciclados de concreto y escorias sometidas a cambios de temperatura. Damineli et al., 2021, estudió los efectos de seis tipos de rellenos a través del estudio mineralógico para entender la resistencia a la compresión de los morteros cementosos.

2.10. Caracterización petrográfica de morteros

La petrografía es una disciplina de la geología que se encarga de la caracterización y clasificación de las rocas (Walker, H. N.; Lane, S. D.; Stutzman, 2006). A través de análisis microscópicos de las propiedades físicas y químicas permite determinar y definir el tipo, la composición, la textura, la mineralogía, la microestructura y la clasificación de las rocas (Beltran Calvo & Romero Beltran, 2022). La petrografía aplicada al estudio de concretos y morteros permite conocer información detallada de la microestructura de estos materiales y por tanto identificar características de su calidad y durabilidad a nivel macro (Poole & Sims, 2016). Existen diferentes técnicas en la petrografía que de acuerdo con la necesidad o problema de estudio permiten obtener información relevante sobre el material de estudio. Por ejemplo, la microscopía óptica, alcanza análisis hasta escalas micrométricas, mientras que la microscopía electrónica, hasta escalas de cientos de nanómetros.

2.10.1. Microscopía óptica

La microscopía óptica permite realizar la interpretación de las fases minerales en una muestra de mano o sección delgada de roca por medio del estereoscopio o microscopio petrográfico (Walker, H. N.; Lane, S. D.; Stutzman, 2006). La técnica permite evaluar características macroscópicas en muestras de mano a través de la lupa binocular o estereomicroscopio, hasta

características microestructuras con la preparación de secciones delgadas con espesores de entre 20-30 μm. La microscopía óptica dentro del área de caracterización de morteros se ha convertido en una herramienta de análisis microestructural de las componentes del material; por ejemplo, permite identificar propiedades de los agregados, como tamaño, forma, color y textura. En la pasta de cemento permite identificar la homogeneidad, apariencia y textura de la fase cementante, y a su vez, permite inferir y analizar la relación existente entre agregado-cemento, distribución de vacíos, reacción de adiciones, entre otros [AlanB.Poole y Ian Sims, 2016]. La microscopía óptica permite obtener información cualitativa y cuantitativa de las características físicas de muestra del mortero (Beltran Calvo & Romero Beltran, 2022). Para la caracterización mediante microscopia óptica es necesario el uso algunos equipos sofisticados y la preparación específica de muestra de mano.

- **Estereomicroscopía:** permite obtener una descripción macroscópica de muestras de mano como núcleos, granos o bloques. A través de un estereomicroscopio, con el uso lentes de corrección cromática y objetivos con diferentes aumentos permite tomar imágenes de las muestras y reconocer propiedades fiscas como: color forma, textura, distribución e iteración de las partículas con la fase cementante (Beltrán y Romero, 2022).

- **Microscopía de luz transmitida y/o reflejada:** la microscopia de luz trasmitida se evalúa mediante el análisis de secciones delgadas en el microscopio petrográfico. El microscopio petrográfico es un microscopio equipado con un sistema de polarización de luz, una platina giratoria y condensador, lo que permite que a través de un rayo de luz que incide en la muestra se reconozcan las propiedades ópticas de las fases minerales en las muestras. El microscopio puede estudiar muestras bajo luz transmitida y reflejada (Walker, H. N.; Lane, S. D.; Stutzman, 2006). Las secciones delgadas pueden ser evaluadas con los polarizadores paralelos (II) o polarizadores cruzados (X), esto permite identificar las propiedades ópticas de los minerales presentes en la roca (Nesse, 2004). A través del análisis de las secciones delgadas en el microscopio petrográfico es posible obtener información acerca de:

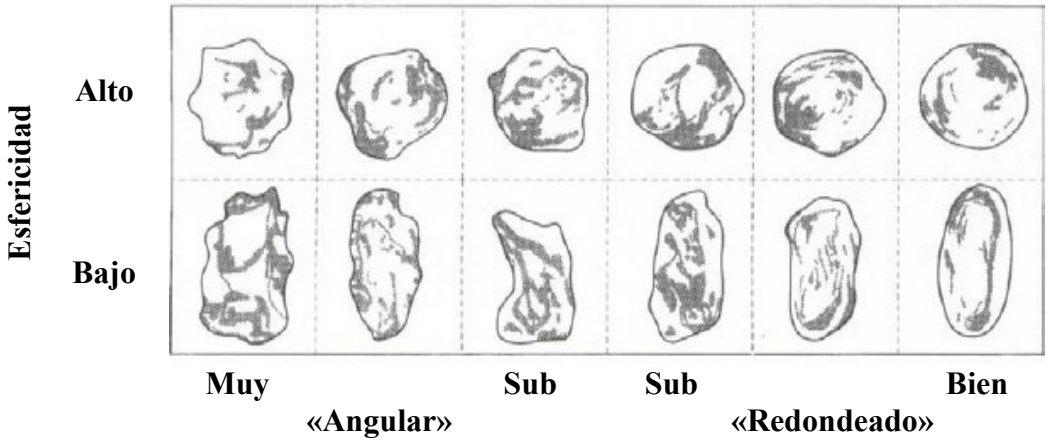
  Agregados: la caracterización de los agregados mediante la microscopia óptica permite identificar agregados o sustancias indeseables, además de describir las propiedades a continuación: tamaño, formas, textura, fisuras y composición mineralógica.

  - **Tamaño de las partículas:** por medio de la evaluación en el microscopio se puede verificar la gradación de la arena, identificando los porcentajes de cada tamaño (Poole & Sims, 2016). A través de la tabla del Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS) se clasifica la muestra de escoria de acero en estudio (Beltran Calvo & Romero Beltran, 2022).

  - **Forma de las partículas:** se refiera a la distribución en el espacio de las aristas y contorno de las partículas del agregado (Hewlett, P., & Liska, 2003). La forma se describe a partir de dos parámetros, la redondez y esfericidad, ver

Tabla 4. La forma de las partículas tiene efecto en el grado de unión que pueda alcanzar la interacción cemento-agregado y la adherencia dentro de la estructura del mortero, lo cual permite desarrollar las propiedades mecánicas del cemento y así una mayor durabilidad. [AlanB.Poole y Ian Sims, 2016]. Con la petrografía se puede reconocer y clasificar las partículas mediante la descripción de cada grano y su función dentro de la matriz (Walker, H. N.; Lane, S. D.; Stutzman, 2006).

Tabla 4. Forma de las partículas. Tomado de y modificado de Hewlett, P., & Liska,2003.



- **Textura de las partículas:** esta característica hace referencia a la condición de rugosidad superficial de las partículas que conforman el compuesto. Afectar propiedades como la adherencia, manejabilidad y cantidad del cemento (Poole & Sims, 2016).

- **Fisuras:** permite hacer una descripción del tamaño, proporción, distribución, interconexión y tipo de fisuras presentes en los granos del agregado. En algunas ocasiones se nombra según la dirección de propagación de la fisura (Beltran Calvo & Romero Beltran, 2022).

- **Composición mineral del agregado:** es posible identificar las fases minerales presentes en la arena con el uso de las propiedades morfométricas y ópticas de los minerales o rocas en la sección delgada. Entre las propiedades morfométricas se puede describir: grado de cristalinidad, forma, hábito, clivaje, fractura, macla las cuales se pueden visualizar en modo (II), entre las propiedades ópticas de los granos están el color, pleocroísmo, relieve en (II), isotropismo y birrefringencia (X). Estas propiedades son característica de cada mineral (Nesse, 2004).

Cemento: la microscopia óptica en el estudio del cemento posibilita encontrar en la pasta cementante propiedades físicas a escala microscópica, esas propiedades están asociadas

a la calidad de hidratación, apariencia, alteración y microfisuramiento de la pasta de cemento o pasta más adición.

- **Zona intersticial:** se refiere a la homogeneidad y el desarrollo de los silicatos, el aluminato y ferroaluminato después del proceso de hidratación del cemento y su interacción con los agregados, permite describir la calidad de pega entre ambas fases. Es necesario contar con objetivos de alta magnificencia (superiores a 120x) para poder tener un análisis detallado de la pasta; por ello, la necesidad de evaluar las muestras en el microscopio electrónico de acuerdo al grado de detalle del análisis (Hernandez et al., 2018; Poole & Sims, 2016; Walker, H. N.; Lane, S. D.; Stutzman, 2006).

  -Silicatos de calcio (C_3S, C_2S): ambos componen cerca del 80% del Clinker. La Alita (C_3S) forma grandes cristales seudo-hexagonales euhédricos, que son incoloros en sección delgada (luz transmitida), pero aparecen de color marrón en la luz reflejada. La Belita (C_2S), en contraste, presenta cristales con forma anhedral o subhedral, en algunos casos, aparecen bien redondeados en sección transversal. Es usual encontrar _C_2S polimorfo, generalmente con apariencia azul en luz reflejada [AlanB.Poole y Ian Sims, 2016].

  -Aluminato de calcio y ferro aluminato de calcio (C_3A,C_4AF): conformando el 10% del Clinker. En sección delgada, el aluminato C_3A tiene color café y es frecuentemente isotrópico, en luz reflejada se distingue por apariencia gris clara y presencia clara intersticial. La Ferrita, es distinguida en sección delgada y luz reflejada, tiene un índice de refracción más alto de los otros compuestos del Clinker [AlanB.Poole y Ian Sims, 2016].

- **Apariencia:** la microscopía óptica por su alcance en magnificencia permite observar propiedades físicas como la apariencia y alteración en el color y homogeneidad de la pasta y el agregado, los cambios en la apariendas comúnmente están asociados a reacciones o ataques por ambientes agresivos (Lozano Peña, 2014).

- **Fisuras y vacíos:** es posible determinar la cantidad de microfisuras y espacios vacíos en cada muestra, además de describir su forma, el tamaño y distribución en el espacio (Beltran Calvo & Romero Beltran, 2022).

2.10.2. Microscopía electrónica de barrido, SEM

El uso de la microscopía electrónica de barrio en la caracterización de morteros se fundamenta en el suministro de imágenes de la microestructura del cemento, microestructuras que por medios ópticos no se logran observar (Walker, H. N.; Lane, S. D.; Stutzman, 2006). La alta resolución de las imágenes y la posibilidad de realizar análisis químicos simultáneos permite reconocer con precisión la composición de los materiales que integran el cemento y observan la interacción detallada de las fases y granos presentes. La técnica se lleva a cabo mediante el uso de un microscopio electrónico(Poole & Sims, 2016).

El microscopio electrónico cuenta con un sistema de bombardeo de electrones, que producen información a nivel microestrucural de las componentes del material compuesto (Poole &

Sims, 2016). El análisis por microscopía electrónica entrega tres tipos de información: los electrones secundarios, permiten identificar y describir la morfología de las partículas que conforma el material. Los electrones retrodisperdados, suministran información acerca de la composición de los elementos en la muestra, la diferencia de intensidad en tonos grises da información de la composición, entre más oscuro sea la imagen, menor será la densidad, las zonas más claras de la imagen generalmente están asociada a granos de cemento no-hidratados y las zonas negras son poros en la muestra. Los Rayos X. (EDS) permiten hacer un análisis cuantitativo de la composición química puntual o mapeada de la muestra. Cada elemento químico permite ser identificado y cuantificado (Badiye et al., 2022). El análisis por microscopía electrónica permite reconocer las mismas propiedades descritas en la sección anterior, además de poder alcanzar mayor magnificación, el análisis de la composición química es una ventaja que permite a través de mapeos identificar punto, granos o área que no fueron posibles de identificar con las propiedades ópticas.

Capítulo III: Metodología

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se definieron cuatro etapas de experimentación. En el Figura 5 se muestra el resumen de cada una de las etapas con fotos de algunos de los ensayos y procedimientos realizados. En la primera fase se caracterizó física y químicamente el residuo de escoria de acero (EAFD). En la segunda y tercera etapa se fabricaron cubos y barras de mortero y se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas en estado fresco y endurecido. En la etapa final se hizo una caracterización y análisis microestructural de los cubos y barras de mortero mediante técnicas de caracterización petrográfica.



Figura 5. Esquema: etapas de desarrollo del proyecto. Elaboración propia

3.1. Caracterización de escoria de acero

La escoria de acero fue tomada de una empresa productora de acero. La escoria en este estudio proviene de residuos del proceso de producción de acero de una planta en Colombia. La muestra de escoria de acero para la caracterización física y química fue seleccionada por método de cuarteo de acuerdo con la norma ASTM C702. Al llegar al laboratorio se secó en horno durante 24 horas a 110 ± 5 °C y se procedió con las pruebas de caracterización:

3.1.1. Caracterización física: la caracterización física de la escoria de acero consistió en un análisis de las propiedades físicas a través de un reconocimiento detallado de su apariencia visual y propiedades como: gravedad específica, densidad, área superficial y distribución granulométrica.

- **Inspección visual:** mediante el uso de un estereomicroscopio Boeco BSZ-405, se hizo la inspección y reconocimiento visual de la escoria de acero. El

estereomicroscopio Boeco está equipado con cámara B-Cam 16-Boeco, que permitió tomar fotografías con campos visuales de hasta 2.12 mm. En la muestra de escoria de acero analizada se describieron propiedades de color, tamaño y textura. Adicionalmente, con la finalidad de comparar las características antes mencionadas entre el cemento y la escoria de acero incorporada, se contrastó una muestra individual y una muestra mezclada de ambas componentes.

- **Análisis de tamaño de partícula:** se emplearon las pruebas de granulometría por tamizado y el análisis de partículas por difracción de rayos láser (ATP). Al final se encontraron los límites de consistencia y se clasificó el residuo de acuerdo con el SUCS.

  - **Granulometría por tamizado:** la escoria de acero se pasó por diferentes tamaños de abertura, desde No 4 (4.75 mm) hasta No 200 (0.075 mm) siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D6913. Este ensayo permitió determinar la distribución de tamaños de partículas superiores a 0.075 mm (Tamiz No 200) mediante el uso de tamices estandarizados y agitación manual.

  - **Análisis de tamaño de partícula por rayos láser (ATP):** esta técnica permitió medir el tamaño de partícula con diámetro inferior a 75 μm. A diferencia del análisis por tamizado, la difracción por rayos láser mide la distribución de tamaños mediante la intensidad de la luz dispersada cuando un rayo láser pasa a través de la muestra de partículas dispersadas (González & Sancho, 2017). La técnica ATP está normalizada por la ISO13320: 2009. Esta técnica se basa en principios ópticos de la teoría de dispersión de la luz, asumiendo que la partícula es una esfera uniforme, equivalente al volumen de la partícula. La ejecución del ensayo requiere conocer el índice de refracción de la muestra y del dispersante. (de Luxan et al., 1988; Eliana Llano & Gloria Restrepo, 2022; González & Sancho, 2017).

  - **Límites de consistencia**: los límites de consistencia, límite líquido (LL) y plástico (LP) se determinaron con base a la norma ASTM D4318.

- **Gravedad específica:** la gravedad específica de la escoria se determinó según la norma ASTM D854.

- **Densidad real:** de acuerdo con la norma ASTM D5550 y mediante el uso del equipo Accupycc II 1340 V3 Micromeritics, se calculó la densidad real de las partículas de escoria de acero. Esta técnica permite calcular la gravedad específica de un sólido mediante el uso de un picnómetro automático, el cual usa gas de helio para determinar el volumen ocupado por los sólidos en un volumen estandarizado y con ello determina la densidad real. La muestra fue secada en horno a 105 ± 5 °C durante 24 horas antes de la realización del ensayo.

- **Área superficial específica (BET):** este ensayo se fundamenta en calcular las propiedades texturales de las partículas del material como porosidad, área superficial, tamaño y volumen de poro, a partir de la absorción de moléculas de un gas (Eliana Llano & Gloria Restrepo, 2022). En esta investigación se utilizó un equipo Micromeritics Gemini VII con adsorción de nitrógeno (N_2), la muestra de escoria fue estudiada en vacío a una temperatura de 200 °C durante 24 horas.

3.1.2. Caracterización química de la escoria de acero: se fundamentó en encontrar la composición química elemental de la escoria y las fases cristalinas presentes mediante fluorescencia y difracción de rayos X, respectivamente.

- **Espectrometría de fluorescencia de rayos X, XFR:** es un ensayo no destructivo que consiste en determinar la composición elemental de los materiales. A través de una fuente de rayos X se irradia el material que se quiere caracterizar, debido a la radiación, el material emite o presenta fluorescencia de rayos X característicos. La emisión de rayos característicos es capturada por un detector que transforma esos rayos en señales de picos, permitiendo la identificación cualitativa de los elementos y a partir de la intensidad de los picos, la composición cuantitativa (Badiye et al., 2022). El ensayo de XFR se llevó a cabo en un equipo Thermo ARL Optim'X WDRXF, fuente de rayos X 50 KV Rh-Pd, humedad 20%, temperatura 25.5°C.

- **Difracción de Rayos X, DRX:** esta técnica es utilizada para la determinación de las fases cristalinas presentes en el material de interés investigativo. La información se obtiene a partir de la interacción entre el haz de rayos X emitido hacia la muestra y los rayos difractados por la muestra. Esta técnica permite identificar las estructuras cristalinas, y con ellas, conocer la composición mineralógica del material (Badiye et al., 2022). Los ensayos de DRX se realizaron en el Difractómetro de Rayos X (DRX) Malvern-PANalytical Modelo Empyrean 2012, con detector Pixel 3D y fuente de Cu Cu (λ =1.541 Å) a 45 kV y 40 mA; Goniómetro: Omega/2 theta y configuración de la plataforma: reflexión estándar. El paso fue de 0,05° y un tiempo por paso de 50 s.

3.2. Materiales, dosificación y mezclas de morteros y barras

Los materiales empleados para la elaboración de los cubos de mortero fueron:

- **Cemento hidráulico:** cemento gris de uso general, referencia Argos, cumple con NTC 121.
- **Escoria de acero:** escoria de acero de una empresa productora de acero.
- **Agua:** agua potable.
- **Arena:** se utilizó arena de revoque referencia Argos. La arena para los morteros cumplió con las especificaciones de arena estandarizada según la ASTM-C778, para ello se requirió llevar a cabo el siguiente proceso:
  - ✓ Se lavó la arena mediante tamizado en húmedo con la malla No 200, se eliminaron impurezas y exceso de partículas finas.

- ✓ La arena fue colocada por 24 horas a 110 ± 5 °C en el horno.
- ✓ La arena seca se tamizó y se seleccionó según la cantidad y el tamaño de partícula requerido en cada tamiz para lograr arena estandarizada, según la ASTM C778.
- ✓ Después del tamizado, cada porción de arena fue estandariza y chequeada con prueba de granulometría antes de proceder con cada una de las mezclas.

3.3. Dosificación de cubos y barras de mortero

El diseño de mezcla empleado en esta investigación se estableció con base en la norma ASTM C109. Las proporciones (Cemento+Escoria de acero) : Arena para todas las mezclas fue de 1 : 2,75. Similarmente, la relación A / (Cemento+Escoria de acero) fue definida con un valor A/C : 0,97, en la cual se logró la fluidez de referencia 110 ± 5 %, según la ASTM-C109. La Tabla 5 presenta los porcentajes de sustitución de escoria de acero por cemento del 5, 10, 15, 20 y 30 por ciento en peso (% p/p). Los porcentajes definidos se emplearon de acuerdo al estado de arte en este tipo de investigaciones (Colorado et al., 2016; Angélica Lozano-Lunar et al., 2019; Nair et al., 2022; Nikolic et al., 2020)**.**

Tabla 5. Cubos de mortero. Porcentajes de sustitución de cemento por escoria de acero.

M: Mortero	Escoria de acero, % p/p	Cemento, % p/p
M0	0	100
M5	5	95
M10	10	90
M15	15	85
M20	20	80
M30	30	70

La dosificación de las mezclas para las barras de morteros se hizo de acuerdo con la norma ASTM C452. La relación (Cemento+Escoria): Arena estandariza fue de 1:2,75 para todas las barras. Se conservó la misma relación A/(Cemeto+Escoria): 0.97 empleada en las mezclas de los morteros. Los porcentajes de sustitución para cada una de las mezclas con las que se elaboraron las barras de mortero se muestran en la Tabla 6. Todas las barras se elaboraron con las mismas condiciones de mezclado empleadas para los cubos de mortero, sin embargo, las barras durante el proceso de fraguado se mantuvieron en los moldes nueve días para conservar la misma condición de ataque en la solución con sulfato.

Tabla 6. Barras de mortero. Porcentajes de sustitución de cemento por escoria de acero.

BM: Barra de Mortero	Escoria de acero, % p/p	Cemento, % p/p
BM0-H	0	100
BM10-H	10	90
BM20-H	20	80

3.3.1. Elaboración de morteros: de acuerdo con las normas ASTM C-305 y C109 se llevaron a cabo todas las mezclas de los morteros:

1. En la mezcladora tipo Hobart N50, se limpió el recipiente hasta que estuviera libre de cualquier suciedad.
2. Con el aspa en posición de mezclado, se vertió el agua y el cemento (más la escoria) según las proporciones definidas en las Tablas 5 y 6 y con base en la norma ASTM-C109.
3. Después de haber vertido el cemento y el agua, se encendió la mezcladora a velocidad baja (140 rpm) durante 30 segundos.
4. Durante los 30 segundos de mezclado a velocidad baja se agregó la cantidad de arena estandarizada según la proporción (Cemento+Escoria:Arena) 1:2.75.
5. Luego de los 30 segundos se mezclaron las componentes nuevamente 30 segundos más, pero a velocidad media (285 rpm).
6. Se detuvo la mezcladora y se dejó reposar la mezcla durante 90 segundos.
7. Durante los primeros 15 segundos de reposo, se retiraron rápidamente los excesos de mezcla en las paredes del recipiente con ayuda de una espátula.
8. Luego se mezclaron las componentes por 60 segundos a velocidad media (285 rpm).
9. En este punto, se llevó a cabo la prueba de fluidez para todos los tipos de mezclas.
10. Se finalizó el vaciado del mortero en los moldes cúbicos con medidas de 50.8 x 50.8 x 50.8 mm^3, en dos capas de 25 mm aproximadamente y apisonando 32 veces cada una de las capas del cubo, (Figura 6.).
11. Pasadas las siguientes 24 horas después del vaciado, se desencofraron los cubos y se dejaron curando 28 días. Algunos de los cubos se dejaron encofrados por más tiempo debido a que la mezcla no alcanzó las condiciones de endurecimiento necesarias durante este periodo de tiempo.

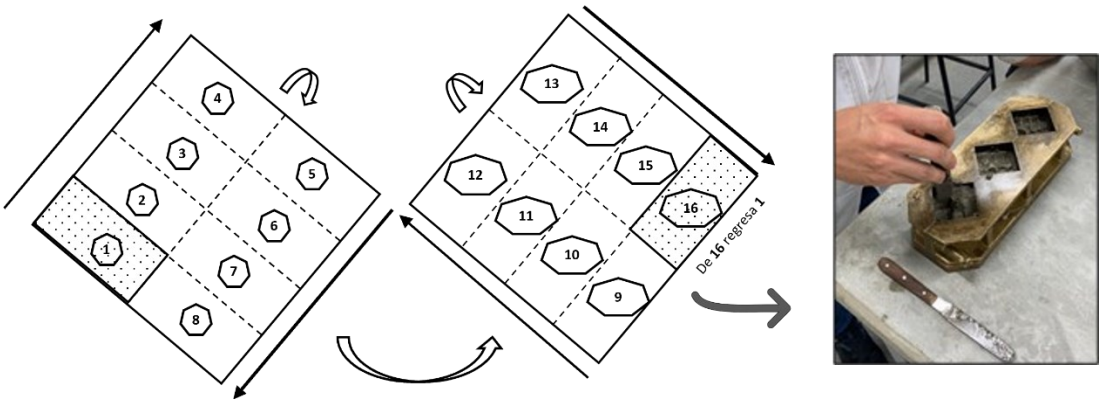


Figura 6. Esquema de compactación para vaciado de cubos de mortero.

3.3.2. Elaboración de barras de mortero: las barras de mortero fueron realizadas con el mismo procedimiento descrito para la fabricación de los cubos de mortero; sin embargo, hubo dos cambios durante el proceso. El primer cambio fue después del ensayo de fluidez, allí, la mezcla se agregó de nuevo al recipiente, se eliminó el exceso de las paredes laterales y volvió

a mezclar a velocidad media (285 rpm) durante 15 segundos según la norma ASTM-C452. El segundo cambio fue en el proceso de vaciado, el cual, se realizó el siguiente proceso:

1. Los moldes para las barras fueron según las medidas establecidas (25 x 25 x 285 mm) en la norma ASTM C1012.
2. El vaciado de la mezcla se hizo en dos capas. Cada capa fue compactada a lo largo del molde, con especial cuidado en las esquinas del molde para tener una mezcla homogénea como los ilustra en la Figura 7.
3. Finalizada las dos capas se niveló el mortero en la parte superior del molde y se alisó la superficie con una espátula.

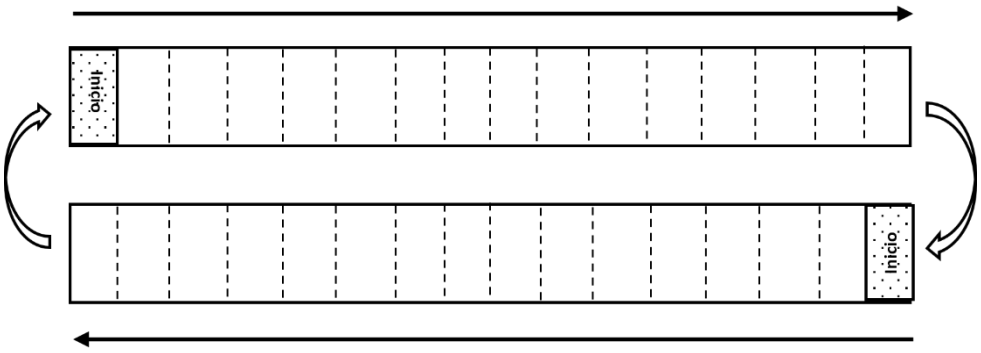


Figura 7. Esquema de compactación para vaciado de barras de mortero.

3.4. Montaje e inmersión de barras:

Las barras de mortero fueron colocadas en inmersión en recipientes de acrílico. Las barras de mortero fueron desencofradas una vez endurecidas todas las mezclas; es decir, después de nueve días de estar en los moldes las mezclas fueron colocadas en inmersión. Este tiempo se definió a partir de la experiencia observada durante el fraguado de las mezclas de los cubos de mortero. Durante los primeros nueve días las barras se curaron mediante protección superficial con vininpel y rociado de agua en las caras de los moldes. Las barras fueron sumergidas en baño maría con solución de sulfato de sodio a temperatura de 35 °C durante 24 horas después de los 9 días; luego fueron colocadas en la solución de sulfato a temperatura ambiente durante un período de 60 días. La solución de sulfato donde fueron curadas las barras de mortero fue una concentración de 50 g de sulfato de sodio (Na_2SO_4) disueltos en 900ml de agua, según ASTM-C1012. Se utilizaron tantos litros de solución necesario para garantizar que cada una de las barras y/o cubos tuviera una cantidad entre 600 – 800 ml de solución. En los recipientes fueron instaladas bombas sumergibles para mantener agitación de la solución. El pH de la solución se midió de manera periódica cada tres días, conservándolo en el rango (6-8) ASTM-C1012, ver Figura 8.

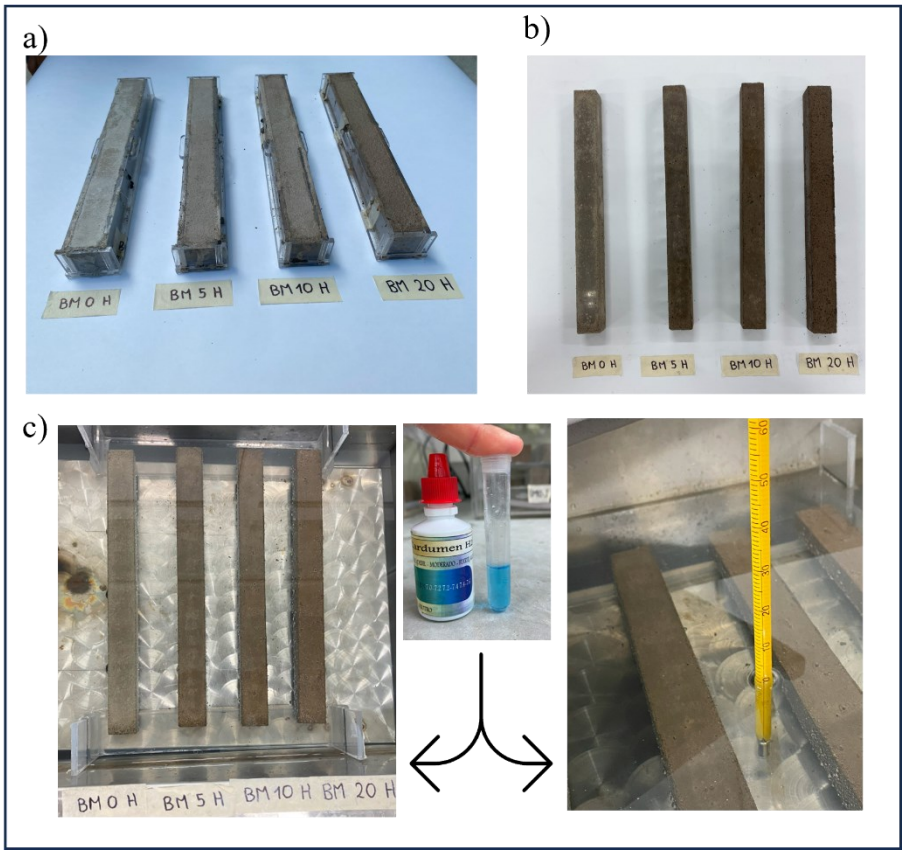


Figura 8. Esquema de montaje e inmersión de barras en ataque de sulfato de sodio

3.5. Caracterización física de los morteros

3.5.1 Estado fresco

- **Fluidez de las mezclas:** el ensayo de fluidez de todas las mezclas de los cubos y barras de mortero se determinó mediante las especificaciones de las normas (ASTM-C1437, C230).

Procedimiento:

1. Se verificó que la mesa de flujo estuviera totalmente limpia, sin humedad superficial o partículas de material sobre esta.
2. Se posicionó el molde en el centro de la mesa y se vertió la mezcla en dos capas de aproximadamente 25 mm cada una.
3. Posteriormente, se generan 20 golpes distribuidos uniformemente en el área del cono con el pisón de madera para tener un llenado uniforme del molde.
4. Se termina de llenar y apisonar similarmente como en el paso anterior hasta el borde del molde, cortando los excesos de material.
5. Se limpian los excesos de agua y material sobre la mesa.
6. Se retira el molde después de 1 minuto.

7. Se induce la caída de la mesa 25 veces en un periodo de tiempo de 15 segundos.
8. Se mide el diámetro en cuatro líneas de la mezcla expandida. El flujo es el incremento del diámetro inicial expresado en porcentaje.



Figura 9. Montaje y ejecución del ensayo de fluidez en mesa de flujo

3.5.2. Estado endurecido:

- **Resistencia a la compresión:** con cubos de moteros de 50,8 x 50,8 x 50,8 mm^3 se evaluó la resistencia a la compresión de las mezclas con y sin sustitución de escoria de acero según la norma ASTM-C109.

Procedimiento:

1. Los cubos de mortero después de 28 días de curado se sacaron de inmersión y se limpió el exceso de agua en la superficie.
2. En el equipo de compresión, referencia Controls se montó cada uno de los cubos.
3. Se inició el proceso de carga hasta generar la falla de los cubos.
4. Los cubos fueron guardados en bolsa para posteriormente extraer las secciones delgadas para el análisis petrográfico.

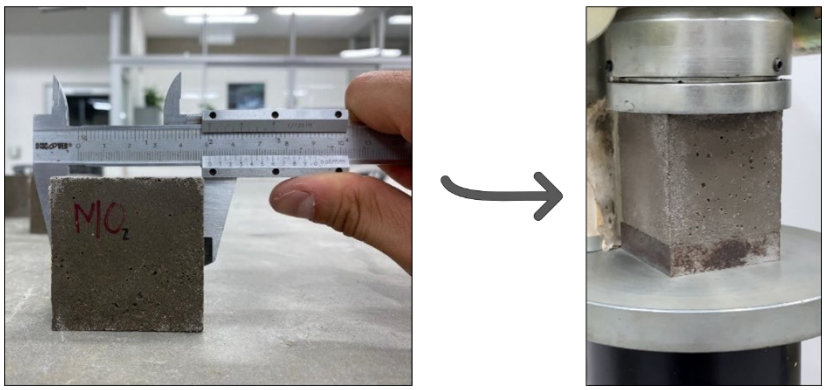


Figura 10. Preparación y montajes de cubos de mortero para el ensayo de resistencia a la compresión

3.6. Caracterización petrográfica de los morteros

A partir de los cubos y las barras de morteros se extrajeron secciones delgadas para ser analizadas petrográficamente mediante las técnicas de microscopía óptica y electrónica. Las secciones delgadas fueron fabricadas con espesores entre 20-30 µm. Las secciones delgadas para este proyecto de investigación fueron extraídas, cortadas y pulidas en el laboratorio Minerlab Ltda. De cada tipo de mortero se extrajo una sección delgada, según lo especificado en la norma ASTM-C856. Posteriormente, las secciones fueron llevadas al microscopio petrográfico y electrónico (SEM) donde fueron analizadas en detalle.

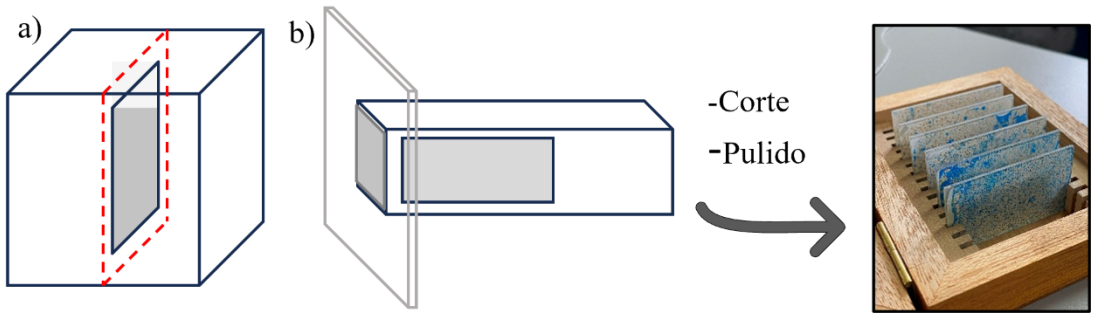


Figura 11. Esquema de extracción de secciones delgadas para a) cubos y b) barras de mortero.

3.5.1. Microscopia óptica

- **Estereomicroscopio:** se hizo un reconocimiento macroscópico con ayuda del estereomicroscopio, referencia Boeco. Se examinó la arena estandarizada empleada para la fabricación de cubos y barras de mortero. Se examinaron los cubos de las mezclas M0, M10, M20 y M30 en estado endurecido, posterior al ensayo de resistencia a compresión.

- **Microscopio petrográfico:** en un microscopio petrográfico Olympus 451 se analizaron secciones delgadas para el reconocimiento a nivel microscópico de los cubos y barras de mortero después de la falla a compresión y después del ataque de sulfatos durante dos meses, respectivamente. Se llevó a cabo un análisis completo por las secciones. En cada una de las secciones se tomaron cinco campos para el análisis de los agregados, la pasta (Cemento + Escoria), los vacíos y su relación con la arena. Se identificaron las fases minerales presentes, la homogeneidad y calidad de la pasta (Cemento + Escoria), así como las fisuras, reacciones y anomalías en la zona intersticial de la matriz.

3.5.2. Microscopio electrónico de barrido, SEM: después del ensayo de resistencia a la compresión de los cubos de mortero, se tomaron fragmentos de los cubos y barras y se analizaron sus morfologías superficiales y se hizo un mapeo composicional en algunos puntos en un microscopio electrónico JEOL JSM 6490 LV. Las muestras se fijaron en una cinta de grafito, se les realizó un recubrimiento delgado en oro (Au) por la técnica sputtering

Denton Vacuum Desk IV y se analizaron en el microscopio electrónico de barrido en alto vacío con el fin de obtener imágenes en alta resolución. Se empleó el detector de electrones retrodisperzados para evaluar la morfología y topografía de las muestras. El análisis elemental se realizó mediante una Microsonda de rayos X-EDX (referencia INCA PentaFETx3 Oxford Instruments

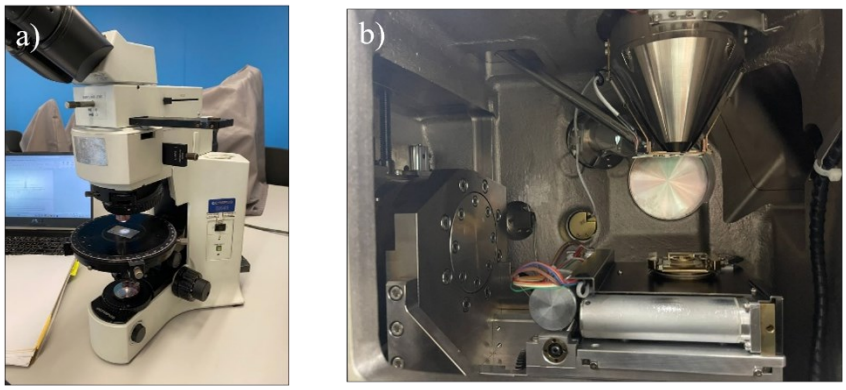


Figura 12. Equipos de análisis de secciones en a) Microscopio petrográfico Olympus y Microscopio electrónico de barridoJEOL JSM 6490 LV.

Capítulo IV: Resultados y discusión

Con el objeto de entender los efectos en las propiedades físicas y mecánicas de morteros adicionados con escoria de acero como sustituyente parcial del cemento, se presentan a continuación, los resultados obtenidos durante la caracterización macro y microestructural descrita en la metodología de esta investigación. En primer lugar, se analizaron los resultados obtenidos en la caracterización física y química de la escoria de acero. Seguidamente, se llevó a cabo una comparación de las propiedades físicas, mecánicas y químicas de cubos de morteros y se analizó el grado de deterioro de barras de mortero adicionadas con escoria y atacadas con sulfato de sodio. Por último, a través de una caracterización petrográfica de los cubos y las barras de mortero se contrastaron las relaciones entre los resultados macro y microestructurales de los diferentes porcentajes de sustitución.

4.1. Caracterización de la escoria de acero

La escoria de acero es un residuo industrial peligroso compuesto por elevadas concentraciones de hierro y zinc, sin embargo, cada residuo puede tener sus propias particularidades de aquí que la caracterización detallada de las escorias utilizadas en este trabajo permitió conocer su composición y propiedades físicas, para poder posteriormente analizar su comportamiento al ser adicionadas a morteros de cemento hidráulico.

4.1.1. Caracterización física

En primer lugar, se obtuvo una caracterización morfológica y física de las partículas a través de la descripción de su forma, color, distribución de tamaño de partícula, gravedad específica, límites de consistencia, densidad y área superficial.

- **Inspección visual:** la escoria de acero utilizada en este estudio presenta un color café oscuro, el cual es característico y ha sido descrito en escorias obtenidas de hornos de arco eléctrico durante la producción de acero (Pico Cortés, 2012) (Figura 13. a)); también es característico la tendencia que tienen las partículas de la escoria a aglomerarse y formar grumos (Figura 13. a)) (Nikolic et al., 2020). Con el apoyo de un estereomicroscopio fue posible observar la escoria aumentada 10 veces, las partículas de la escoria son anhedrales y tienden a conformar aglomerados con formas redondeadas (Figura 13. a)) (Nikolic et al., 2020; Pico Cortés, 2012). El tamaño, forma y aspecto aglomerado del residuo de escoria tiene un aspecto similar al cemento hidráulico (Figura 13. b)). La Figura 13. c) y d) permite ver las características texturales similares que se presentan entre el cemento y la escoria, ambas partículas tienen tendencia a formar cúmulos y se hace fácil el mezclado de ambos materiales sin necesidad de humedecer las muestras.

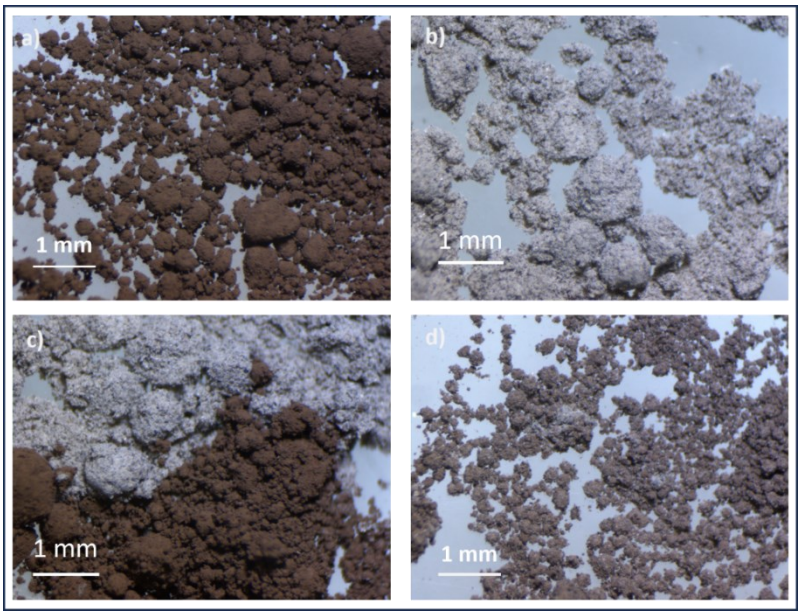


Figura 13. Escoria de acero y cemento hidráulico observados con un objetivo de 10 aumentos en un estereomicroscopio. a) Escoria de acero que pasa tamiz No 200. b) Cemento gris referencia Argos c) Cemento gris referencia Argos y escoria de acero d) Cemento gris referencia Argos mezclado por agitación manual con escoria de acero.

- **Granulometría por tamizado:** este ensayo revela la facilidad de las partículas para disgregarse ante la agitación continua de los tamices o al ser sometidas a presiones muy bajas la Figura 14, corresponde al aspecto que tiene la escoria una vez tamizada, todas las partículas son pasante malla No 200 (0,075 mm), por lo cual se puede clasificar como un suelo fino granular de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS), ASTM D2487.

- **Límites de Atterberg:** del ensayo de límites de consistencia se concluye que, la escoria se puede clasificar como un material fino granular NP (no plástico), ya que, no fue posible formar los royos con ningún contenido de humedad.

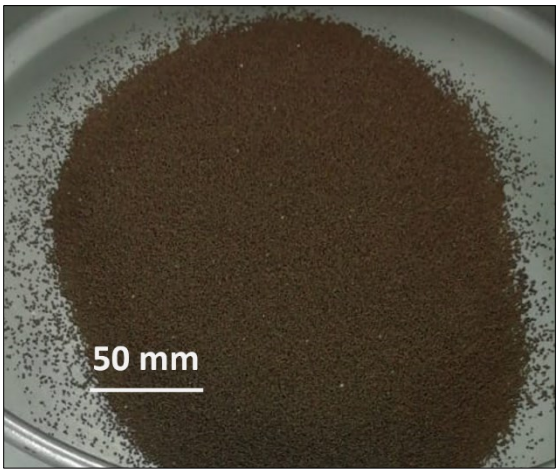


Figura14. Escoria de acero disgregada, después de prueba de granulometría por tamizado, 100 % de las partículas con tamaño inferior a 0,075 mm.

- **Análisis de tamaño de partícula por rayos láser, ATP:** la prueba ATP se llevó a cabo con las partículas de acero mezcladas en una solución de hexametafosfato de sodio para ayudar a mantener las partículas separadas y así evitar aglomeración de las partículas. La Tabla 7**.** contiene los porcentajes de peso retenido y pasante para cada tamaño de partícula y su respectivo volumen.

Tabla 7. Resultado del análisis de tamaño de partícula por rayos láser, ATP.

Tamaño, mm	Volumen, %	Peso, g	Peso retenido acumulado, g	Retenido, %	Retenido acumulado, %	Pasante, %
0,1416	0,061	0,260	0,260	0,061	0,061	99,939
0,1262	0,702	2,976	3,237	0,702	0,763	99,237
0,1125	1,535	6,507	9,744	1,535	2,298	97,702
0,1002	2,518	10,675	20,418	2,518	4,816	95,184
0,0893	3,599	15,258	35,676	3,599	8,414	91,586
0,0796	4,661	19,762	55,438	4,661	13,075	86,925
0,0710	5,614	23,805	79,243	5,614	18,689	81,311
0,0632	6,375	27,031	106,274	6,375	25,065	74,935
0,0564	6,857	29,075	135,349	6,857	31,922	68,078
0,0502	7,039	29,847	165,196	7,039	38,961	61,039
0,0448	6,911	29,301	194,497	6,911	45,872	54,128
0,0399	6,506	27,584	222,081	6,506	52,378	47,622
0,0356	5,892	24,983	247,065	5,892	58,270	41,730
0,0317	5,146	21,821	268,886	5,146	63,416	36,584
0,0283	4,345	18,424	287,309	4,345	67,762	32,238
0,0252	3,579	15,174	302,483	3,579	71,340	28,660
0,0224	2,885	12,234	314,717	2,885	74,226	25,774
0,0200	2,327	9,865	324,582	2,327	76,552	23,448

Tamaño, mm	Volumen, %	Peso, g	Peso retenido acumulado, g	Retenido, %	Retenido acumulado, %	Pasante, %
0,0178	1,899	8,051	332,633	1,899	78,451	21,549
0,0159	1,613	6,839	339,472	1,613	80,064	19,936
0,0142	1,443	6,117	345,589	1,443	81,507	18,493
0,0126	1,364	5,781	351,370	1,364	82,870	17,130
0,0112	1,344	5,700	357,071	1,344	84,215	15,785
0,0100	1,355	5,746	362,817	1,355	85,570	14,430
0,0089	1,370	5,809	368,626	1,370	86,940	13,060
0,0080	1,371	5,813	374,439	1,371	88,311	11,689
0,0071	1,347	5,710	380,149	1,347	89,658	10,342
0,0063	1,293	5,481	385,631	1,293	90,951	9,049
0,0056	1,211	5,134	390,765	1,211	92,161	7,839
0,0050	1,107	4,693	395,457	1,107	93,268	6,732
0,0045	0,987	4,186	399,643	0,987	94,255	5,745
0,0040	0,863	3,657	403,300	0,863	95,118	4,882
0,0036	0,737	3,125	406,426	0,737	95,855	4,145
0,0032	0,622	2,636	409,062	0,622	96,477	3,523
0,0028	0,517	2,192	411,254	0,517	96,994	3,006
0,0025	0,428	1,816	413,071	0,428	97,422	2,578
0,0022	0,354	1,503	414,573	0,354	97,777	2,223
0,0020	0,295	1,249	415,822	0,295	98,071	1,929
0,0018	0,247	1,048	416,870	0,247	98,318	1,682
0,0016	0,209	0,885	417,755	0,209	98,527	1,473
0,0014	0,178	0,756	418,511	0,178	98,705	1,295
0,0013	0,152	0,643	419,154	0,152	98,857	1,143
0,0011	0,128	0,545	419,699	0,128	98,986	1,014
0,0010	0,107	0,455	420,154	0,107	99,093	0,907
0,0009	0,088	0,374	420,528	0,088	99,181	0,819
0,0008	0,070	0,296	420,823	0,070	99,251	0,749
0,0007	0,059	0,248	421,072	0,059	99,309	0,691
0,0006	0,046	0,195	421,267	0,046	99,355	0,645
0,0006	0,020	0,085	421,352	0,020	99,375	0,625
0,0005	0,019	0,080	421,432	0,019	99,394	0,606
0,0004	0,028	0,117	421,549	0,028	99,422	0,578
0,0004	0,034	0,146	421,695	0,034	99,456	0,544
0,0004	0,044	0,186	421,880	0,044	99,500	0,500
0,0003	0,053	0,225	422,105	0,053	99,553	0,447
0,0003	0,061	0,257	422,362	0,061	99,614	0,386
0,0003	0,066	0,279	422,641	0,066	99,680	0,320
0,0002	0,068	0,288	422,929	0,068	99,747	0,253
0,0002	0,066	0,279	423,209	0,066	99,813	0,187
0,0002	0,062	0,261	423,469	0,062	99,875	0,125

Tamaño, mm	Volumen, %	Peso, g	Peso retenido acumulado, g	Retenido, %	Retenido acumulado, %	Pasante, %
0,0002	0,052	0,220	423,690	0,052	99,927	0,073
0,0001	0,041	0,172	423,861	0,041	99,967	0,033
0,0001	0,023	0,099	423,961	0,023	99,991	0,009
0,0001	0,009	0,039	424,000	0,009	100,000	0,000

Con los resultados del ensayo ATP (Tabla 7.) se construyó la gráfica que relaciona el tamaño de partícula con su volumen expresado en porcentaje y el porcentaje que pasa (Figura 15). El tamaño de las partículas de escoria se presenta con una concentración de volumen en el rango de 0,0796 a 0,028 mm, en este rango se encuentran más del 50 % de las partículas, el 13 % de las partículas tiene tamaño mayor a 0,0796 mm. El coeficiente de uniformidad, Cu es 7,08 y el coeficiente curvatura, Cc es 2,24, de lo cual se puede concluir que la curva granulométrica de la escoria de acero corresponde a una curva bien gradada (SUCS), ASTM D2487.

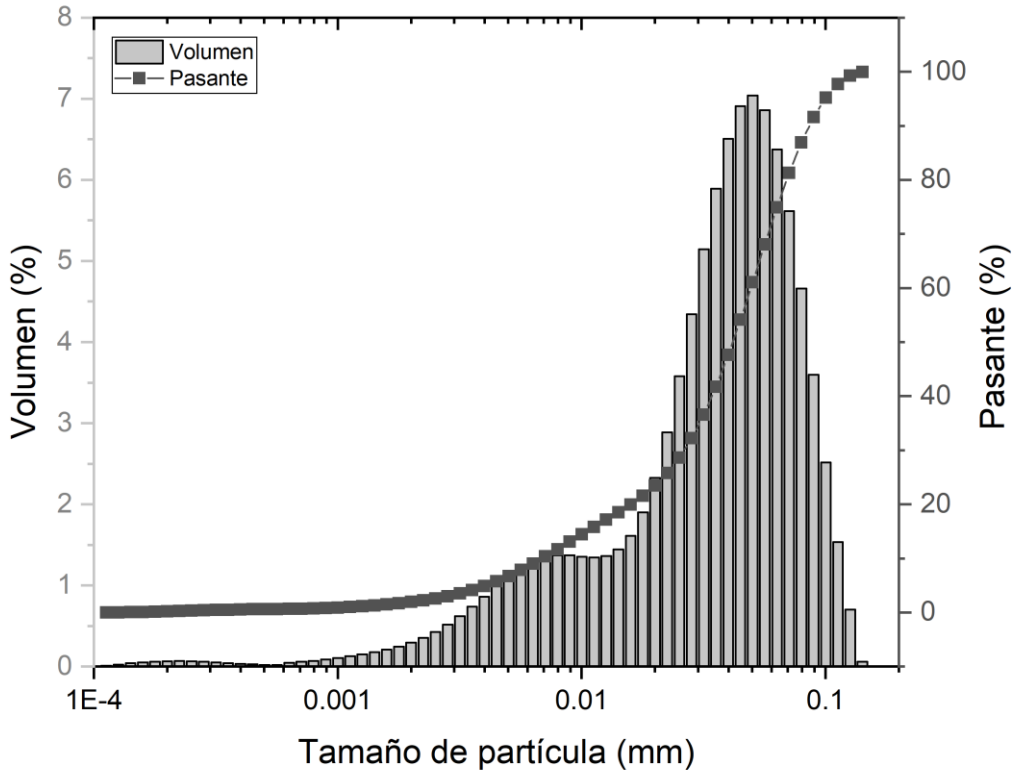


Figura 15. Curva granulométrica y distribución volumétrica de tamaño de partícula de la escoria de acero.

La distribución de tamaños de la escoria (Figura 15.), es consecuente con algunos estudios mencionados por (Nair et al., 2022) en los que se reportan tamaños desde 0.001 hasta 0,25 mm. Otros autores reportan tamaños de partícula inferiores para la escoria como el caso de (Ledesma et al., 2017; A. Lozano-Lunar et al., 2019), quienes señalan escorias con más del 70% con tamaños inferiores a 0,010 mm. Por otro lado, el tamaño de partícula del polvo gris o cemento hidráulico puede oscilar entre 0,001 mm a 0,05 mm (Metha & Monteiro, 2006), lo que favorece el uso de escoria como sustitución del cemento.

- **Gravedad específica y densidad real:** la gravedad específica de la escoria es 4,44 y la densidad real de 4,24 g/cm^3. La literatura reporta que algunas escorias de acero provenientes de hornos de arco eléctrico tienen valores de orden superior de 3,50 g/cm^3. (Ledesma et al., 2017; A. Lozano-Lunar et al., 2019; Nair et al., 2022).

- **Área superficial:** en la Tabla 8. se presentan los resultados de la prueba de área superficial por método BET.

Tabla 8. Resultado del ensayo de área superficial por método BET.

Parámetro	Resultado
Área superficial, m²/g	10.48
Diámetro promedio del poro en adsorción, nm	23,16
Diámetro promedio del poro en desorción, nm	16,50
Área de los poros, m²/g	2,50
Volumen de poros, cm³/g	0,00117

Los valores de superficie específica para el cemento oscilan entre 0,2 a 1 m²/g, encontrados por los métodos de Wagner, Lea and Nurse, Nitrogen adsorption y BET (A.M. Neville, 1997; Angélica Lozano-Lunar et al., 2019). Contrastado el resultado obtenido para la escoria acero de esta investigación, se tiene que el área superficial es del orden de 10 veces mayor con respecto a los valores antes señalados para el cemento, mientras que otros estudios que han usado escorias de acero reportan valores de área específica entre 0,5 y 4,6 m²/g (Araos Henríquez et al., 2021; Ledesma et al., 2017; Tan et al., 2023). El tamaño de poro en adsorción y desorción de la escoria fue de 23,16 y 16,50 nm, respectivamente. Algunos estudios presentan valores que están entre 20 y 50 nm (Ahmad et al., 2018; Meshram et al., 2023; Nair et al., 2022).

4.1.2. Caracterización química de la escoria

Con el fin de conocer la composición química elemental y fases cristalinas de la escoria de acero se llevaron a cabo los ensayos de fluorescencia y difracción de rayos X.

- **Fluorescencia de rayos X, FRX:** el análisis mediante fluorescencia de rayos X mostró que la escoria tiene una composición química conformada principalmente de óxido de zinc (57,97 %) y trióxido de hierro (21,32 %) (Tabla 9.) Otros elementos

que acompañan el Zn y el Fe son PbO, MgO y MnO con porcentaje en peso por encima de 2,5 w %, mientras que los elementos Cl, SO_2, SO_3, K_2O, CaO, Al_2O_3, CuO y Br corresponden a cantidades inferiores a 2,5 w%.

Tabla 9. Análisis de fluorescencia de rayos X - FRX**.**

Óxido	ZnO	Fe_2O_3	PbO	MgO	MnO	Cl	SO_2	SO_3	K_2O	CaO	Al_2O_3	CuO	Br	Otros
EAFD (w%)	57,97	21,32	3,77	3,05	2,63	2,36	2,04	1,9	1,62	1,08	0,58	0,39	0,36	0,94

Investigaciones que han estudiado escorias de acero provenientes de hornos de arco eléctrico han encontrado composiciones similares con respecto al contenido de ZnO (con valores superiores al 30 %) y Fe_2O_3 (con valores cercanos al 30 %), además de otros elementos con porcentajes menores (Al-Harahsheh et al., 2021; Ledesma et al., 2017; Angélica Lozano-Lunar et al., 2019; Magalhães et al., 2019; Nair et al., 2022).

- **Difracción de rayos X, DRX**: el difractograma de la escoria de acero (Figura 16.) muestra picos característicos y con alta intensidad de las fases Zincita (ZnO) y Franklinita (Fe_2O_3), característica común de encontrar en pruebas de difracción de escorias de acero generadas en hornos de arco eléctrico (Ledesma et al., 2017)(da Silva Magalhães et al., 2017) (Nair et al., 2022), también se encontrar compuestos como Magenetita (Fe_3O_4), Calcita ($CaCO_3$) y PbO_2.

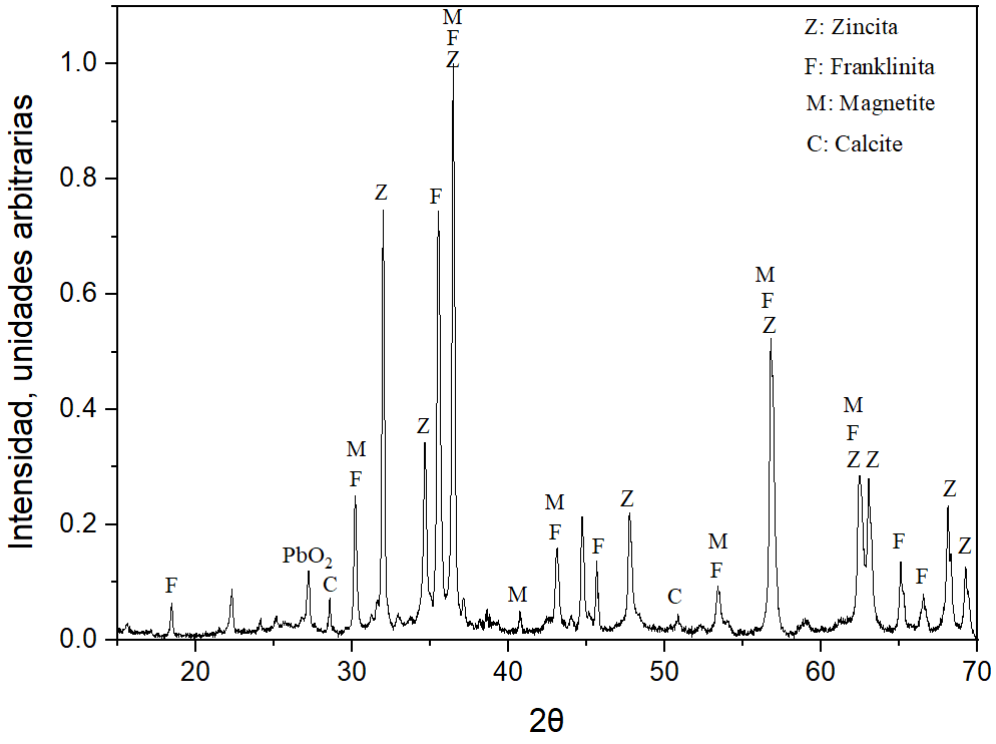


Figura 16. Difractograma de muestra en polvo escoria de acero.

- **Microscopía electrónica de barrido, SEM:** las partículas de escoria de acero vistas mediante microscopía electrónica (Figura 17.), muestran la formación de aglomerados conformados a partir de partículas individuales anhedrales con esquinas redondeadas y textura porosa.

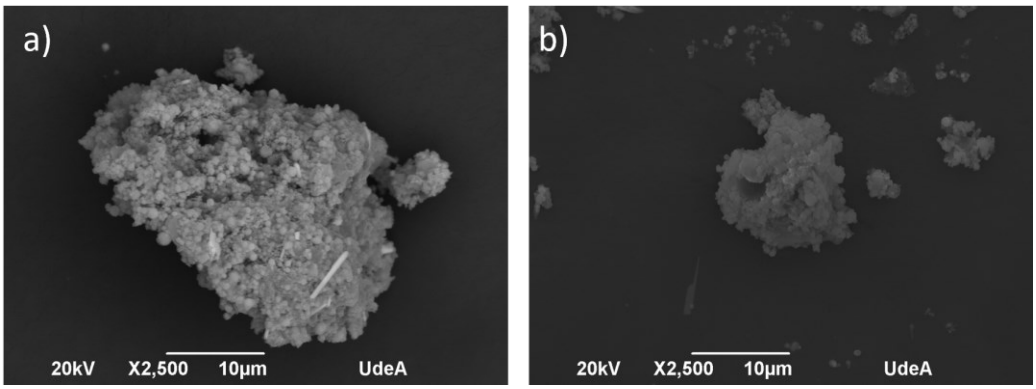
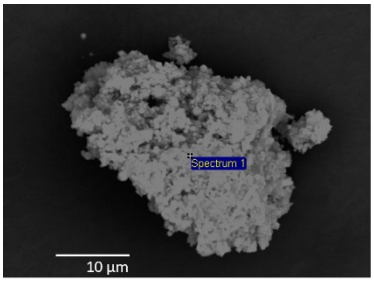
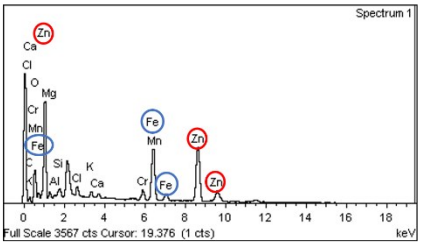


Figura 17. Electrones retrodipersados SEM, escoria de acero, muestra en polvo.

El análisis EDX puntual sobre el aglomerado de escoria de acero (Figura 18.) confirmó la composición química de la escoria con alto contenido de Zn y Fe. El espectro obtenido muestra picos con alta intensidad, además de la tabla con los elementos principales de Zn y Fe. El EDX puntual tiene correspondencia con la composición química encontrada en el FRX y DRX.





Elemento	% en peso	% atómico
Zn K	49.99	26.23
Fe K	18.83	11.56
Mn K	2.87	1.79
Mg K	1.86	2.62
Cl K	1.52	1.47
Si K	1.17	1.43

Figura 18. Análisis composicional SEM-EDX puntual en partículas de escoria de acero.

La caracterización de la escoria de acero muestra resultados característicos de escorias clasificadas como polvo de horno de arco eléctrico (Eletric Arc Furnace Dust-EAFD), este tipo de escoria tiene carácter contaminante por su alto contenido de metales pesados como Zn, Fe, Pb y Mn. Las escorias EAFD con altos contenidos de metales como Zn y Fe cuando son dispuestas en botaderos eventualmente podrían iniciar procesos de lixiviación lo que potencializa la contaminación de aguas subterráneas; adicionalmente, por su tamaño de partícula ser tan fino con facilidad logran ser trasportadas por corrientes de aire y depositadas posteriormente en zonas de cultivos contaminando los alimentos (Ledesma et al., 2017; Magalhães et al., 2019; Nair et al., 2022).

4.2. Caracterización física y mecánica de los morteros

La arena para cada una de las mezclas de mortero fue clasificada para que cumpliera con los rangos granulométricos de arena estandarizada de acuerdo con la norma ASMT-C778.

- **Estandarización de la arena:** la curva granulométrica de la arena estandarizada cumple con la norma ASTM-C778; en la Figura 19. las curvas negra y gris muestran los límites de estandarización inferior y superior, respectivamente, (norma ASMT-C778), la curva verde representa los porcentajes de pasante para una de las muestras empleadas para las mezclas.

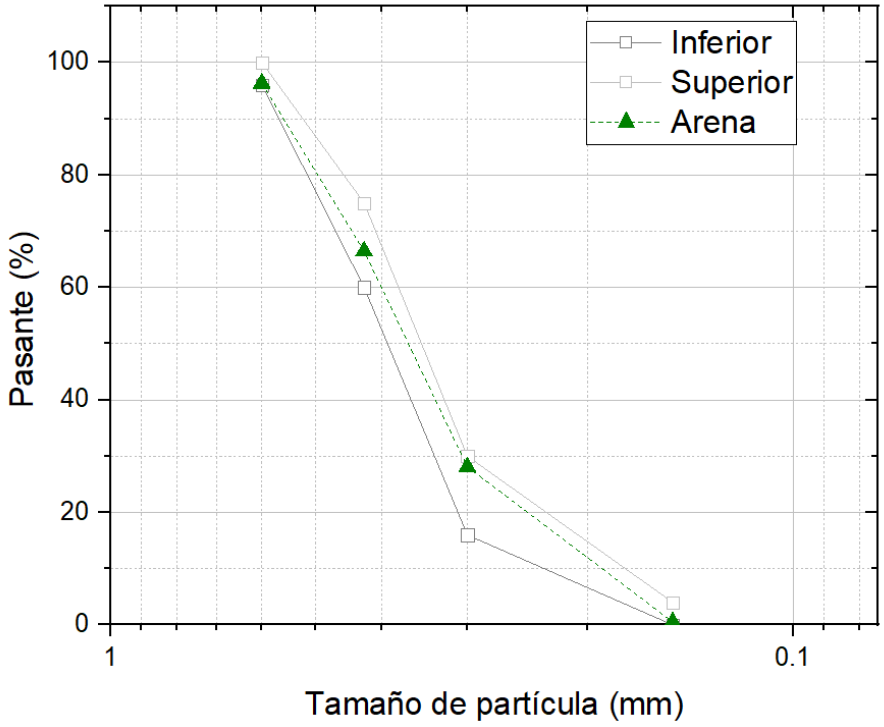


Figura 19. Curva granulométrica de la arena estandarizada para las mezclas de mortero.

Por medio de inspección visual y con ayuda de un estereomicroscopio fue posible reconocer algunas fases minerales presentes en la arena. En el Figura 20. se observa además de las fases minerales, algunas características de los granos de arena. La composición del agregado permite reconocer fases ferromagnesianas y no ferromagnesianas, razón por la cual el color de la arena es heterogéneo (Figura 20. a), b)), la forma de las partículas es esencialmente sub redondeada angular, y algunas tiene variación con esquinas totalmente redondeadas. En la Figura 20. c) se pueden observar minerales del grupo de los filosilicatos, que son fases laminares como hojas delgadas, característica distintiva de los minerales del grupo de las micas, también fue posible reconocer fragmentos de roca compuestas por minerales ferromagnesianos y no ferromagnesianos. En términos generales la textura de la arena es lisa, aunque algunos fragmentos de roca mostraron textura rugosa (Figura 20. d)).

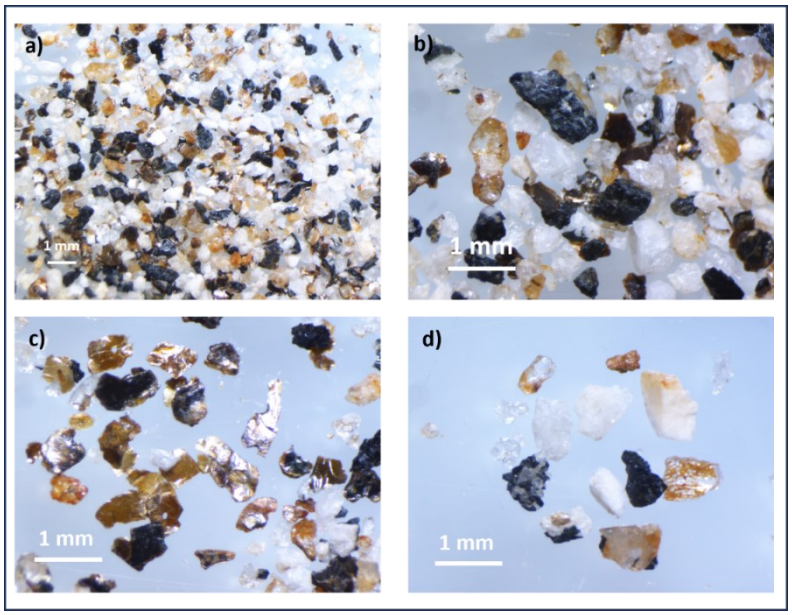


Figura 20. Arena en el estereomicroscopio. a) y b) agregado de arena c) minerales con foliación del grupo de las micas d) diferentes granos de arena estandarizada, incluidos fragmentos de roca.

Calibración de la fluidez de la mezcla control: la fluidez de la mezcla de control se definió con base en la norma ASTM C109. Para ello, se llevaron a cabo varios ensayos con diferentes relaciones agua cemento (A/C) hasta alcanzar la consistencia requerida. En la Figura 21. se pueden observar los resultados correspondientes al porcentaje de fluidez para cada relación A/C. A partir de estos resultados se definió la relación A/C=0,97 para un porcentaje de fluidez control de 105±5 %. La Figura 21**.** permite evidenciar la sensibilidad que tiene la mezcla para cambiar su consistencia de fluido a plástico. Cambios inferiores a 0,05 en la relación A/C, aumentaron o disminuyeron hasta un 10% el porcentaje de fluidez de las mezclas.

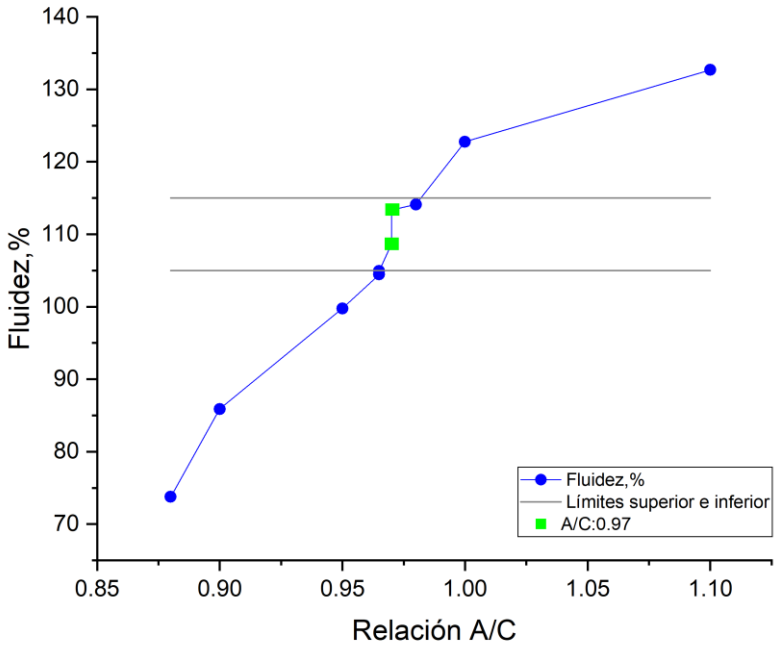


Figura 21. Calibración de la fluidez para mezcla control M0.

4.2.1. Fluidez de la mezcla

Los datos de fluidez de M0 son la referencia que permite comparar las variaciones de fluidez de los morteros con adiciones de escoria (M5, M10, M15, M20, y M30). Los resultados del ensayo de fluidez de las mezclas en estado fresco usadas en la elaboración de los cubos de mortero se muestras en la Tabla 10.**,** los diámetros de cada mezcla tienden a estar cerca del diámetro promedio. En la Figura 22**.** se muestra el porcentaje de fluidez calculado a partir del diámetro promedio para cada uno de los porcentajes de sustitución, de acuerdo con la norma ASTM C230.

Tabla 10. Resultados de ensayo de fluidez en mezclas para elaboración de cubos de mortero.

Mortero	Diámetro, cm	Promedio, cm	Fluidez, %	Desviación estándar
M0	21,00 20,60 20,70 20,70	20,75	105,45	0,17
M5	20,60 20,30 21,40 20,50	20,70	104,95	0,48

Mortero	Diámetro, cm	Promedio, cm	Fluidez, %	Desviación estándar
M10	19,40 19,80 20,00 19,80	19,75	95,54	0,25
M15	18,50 19,50 19,00 19,40	19,10	89,11	0,45
M20	18,00 18,20 18,20 18,60	18,25	80,69	0,25
M30	16,80 17,20 17,20 17,70	17,23	70,54	0,37

La sustitución del 5 % de cemento por escoria de acero conserva la fluidez de la mezcla control; mientras que con una sustitución del 10 % la fluidez cae cerca del 10 % respecto a la fluidez control. Para el resto de las mezclas M15, M20 y M30, la fluidez cae hasta en un 15,49, 23,47 y 33,10 %, respectivamente. Es evidente que la sustitución de cemento por escoria refleja una pérdida de trabajabilidad en la mezcla; al aumentar el contenido de reemplazo del cemento por las escorias de acero aumenta la pérdida de trabajabilidad (Figura 22.), al perder trabajabilidad la mezcla pierde aplicabilidad, ya que, en conformidad con la norma colombiana, los morteros deben tener una fluidez superior al 100 %, Capitulo, Tabla D.3.4-1 NSR (AIS, 2010).

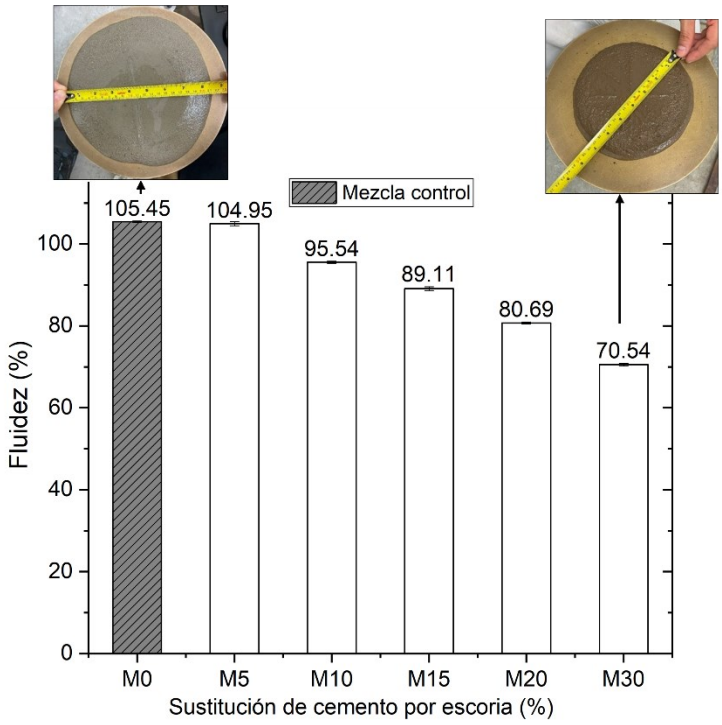


Figura 22. Porcentaje de fluidez en estado fresco de las mezclas de mortero.

Control de fraguado y curado de los cubos: una vez fraguada la pasta para cada tipo de mezcla, los cubos fueron sumergidos en agua. En la Figura 23, se comparan los tiempos que tardó el fraguado y el tiempo de los cubos bajo agua. M0 estuvo en agua 28 días, mientras que M30 nunca fue colocado en inmersión, los cubos M5 y M10 estuvieron en el agua 22 días, M15-20 días y M20-17 días. El cambio en el tiempo de fraguado de las mezclas está asociado al alto contenido de ZnO que retrasa el proceso de hidratación del cemento (Alizadeh & Momeni, 2016; Ledesma et al., 2017; Tan et al., 2023).

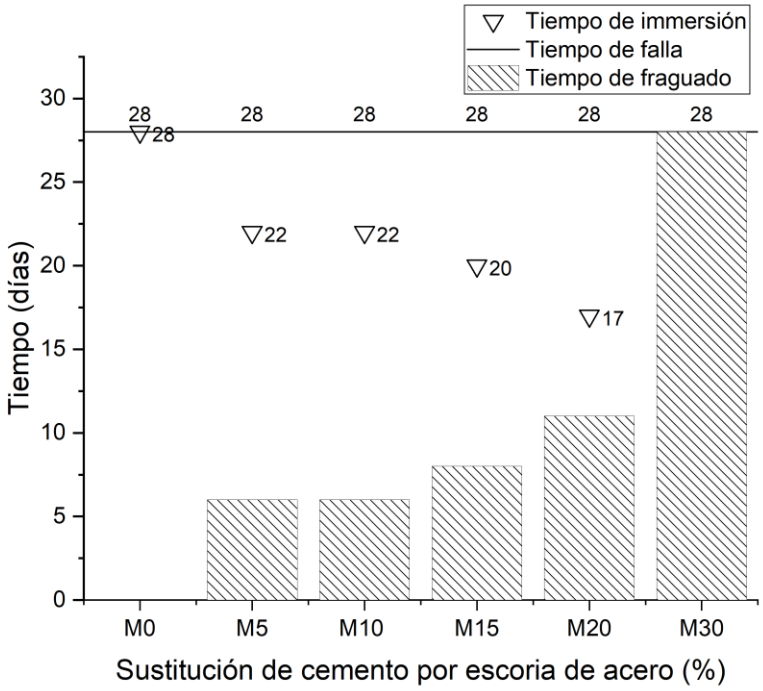


Figura 23. Tiempos de fraguado e inmersión de los cubos de mortero.

La composición de la escoria, principalmente sus altos contenidos de Zinc han sido reportados como responsables de retrasar los procesos de fraguado en los morteros (Alizadeh & Momeni, 2016)(Ledesma et al., 2017)(Nair et al., 2022). Han sido reportados retrasos en el proceso de algunas horas, sin embargo, los cubos con sustitución de cemento por la escoria de acero de este trabajo permitieron reconocer que el proceso de fraguado toma tiempos considerables y que a su vez son mayores en concordancia con una mayor sustitución de cemento por escoria de acero. En la Figura 24. se observa la apariencia endurecida del mortero, que es una condición superficial, ya que la consistencia de la mezcla continuó siendo plástica después de pasadas 24 horas con los cubos encofrados. Cuando se desencofraron, los cubos se deformaron y se observó un desprendimiento de la mezcla de arriba hacia abajo, posteriormente cuando fueron colocados en inmersión, claramente se desprendió parte de la pasta, fenómeno que se puede describir como un desplome de la mezcla de las caras laterales del cubo. El retraso en el endurecimiento también puede estar relacionado con la relación A/C ya que es un valor relativamente alto en este trabajo; algunos autores solo reportan retrasos del orden de horas, pero con relaciones A/C menores a 0,5 (Alizadeh & Momeni, 2016)(Ledesma et al., 2017)(Nair et al., 2022).



Figura 24. Consistencia de cubos con sustituciones de cemento por escoria 24 horas después del vaciado.

4.2.2. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se compara a partir de la resistencia M0 (0 % de escoria) que permite comparar las variaciones del comportamiento mecánico frente a cargas de compresión de los morteros con adiciones de escoria (M5, M10, M15, M20, y M30). La resistencia a la compresión para cada una de las mezclas se muestra en la Tabla 11**.**, para cada porcentaje de sustitución se fallaron tres cubos de mortero después de 28 días de curado.

Tabla 11. Resultados de resistencia a la compresión.

Mortero	f´c , MPa	f´c promedio, MPa	Desviación estándar
M0	10,86 10,28 11,28	10,81	0,50
M5	12,2 12,64 13,62	12,82	0,73
M10	9,39 8,68 9,56	9,21	0,47
M15	6,33 6,61 5,84	6,26	0,39
M20	6,18 6,12 5,88	6,06	0,16
M30	4,41 3,83 3,98	4,07	0,30

La capacidad de los cubos para soportar cargas de compresión disminuye a excepción de los cubos M5, cuya resistencia superó en un 18 % la resistencia control M0 (Figura 25). Los cubos M10 presentaron una disminución del 15 % con relación a M0, mientras que para los demás porcentajes se presentaron caídas superiores al 40 % (M15, M20) y hasta el 60 % para el caso de M30.

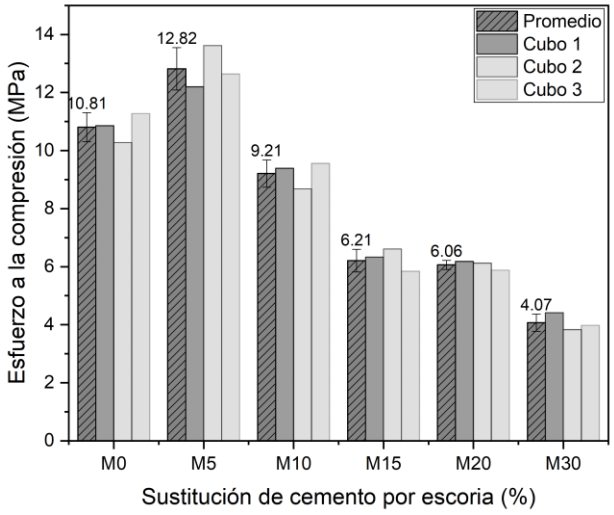


Figura 25. Resistencia a la compresión de cubos de mortero a los 28 días de curado.

Los resultados en la prueba de resistencia a la compresión para los cubos M10, M15, M20 y M30 coinciden con algunos estudios previos en los que es común que la resistencia disminuya con el aumento de sustitución de cemento por escoria (Colorado et al., 2016) (Ledesma et al., 2017)(Nikolic et al., 2020). Sin embargo, otros estudios en los que han empleado activadores se han presentado aumentos en la resistencia respecto a la muestra control en porcentajes de sustitución inferiores al 10 % (Nikolic et al., 2020; Tan et al., 2023), para el caso específico de esta investigación M5 mejoró con la sustitución del 5% de cemento su resistencia frente a cargas de compresión, por tanto, podría ser un porcentaje de interés para futuras investigaciones. Por otro lado, los valores de resistencia a compresión obtenidos son inferiores a 15 MPa, estas resistencias tan bajas tienen relación con el factor A/C empleado, además de la variación en las condiciones de curado provocadas por el retraso en el fraguado del cemento. Adicionalmente, el tipo de falla de los cubos M0, M5, M10, M15, M20 y M30 De acuerdo con la norma BS EN 12390-3:2019, presentaron falla tipo no explosiva (Hamad, 2017), solo los cubos M15 y M20 mostraron fractura planar en una de sus caras (Figura 26.).

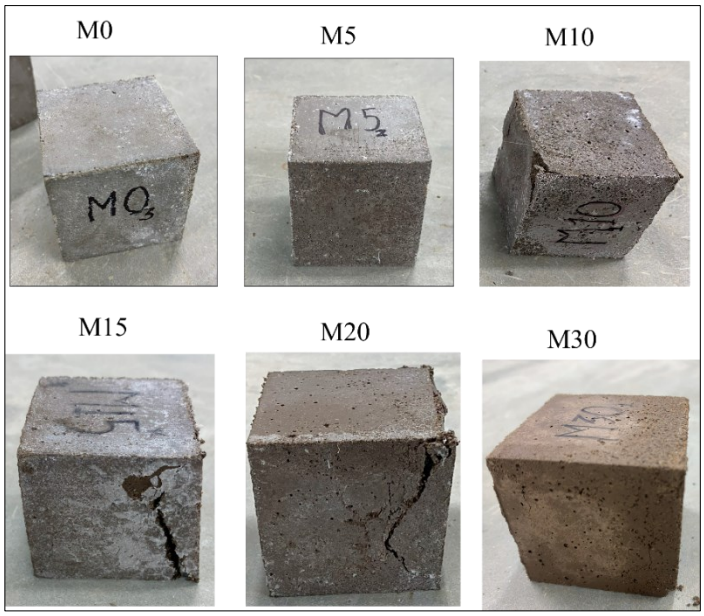


Figura 26. Falla de cubos de mortero a los 28 días de curado.

Al comparar las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes morteros adicionados con escoria de acero (M5, M10, M15, M20 y M30) con respecto a su blanco M0 (Figura 27.), es claro que la sustitución de la escoria tiene efectos adversos para porcentajes de sustitución superiores al 5 %; porcentajes más altos de sustitución disminuyen su trabajabilidad en estado fresco y su resistencia ante cargas de compresión en estado endurecido. Por lo anterior, los morteros con porcentajes de sustitución del 5 y 10 %, visualizan una alternativa de uso para aplicaciones de índole no estructural, pues, en el caso de M10 solo tuvo disminuciones en fluidez y resistencia a la compresión del 10 y el 15 %, respectivamente, mientras M5 mantuvo aproximadamente igual la fluidez y aumentó su desempeño mecánico con respecto a la mezcla control (Figura 27.).

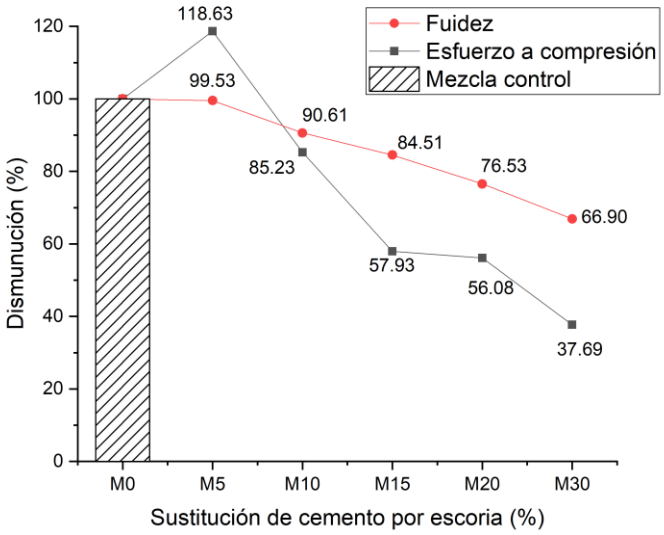


Figura 27. Comparación de los cambios físicos y mecánicos entre los morteros adicionados con escoria de acero y su blanco.

4.3.Petrografía de mortero.

El estudio de las propiedades microestructurales de los cubos y las barras de mortero se llevó a cabo a través de técnicas de caracterización petrográficas: estereomicroscopio, microscopio petrográfico y microscopio electrónico de barrido. Inicialmente, se hizo un reconocimiento general describiendo forma, tamaño, textura, composición química, fisuras, defectos, calidad de adherencia y reacciones anómalas en las diferentes componentes de los morteros, luego se analizó la distribución y relación entre cada uno de los elementos y finalmente, se relacionaron las características microscópicas identificadas con los resultados físicos y mecánicos.

4.3.1 Análisis petrográfico de cubos de mortero.

Estereomicroscopio: se reconocieron fases minerales de la arena y su forma con el objeto de observar y describir el comportamiento del mineral, su reactividad con el cemento y su relación con el desarrollo de la resistencia. Con fragmentos de cubos endurecidos en las caras expuestas se reconoció el aspecto y la relación agregado – pasta.

En el cubo de mortero M0 (Figura 28.), se aprecia una superficie compacta y densa, se reconocen propiedades diagnósticas de algunos minerales y su apropiada adherencia con el cemento, que presenta un color gris característico. Entre las fases minerales sobresalen algunos granos de micas en la superficie. También se pueden reconocer los espacios vacíos asociados a varios granos de arena que se han desprendido. En la superficie expuesta se ve una distribución aleatoria del agregado en el cemento, mientras se fragmentaron los bloques de los cubos ya fallados se puedo corroborar que a menor sustitución de cemento la resistencia de los fragmentos para ser separados era mayor.



Figura 28. M0 estereomicroscopio. Fractura de cubo M0.

En la Figura 29., el fragmento M10 aparece con precipitado cerca de la superficie color blanco en algunos de los espacios vacíos. La coloración de la superficie cambió sutilmente con respecto a la muestra control M0, aunque, en la mayoría de área se conservó el color gris del cemento. Es fácil distinguir minerales micáceos por su foliación característica, también se identifican minerales que por su apariencia incolora se presume sean cuarzo. Al momento de fragmentar el cubo M10, su capacidad para no ser separado es menor respecto a M0. En la Figura 29. se aprecia señalado en el circulo negro el cambio en el color de la pasta cementante.



Figura 29. M10 estereomicroscopio. Fractura de cubo M10

Para el caso de la Figura 30., en el fragmento de cubo M20 surgen más granos de precipitados blancos y aparecen con mayor frecuencia de afuera (exterior) hacia adentro (interior), en los poros vacíos se distingue una menor adhesión, como si los granos del agregado estuvieran menos compactos. Fue fácil comprobar esta condición por medio de la fricción de los dedos sobre la superficie, los granos del agregado y la pasta se desmoronaban. En la Figura 30., se observan señalados entre círculos los precipitados de color blanco. En M20 se percibió con facilidad la reducción de la resistencia del cubo ante la fragmentación. El cambio de color en la superficie es de mayor intensidad para M20.

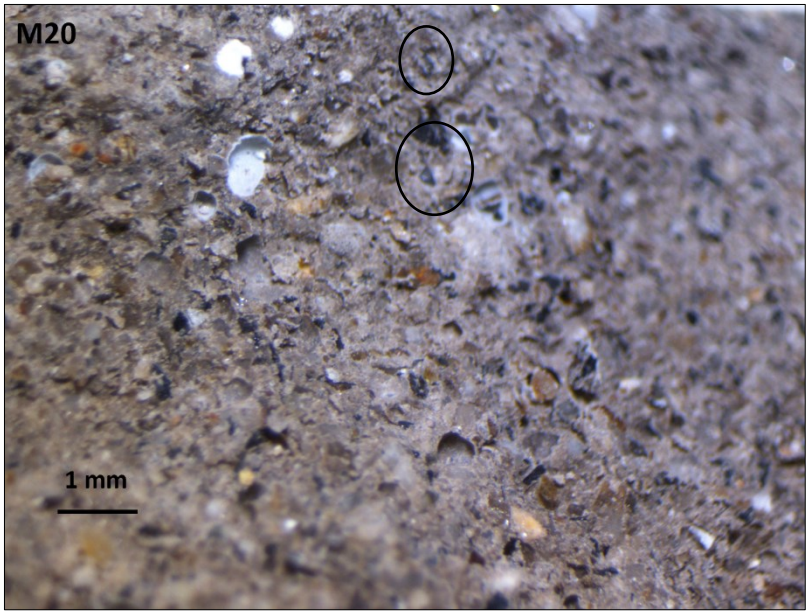


Figura 30. M20 estereomicroscopio. Fractura de cubo M20.

En la Figura 31. M30 se observan señalados en círculos la formación de cúmulos o aglomerados de escoria de acero. La textura del cubo es terrosa y más blanda que las anteriores M20, M10 y M0. En M30 no se presentaron los precipitados blancos que se observaron en M10 y M20. La apariencia de la superficie es menos densa y los granos y pasta tienden a desarmarse o desmoronarse en las caras superficiales por sí solas o con movimientos leves, por ejemplo, como en el caso de M20, con la frotación de los dedos en la superficie. Al momento de tomar los fragmentos, M30 no tuvo resistencia y se fracturó con facilidad.

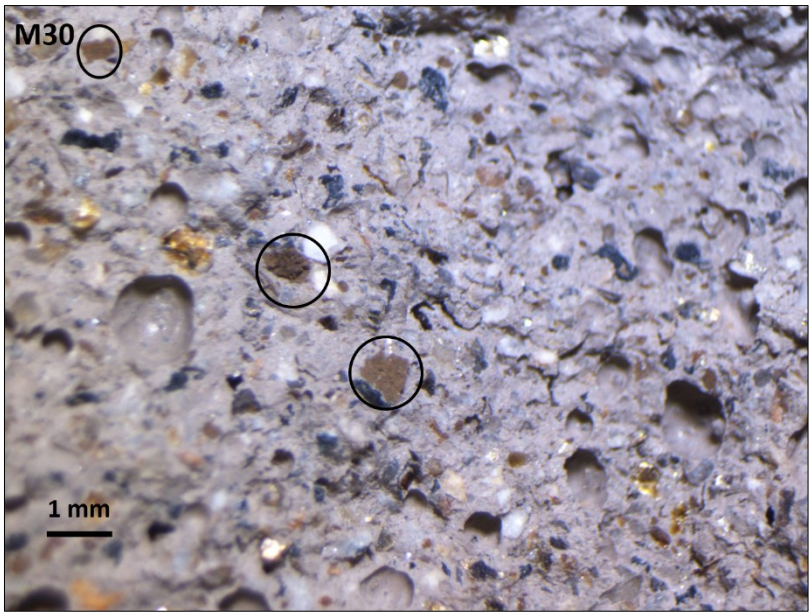


Figura 31. M30 estereomicroscopio. Fractura de cubo M30

4.3.2 Análisis de secciones delgadas: las secciones delgadas fueron analizadas en un microscopio Olympus BX41 en el laboratorio de Ciencias de la Tierra de la Universidad Eafit. El análisis petrográfico se enfocó en diferentes etapas: reconocimiento de las fases minerales del agregado; inspección de las características y calidad de la pasta cementante; características y tamaño de las fracturas; calidad de la adherencia entre el cemento y los agregados. En total fueron analizadas ocho secciones delgadas, cuatro láminas fueron extraídas de uno de los cubos M0, M10, M20 y M30 y otras cuatro láminas para analizar el ataque de iones de sulfato de sodio en barras de mortero BM0, BM10 y BM20 transversal y paralela a la longitud de la barra. Las secciones delgadas tienen tinción azul en la resina que permite identificar vacíos y fisuras en cada uno de los tipos de mezcla. A continuación, se presentan los hallazgos encontrados:

Fases minerales que componen el agregado: el agregado está compuesto por Biotita:Bt, Moscovita: Ms, Cuarzo: Qz, Plagioclasa: Pl , Anfibol: Anf , Fragmentos de Roca: Frag-roca, y algunos granos Amorfos: Amorf. Todas las fases minerales tuvieron algún representante en el rango de tamaño del agregado (0,16 – 0,6 mm). A continuación, se encuentran las descripciones de las propiedades morfológicas y ópticas de cada una de las fases identificadas:

Biotita, Bt ($K_2(Mg,Fe)_6Al_2Si_6O_{20}(OH,F)_4$): se encontraron cristales con forma euhedral a subhedral, su hábito es tabular, con bordes longitudinales bien definidos y esquinas irregulares. Es notable el pleocroísmo con color marrón con diferentes intensidades (Figura 32. a). Se puede observar en muchos granos la foliación donde inclusive se observa cómo se abren las hojas, o láminas en la dirección paralela al alargamiento de los granos.

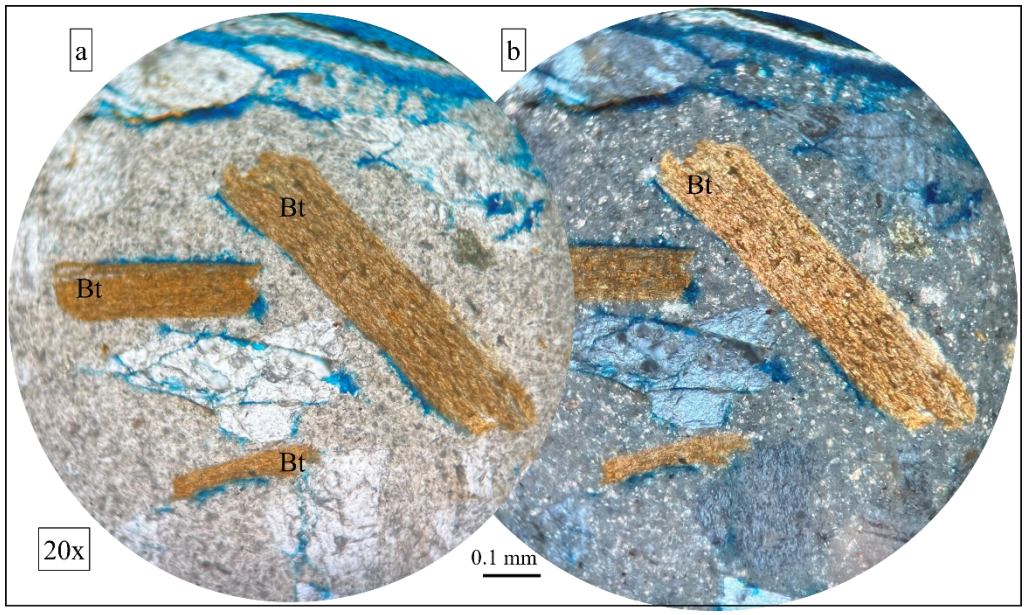


Figura 32. Cristales de biotita (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados.

Muscovita, Ms ($K_2Al_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$): su presencia es escaza entre los granos que componen el agregado, presenta un color claro (Figura 33. a), los granos tienen una forma subhedral a anhedral, hábito hexagonal en algunos granos, colores intensos bajo nicoles cruzados (Figura 33. b), el relieve es bajo y su textura es lisa.

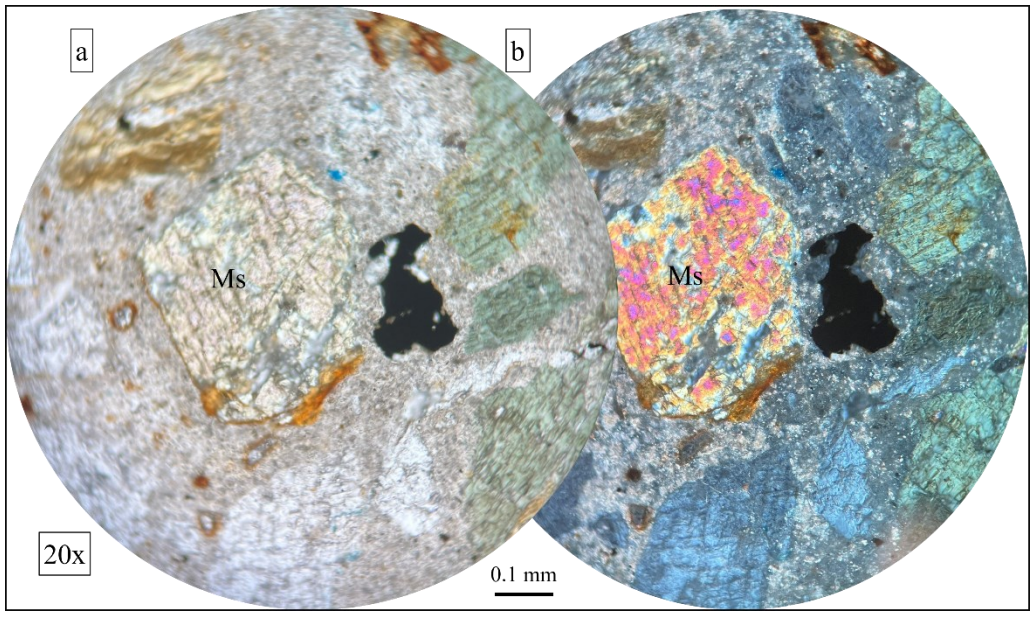


Figura 33. Cristales de muscovita (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados.

Cuarzo, Qz SiO_2: granos identificados principalmente con forma anhedral y algunos con forma subedral sus contornos son irregulares. Son granos incoloros con nicoles paralelos (Figura 34. a) y presentan una característica extinción ondulante con nicoles cruzados (Figura 34. b) su relieve es bajo a medio.

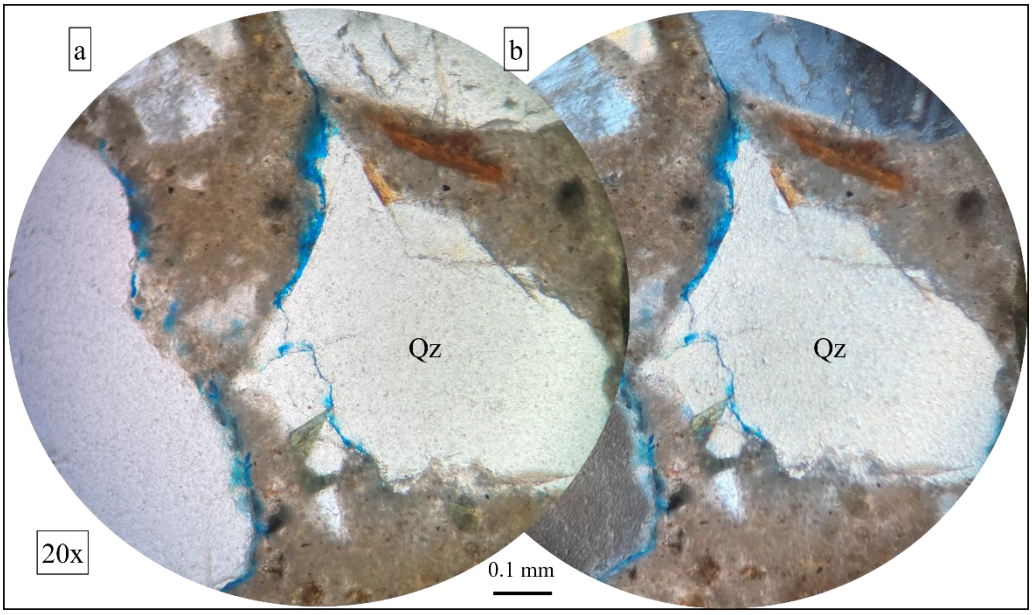


Figura 34. Cristales de cuarzo (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados.

Plagiclasa, Pl ($NaAlSi_3-CaAl_2Si_2O_8$): es una fase mineral bastante común en el agregado, la forma de los cristales subedral a anhedrales, es fácil observar cristales con habito tabular, se reconocen algunas maclas. Son cristales incolores con nicoles paralelos (Figura 35. a) y con nicoles cruzados es característico la variación lineal con colores gris y blanco. El relieve es bajo.

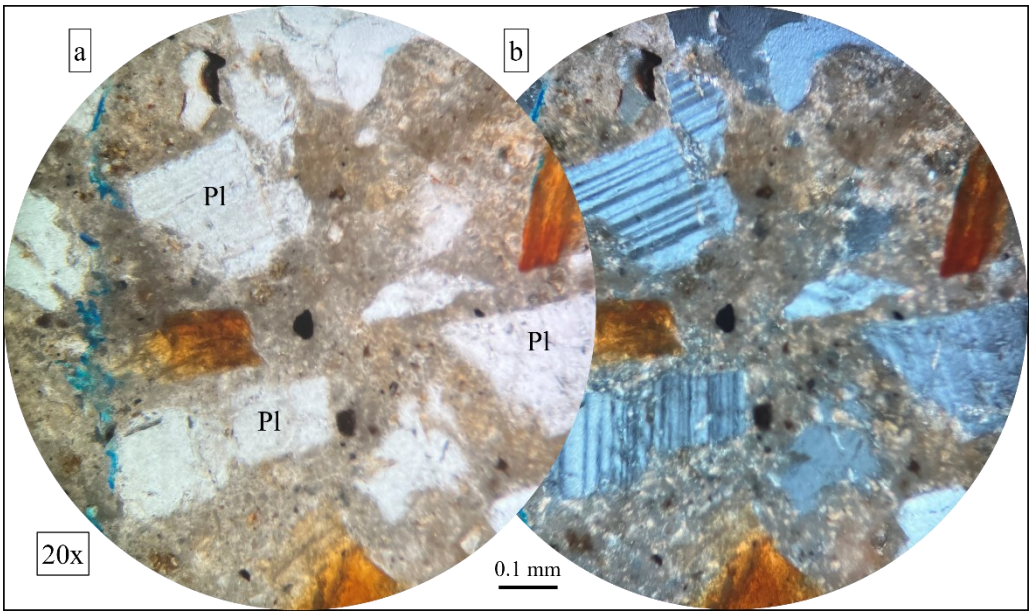


Figura 35. Cristales de plagioclasa (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados.

Anfibol, Anf $(Mg,Fe)_7Si_8O_{23}(OH)_2$: la mayoría de los anfiboles se pueden nombrar con hornblenda, su color es verde, entre verde amarillento a verde marrón (Figura 36. a), presenta pleocroísmo, la forma de los cristales es anhedral, comúnmente presenta formas tabulares, con nicoles cruzados presenta colores de primero y segundo orden (Figura 36. b), el relieve de los granos es medio; son comunes las maclas. En algunos granos se puede observar que se están alterando a clorita.

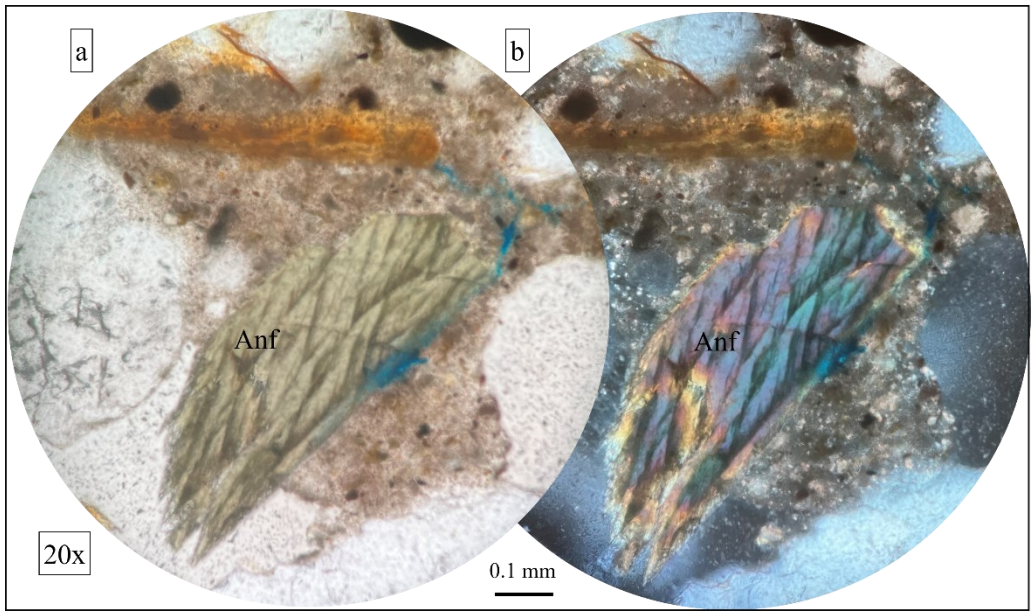


Figura 36. Cristales de anfíbol (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados

Fragmento de roca, Frag-Roca: es común encontrar entre los agregados algunos fragmentos de roca o granos donde se observan dos o más fases minerales, entre lo más común encontrado son fragmentos con micas y anfibol (Figura 37. a), b).

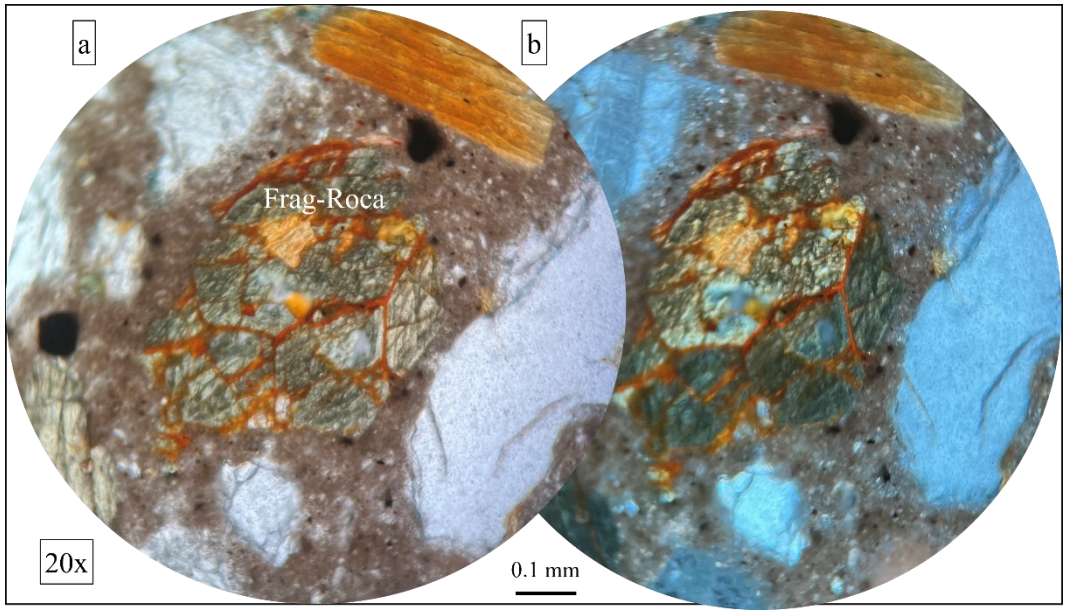


Figura 37. Grano con diferentes fases minerales – Fragmento de Roca (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados.

Amorfo, Amorf: en todas las muestras, incluyendo la muestra MO que no contiene adición de escoria, se pudo identificar algunos granos de un material amorfo, suelen tener formas subredondeadas, con contornos suaves a lisos (Figura 38. a, b). su distribución es aleatoria por toda la muestra y presenta condiciones apropiadas de adherencia con el cemento.

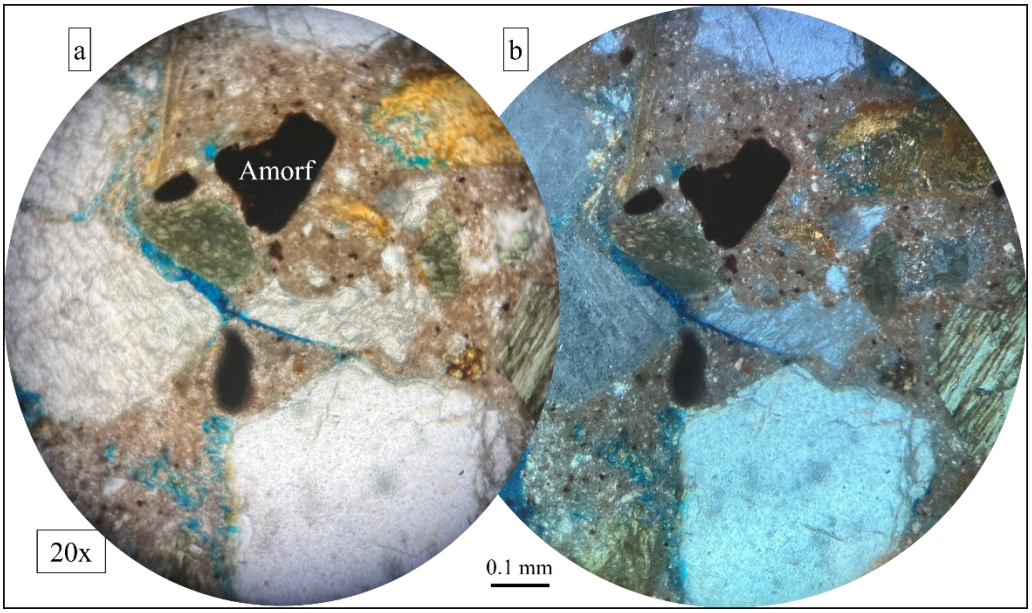


Figura 38. Granos de material amorfo (a) nicoles paralelos, (b) nicoles cruzados.

Descripción de secciones delgadas: las mezclas de mortero con porcentajes de sustitución del 0, 10, 20 y 30 % fueron analizadas en el microscopio petrográfico mediante las secciones delgadas M0, M10, M20 y M30, cada una de las láminas se inspeccionó detenidamente en toda el área. En la descripción de las secciones delgadas analizadas se definieron las siguientes convenciones, rectángulo: fisuras, triángulo: partícula de arena, estrella: burbuja de aire, esfera: pasta cementante (Cemento + escoria de acero) ver Figura 39,

Sección M0: no se observa segregación de los granos arena en los campos analizados en la sección M0. La distribución de los granos es homogénea en el área estudiada de la sección. La pasta cementante presenta color marrón homogéneo en toda la sección; no es común encontrar separación o ruptura en la zona intersticial pasta-agregado. La sección M0 muestra en general una adherencia completa y continua de los granos de arena y la pasta. El acercamiento del grano de biotita para aumentos de 10x y 50x muestran la continuidad entre la pasta y el agregado (Figura 39.), no se observan reacciones o cambios de índole química.

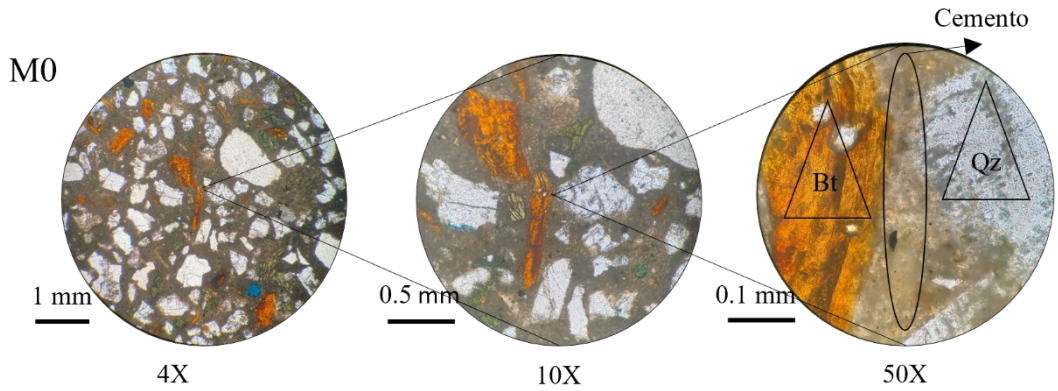


Figura 39. Sección delgada M0 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 50x.

Sección M10: se observa presencia de fracturas prolongadas a lo largo y ancho de la sección M10. La distribución de vacíos aumenta con relación a la sección del cubo sin sustitución de cemento por escoria, M0. Los minerales micáceos, principalmente la biotita, muestran tendencia a inducir fisuración paralela al plano de foliación de la partícula, algunos de los granos fallan en dirección paralela a su plano de foliación. Los aumentos 10x y 50x muestran la susceptibilidad de minerales micáceos de biotita a desprenderse y prolongar fisuras (Figura 40.).

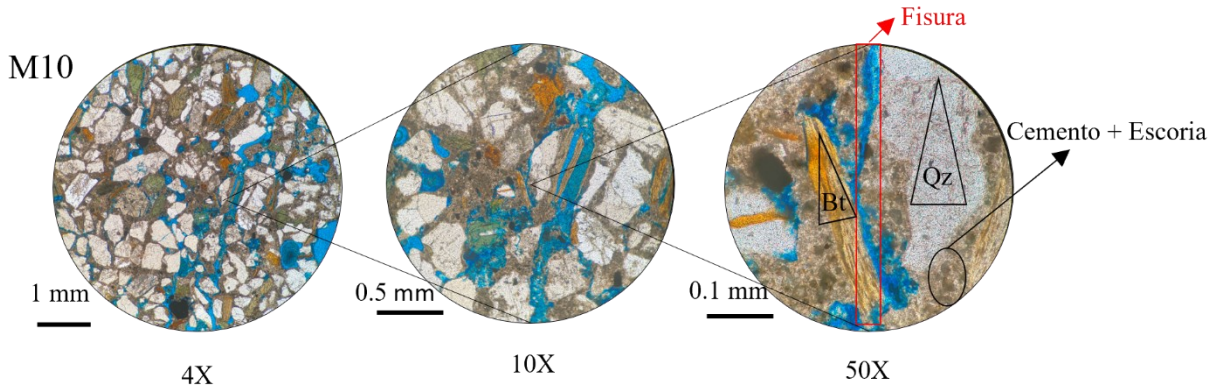


Figura 40. Sección delgada M10 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 50x.

Sección M20: es más común y se observan con mayor frecuencia fisuras en la pasta (cemento+escoria) en los campos analizados en M20. Los agregados a menudo presentan separaciones o vacíos en la zona intersticial. Se aprecia un cambio en el color de la pasta, de marrón a marrón oscuro, aunque en algunas zonas es difícil notar la diferencia con respecto a la sección M0. Se identifican más cantidad de granos amorfos respecto a las secciones anteriores M10 y M0. Ver Figura 41.

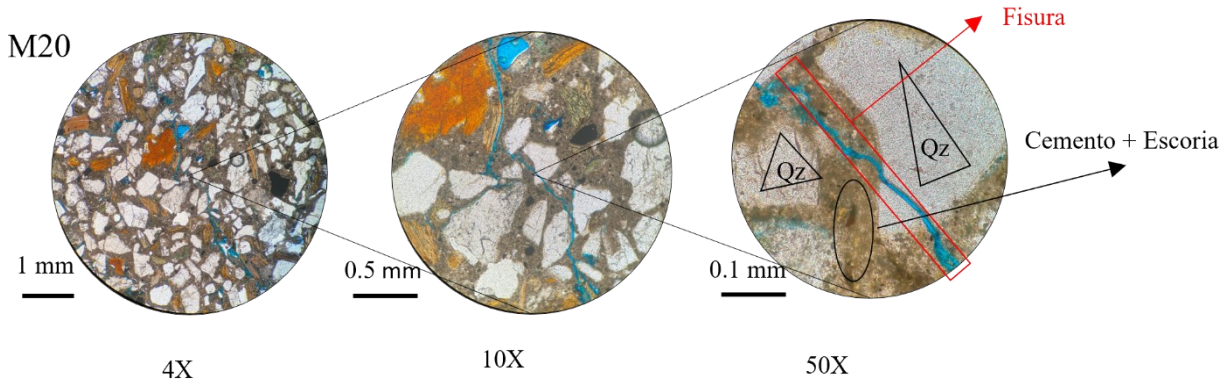


Figura 41. Sección delgada M20 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 50x.

Sección M30: parece aumentar la cantidad de granos amorfos en los campos analizados. Se aprecia incremento de fisuras y espacios vacíos. Hay poca o ninguna adherencia entre la pasta y los granos. En muchos de los campos analizados se encuentran granos totalmente sueltos de la matriz (cemento+escoria). El color de la pasta es más oscuro comparado con la mezcla control M0. El relieve de la sección es muy alto, parece que los granos de la arena se fueran a soltar, esta característica esta relacionada con la facilidad de desprenderse o fragmentarse que se identificó en el estereomicroscopio. Ver Figura 42**.**

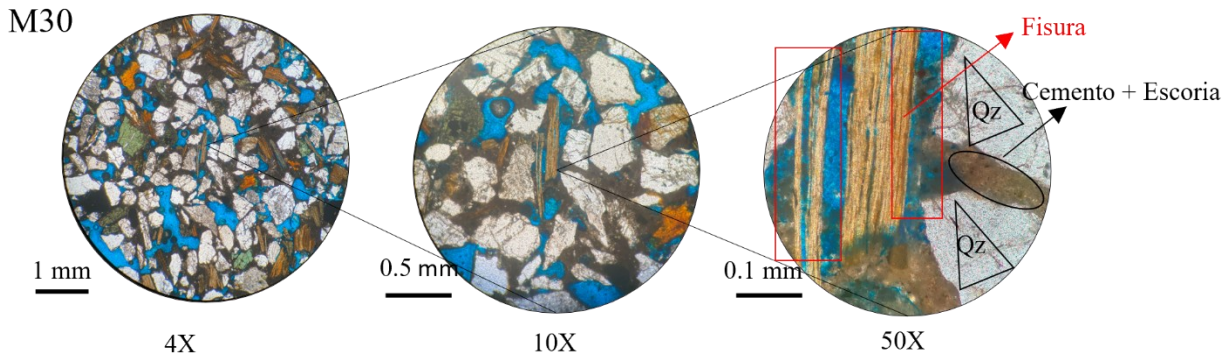


Figura 42. Sección delgada M30 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 50x.

Presencia de agregado micáceos: fue común encontrar en altas proporciones volumétricas minerales micáceos en cada una de las secciones analizadas, la presencia de granos micáceos en la arena por la naturaleza química y física de estas, pueden traer consigno problemas asociados a la alta absorción de agua y su alta reactividad química (Lema Zambrano, 2021). Por otro lado, en algunos campos se observó predisposición en la acomodación de micas en su dirección de foliación. En la Figura 43., en el circulo marcado en rojo se observa la dirección de preferencia de las micas; los granos de mica tienen a seguir su dirección de

foliación, adicionalmente se ve la facilidad de propagar las fisuras en las proximidades de los granos, un ejemplo de ello se ve en el acercamiento de la Figura 43., la fisura adyacente a la mica se va prolongando paralelo a su disposición.

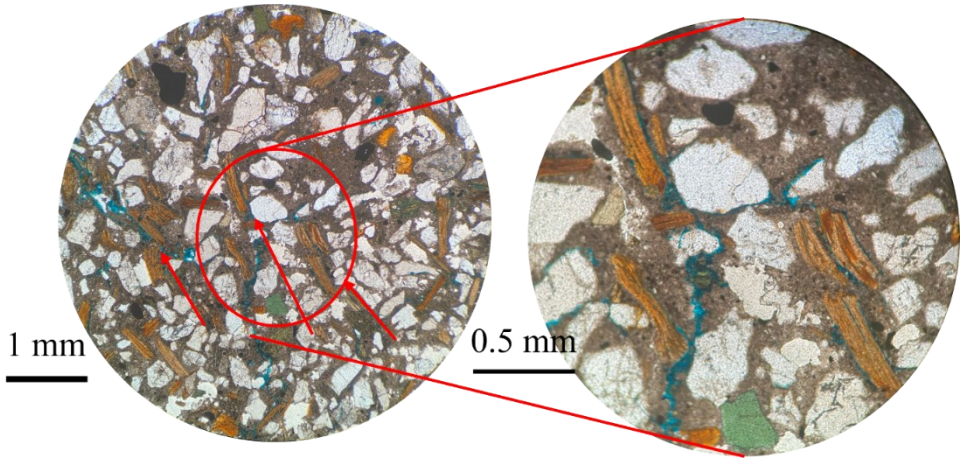


Figura 43. Inducción de fisuración paralelo a los planos de foliación de micas.

La foliación de la biotita en algunos casos permitió el ingreso de la pasta al interior de las láminas. Esa condición, eventualmente podría inducir fisuras ante cargas mínimas de cualquier índole en el mortero. En la Figura 44. se observa marcado en círculo negro el endurecimiento de la pasta al interior de los granos de biotita, se ven algunas hojas parcialmente levantadas por la pasta. Adicionalmente, en la Figura 44., a la derecha se observan varias biotitas dobladas en la dirección de foliación de la mayoría de las biotitas.

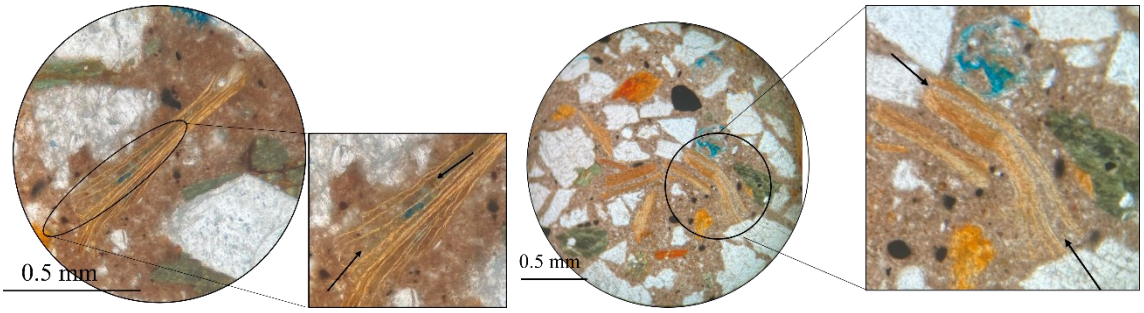


Figura 44. Endurecimiento de pasta al interior de granos de biotita.

Distribución y composición de las mezclas: en el programa Image J se hizo un conteo de puntos en cada una de las secciones (M0, M10, M20 y M30), con ello, se determinó que la arena tiene una composición con representación porcentual de cada una de las fases de: Bt (%) = 11,26, Ms (%) = 2,67, Qz (%) = 43,35, Pl (%) = 3,85, Afn (%) = 4,40, Amorfo = 0,26, Fragmento roca (%) = 31,45, Otros (%) = 2,76. Finalizado el conteo de puntos, se obtuvo que la distribución arena:pasta:vacíos cambia de acuerdo a los porcentajes mostrados en la Tabla 12. El porcentaje de arena en cada cubo varía en menos del 6 % para M0, M10 y M30. Solo

M20 presentó porcentaje diferente, con variación del 9 %. El porcentaje de pasta disminuyó con el aumento de las escorias de manera casi lineal a excepción de M20, donde solo cayó el 3 % con respecto a M0. El porcentaje de vacíos respecto a la mezcla control aumentó. Los vacíos encontrados fueron en su mayoría producidos por las fisuras en la pasta y en la zona intersticial. El porcentaje de amorfo se mantuvo casi constante con porcentajes para cada una de las secciones de M0= 0,26, M10= 1,15, M20= 1,27, M30= 1,79.

Tabla 12. Relación arena:pasta:vacios en secciones de morteros

Sección	Arena (%)	Pasta (Cemento + Escoria) (%)	Vacíos (%)
M0	51,55	48,34	0,11
M10	54,70	38,22	7,07
M20	48,37	45,35	6,27
M30	57,32	26,09	16,59

Pasta cementante: con relación a la pasta hubo cambios en el color, en la medida en que aumentó el porcentaje de sustitución apareció una coloración más oscura en la pasta (Cemento+Escoria), el cambio en la tonalidad de la pasta no se dio de forma homogénea, ya que, algunas zonas mostraron áreas más oscuras que otras. En la Figura 45**.** se aprecia la diferencia entre las pastas de los cubos M0 y M30. M0 presenta un color marrón claro, característico de un buen proceso e hidratación del cemento ((Poole & Sims, 2016), mientras que M30 muestra un color más oscuro y mayor presencia de granos amorfos. La finura de la partícula de escoria de acero no permite encontrar diferencias con relación a las partículas de cemento; la partícula de escoria no es identificable bajo nicoles paralelos y/o cruzados para aumentos de 50x. En términos generalas la pasta no luce ningún tipo de reacción o efecto adverso, solo presentó cambio en la apariencia, específicamente en su color, lo cual podría estar asociado también al tiempo de retraso en el fraguado y la coloración característica de la escoria.

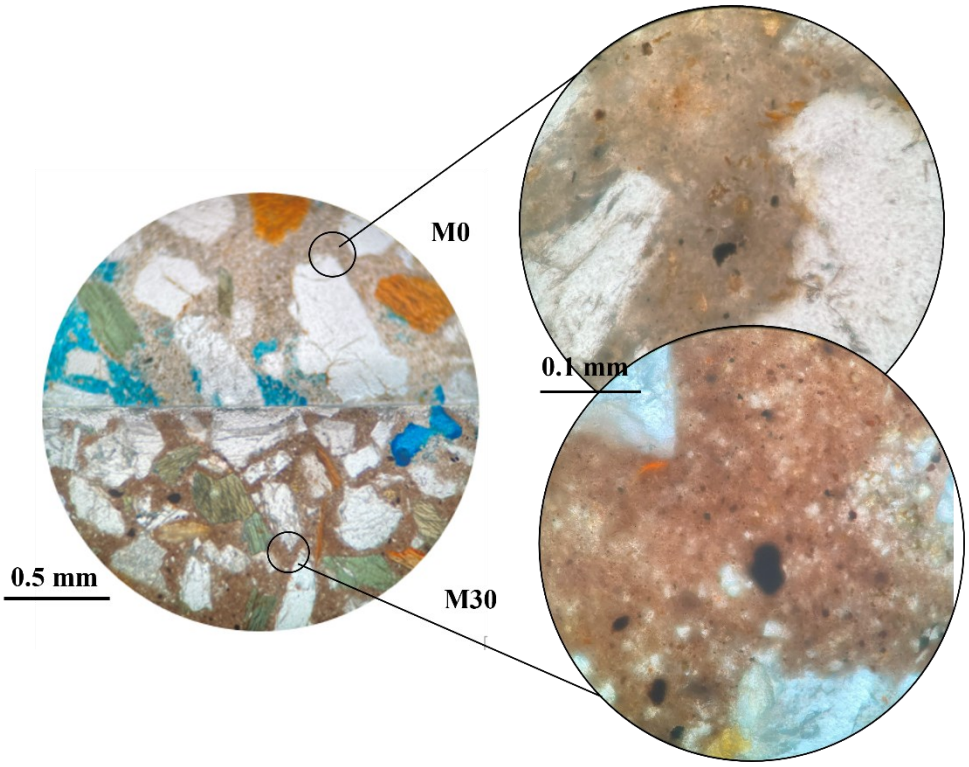
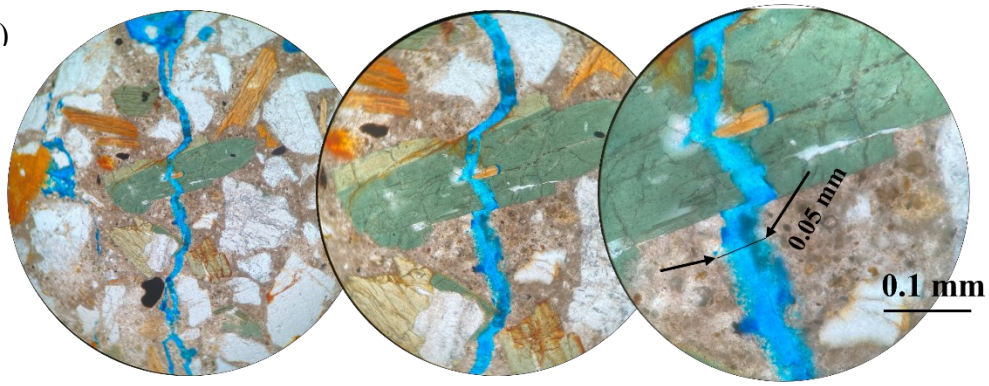


Figura 45. Contraste entre pastas (cemento+escoria) M0 y M30.

Fisuras: es común encontrar fisuras en la pasta y en algunas ocasiones en los granos de arena; las fisuras se vinculan con las fallas después de la prueba de resistencia a la compresión, ya que, en la sección M20 se observaron las mayores longitudes de abertura, y en M20 fue donde se presentó mayor ruptura del cubo. En el análisis de las secciones se pudo evidenciar que la mayor cantidad de fisuras se dan en la pasta. En las Figura 46. a) y b) se pueden observar algunas de las fisuras presentadas. Los mayores espesores encontrados de fisura en las secciones analizadas se presentan en las Figura 46. a) y b) con un ancho de 0.05 y 0.06 mm, las demás fisuras presentaron anchos menores. También se puede ver que las fisuras en el agregado se desarrollan las discontinuidades del grano como es el caso b) o por presencia de otra fase en el interior del grano, caso a)

a)



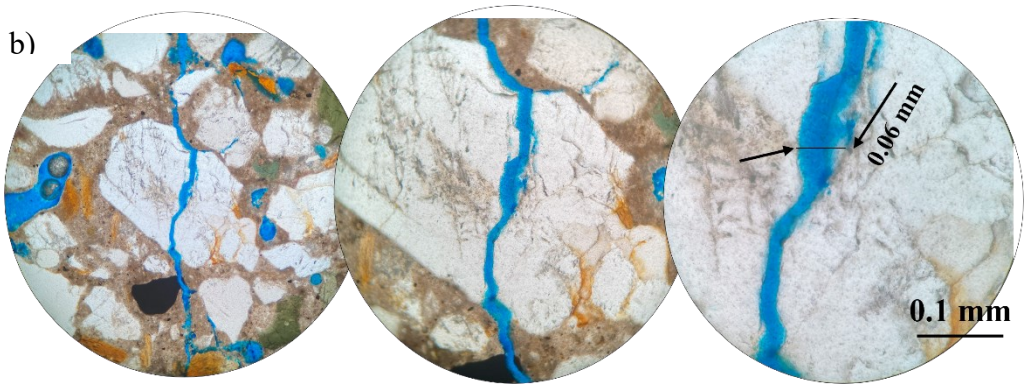


Figura 46. Tipos de fisuras en pasta y granos de la arena. Secciones delgadas de cubos.

Análisis químico, DRX: en la Figura 47**.** se muestra el difractograma obtenido para mortero M0, se identifican picos correspondientes a las fases del cemento como P:Portlandita, T:Torbemorita (C-S-H), (Alejandro Giraldo & Iván Tobón, 2006) (Angélica Lozano-Lunar et al., 2019). Adicionalmente, se presentaron picos de alta intensidad de Q: Cuarzo, lo que es acorde con la cuantificación encontrada en la distribución de las fases mineralógicas de la arena. En el difractograma se logra identificar un pico de ettringita. El pico de ettringinta resulta difícil de reconocer, debido a la baja intensidad de su pico característico es generalmente oculto por otros picos con mayor intensidad (Alejandro Giraldo & Iván Tobón, 2006).

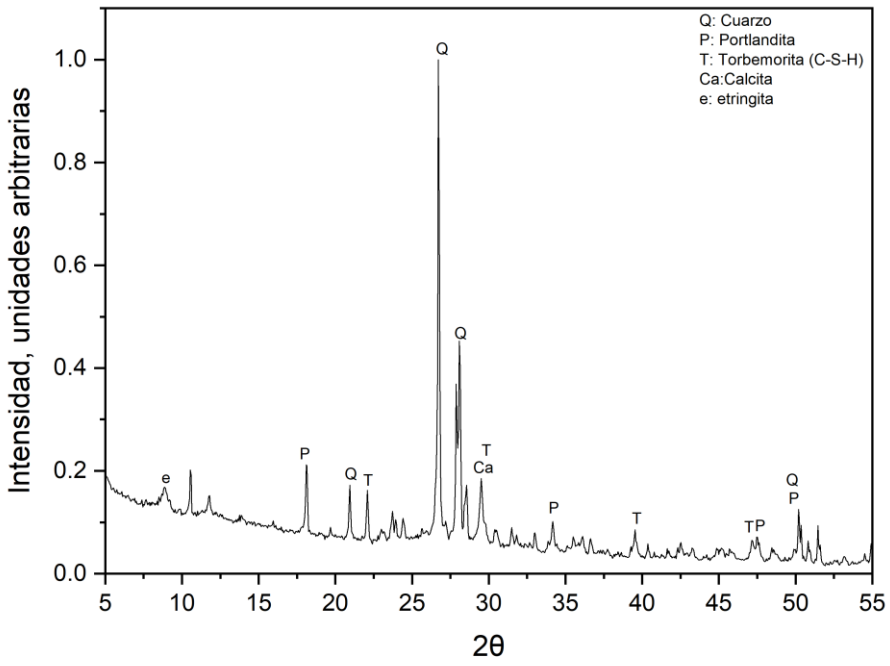


Figura 47. Difractograma. Cubo de mortero M0.

En el difractograma del cubo M30 Figura 48**.** , adicional a los picos característicos del cemento, se reconocieron otras fases como la MgFe: Magnesio ferrita, X: Mn_3O_4, Z:Zincita y F:Franklinita (Ledesma et al., 2017), (Colorado et al., 2016), la formación de estas fases minerales puede estar asociadas con la alteración del normal desarrollo de las fases del cemento. El DRX concuerda con lo hasta ahora encontrado en los resultados, puesto que, con el aumento de sustitución de cemento, la resistencia cayó y aparecieron nuevas fases relacionadas con la composición química de la escoria principalmente con elementos de Zn, Fe, Mg y Mn, además, los cambios en el color de la pasta podrían explicarse con los picos de las fases encontradas en el DRX.

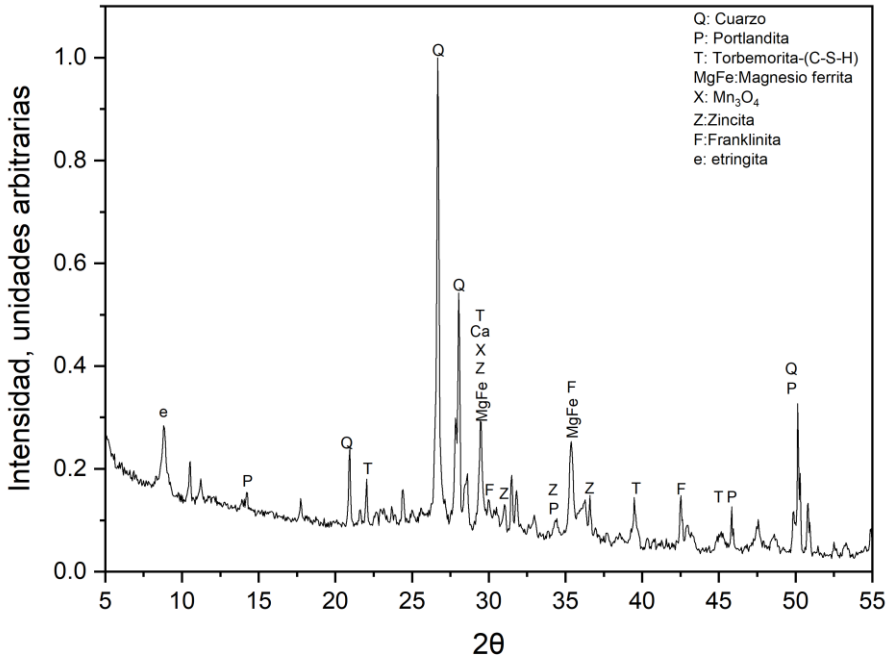


Figura 48. Difractograma. Cubo de mortero M30.

5.3.3. Microscopía electrónica en mezclas de morteros

El análisis de fragmentos y fracturas de cubos de mortero en el microscopio electrónico de barrido permitió conocer la morfología superficial de las mezclas M0, M5, M10, M15, M20 y M30. En la Figura 49**.** se observan las micrografías obtenidas para el cubo de mortero M0. En la Figura 49**.** a) 70x y b) 1000x se aprecia una morfología compacta y la adherencia completa entre la pasta de cemento con el grano de biotita, respectivamente. En la imagen c) se identifican cada una de las fases del cemento C-S-H, característico por ser una la fase amorfa, la portlandita que tienen forma de hojuelas hexagonales y ettringita, con su forma característica de agujas (Fares et al., 2016). En c) se ve que el cemento alcanza a desarrollar sus fases mineralógicas con normalidad.

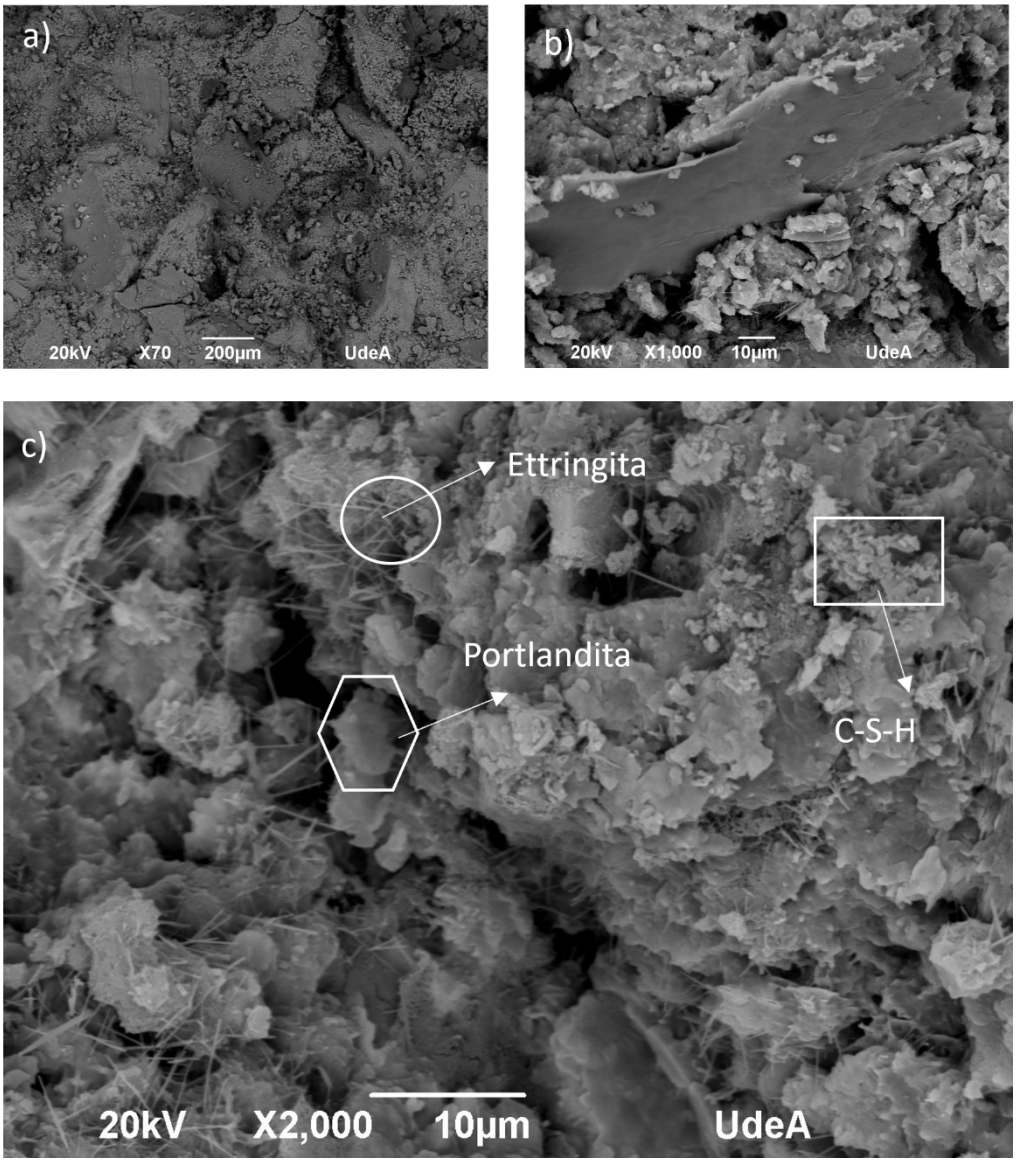


Figura 49. Electrones retrodispesaro en cubo M0 a) 70x b) Grano de Bt 1000x c) Fases minerales del cemento 2000x.

En el Figura 50, se comparan las morfologías de los cubos M0, M5, M10, M15, M20 y M30 para aumento 2000x. Mientras se aumentó el porcentaje de sustitución de cemento, se evidenció una superficie con mayor microporosidad y fases cristalinas más distanciadas. En las micrografías M0, M5 y M10 se observa que la pasta es densa, compacta y continua, además, los agregados lucen revestidos completamente por la pasta. En las micrografías M15, M20 y M30 se nota que la adherencia es débil en la zona intersticial, cómo se observó en la microscopía óptica hay ausencia de pasta (cemento + escoria de acero) en la interacción grano-pasta, lo que comprueba lo antes observado y complementa el análisis de las secciones delegadas en el microscopio petrográfico.

Por otro lado, para M0, M5 y M10 es claro el desarrollo de las fases (Alejandro Giraldo & Iván Tobón, 2006), mientras que para M15, M20 y M30 se ve que el aumento de la sustitución produce ausencia de las fases, se ve menos abundancia de C-S-H, hay vacíos en la zona intersticial. La ettringinta es completamente ausente a partir de M20 (Fares et al., 2016).

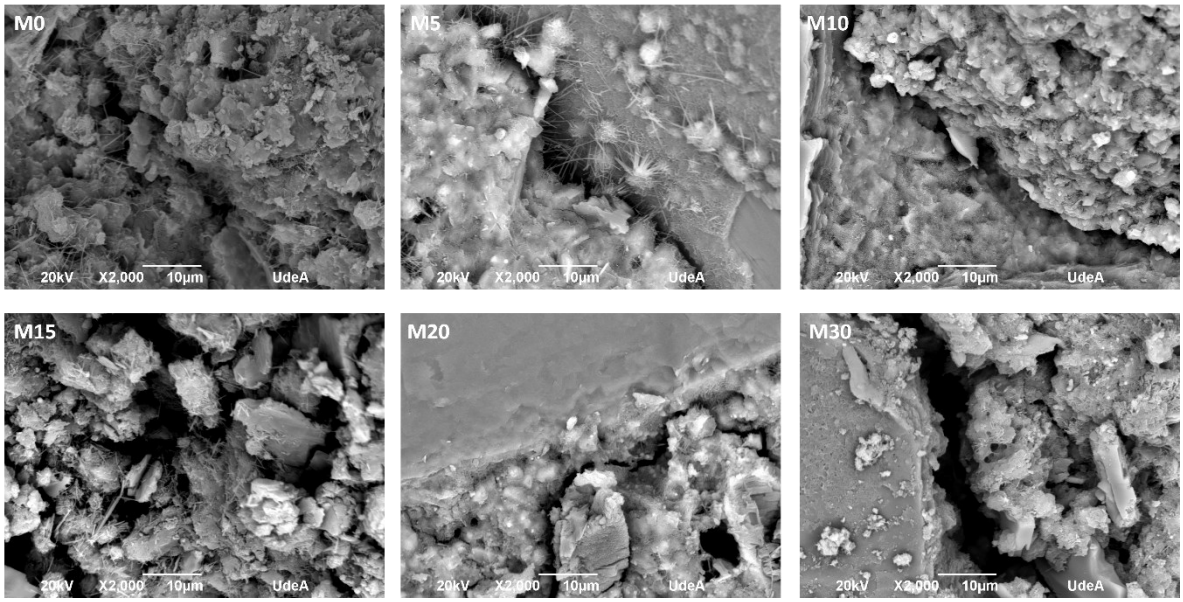
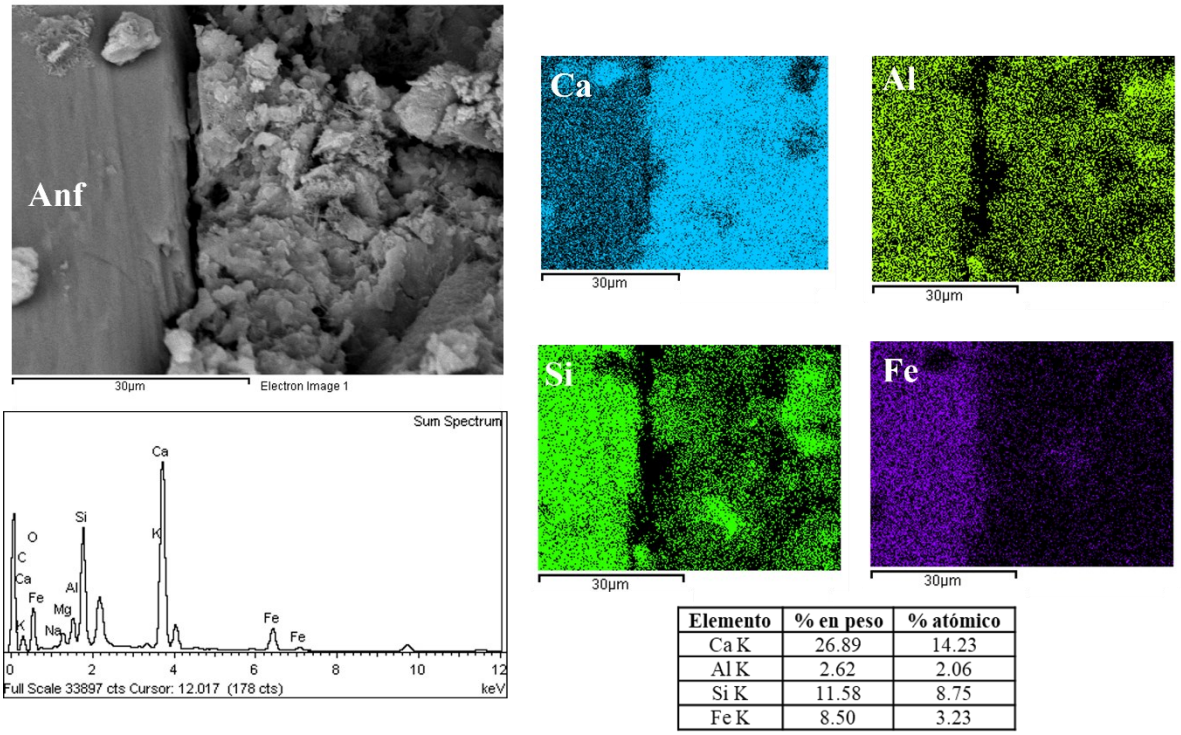


Figura 50. Electrones retrodispersados. Cubos de mortero M0, M5, M10, M15, M20 y M30.

5.3.3.1 Mapeo composicional SEM/EDX de cubos de mortero:

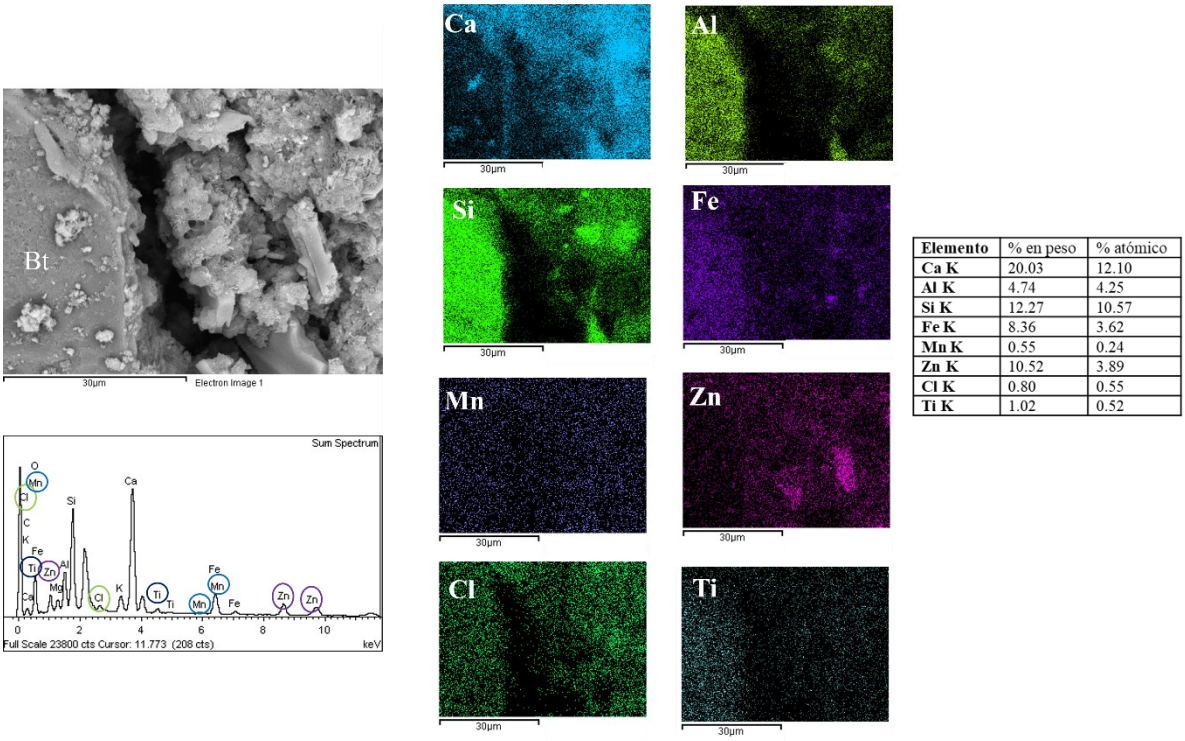
A continuación, se presenta el resultado del mapeo composicional entre los cubos M0 y M30. La composición básica del cemento se pudo encontrar con el análisis composicional en el SEM; los compuestos de Ca, Al, Si y Fe son reflejados en espectro y muestran una presencia homogénea y distribuida en toda el área de influencia del cemento (Figura 51.).



Elemento	% en peso	% atómico
Ca K	26.89	14.23
Al K	2.62	2.06
Si K	11.58	8.75
Fe K	8.50	3.23

Figura 51. Mapeo composicional EDX. Cubo M0.

En el mapeo composicional del cubo M30, Figura 52., se notan cambios relevantes en los elementos detectados por los rayos X. Las distribuciones del Ca y Al disminuyen en las proximidades del área del grano de arena. Aparecen elementos nuevos como Mn, Cl y Ti que concuerdan con la composición elemental de la escoria de acero que se identificó en la caracterización de la escoria al inicio. La dispersión de Zinc presenta un área con aglomeración en dos puntos, lo que puede estar asociado a los aglomerados observados duran la inspección en el estereomicroscopio, esto a su vez podría afectar y explicar la pérdida de la resistencia en los cubos M30, ya que, en aquellos cúmulos se podría generar puntos débiles en la pasta y ausencia de formación de fases en la pasta, y de ese modo se producirían fallas o fracturas. Por otro lado, esos cambios composicionales están asociados a las fases magenesio ferrita, zincita y franklinita identificadas en el difractómetro de M30.



Elemento	% en peso	% atómico
Ca K	20.03	12.10
Al K	4.74	4.25
Si K	12.27	10.57
Fe K	8.36	3.62
Mn K	0.55	0.24
Zn K	10.52	3.89
Cl K	0.80	0.55
Ti K	1.02	0.52

Figura 52. Mapeo composicional EDX. Cubo M30.

4.3.2. Análisis petrográfico de barras de mortero.

Las barras de mortero BM0, BM10 y BM20 fueron extraídas de la inmersión de sulfatos después de dos meses de exposición. A nivel macro las barras BM0 y BM10 después de los dos meses de ataque no mostraron desgate significativo en su forma y textura superficial, en cambio BM20, aunque tampoco presentó desgaste o deterioro, si exhibió un precipitado de color blanco en la superficie que se muestra señalado en el círculo rojo en la Figura 53. Ninguna de las barras mostro diferencias en su dimensión longitudinal. Con base en la norma ASTM C672, la condición superficial de las barras de mortero se encuentra en una condición cero, es decir, no hay ningún desprendimiento de material de la superficie, por lo tanto, no hay deterioro superficial que este asociado a la exposición de sulfatos.

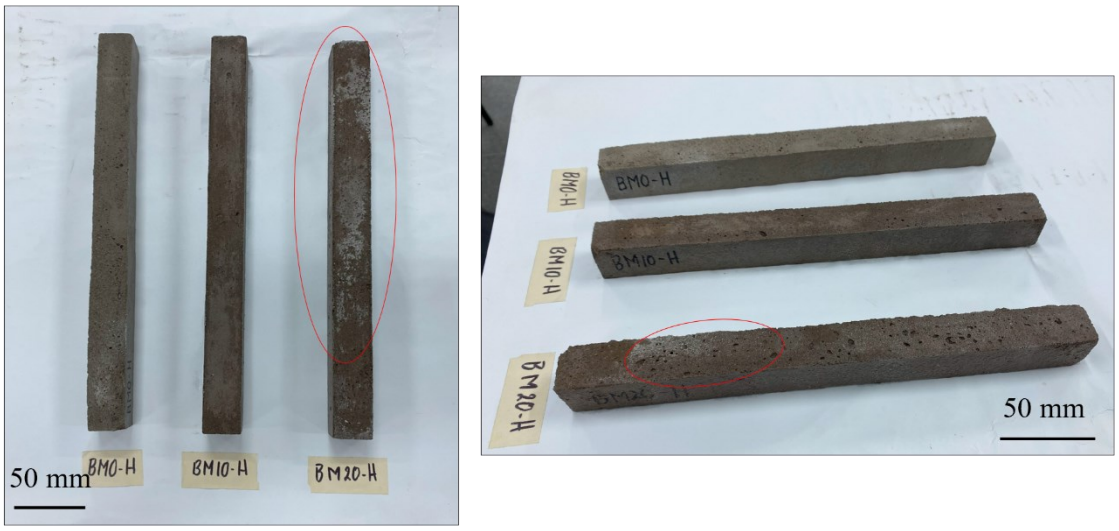


Figura 53. Barras de morteros BM0, BM10 y BM20 después de dos meses de inmersión en solución de sulfato de sodio.

Cuatro secciones delgadas fueron extraídas de las barras BM0, BM10 y BM20. Con las láminas se evaluaron los efectos a nivel microscópico de las posibles reacciones físicas y químicas en la pasta y agregado. Del análisis de las secciones se obtuvo lo siguiente:

Sección BM0: los granos de arena en la sección BM0 muestran buena adherencia y no se identifica ninguna reacción adversa en la pasta. La zona intersticial correspondiente a la pasta (Cemento+Escoria) es densa e interactúa de forma continua con las fases minerales en la arena. El color de la pasta en BM0 es similar al color de la muestra M0 que no fue expuesta frente a solución con sulfatos. BM0 muestra en las discontinuidades de los agregados espacio vacío que parece estar asociado a algún cambio de carácter químico, ya que, solo el área interna del agregado presenta la formación de vacíos interconectados que no se propagaban en el área de la pasta, ver Figura 54.

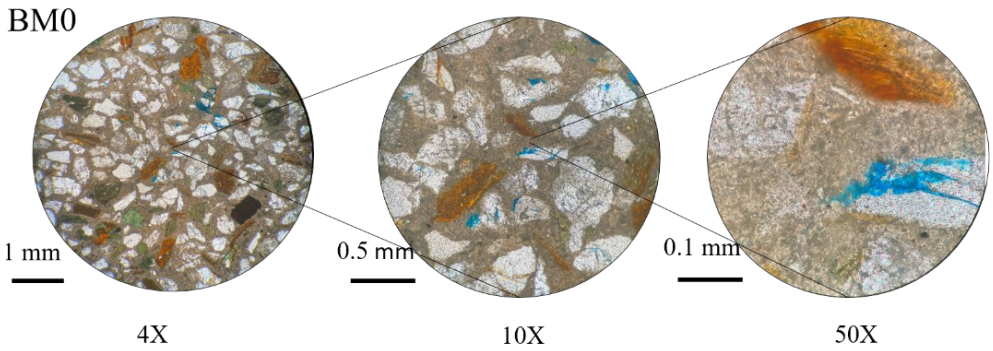


Figura 54. Sección delgada BM0 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 20x.

Sección BM10: para el caso de BM10 se ve como crece la cantidad de microfisuras al interior de los granos de arena con relación a BM0 (Figura 55.). BM10 tampoco muestra ningún tipo de reacción adversa en el área de la pasta. En el rectángulo rojo (Figura 55.) se ve la mayor concentración o crecimiento de microfisuras interconectadas entre los granos con respecto a la sección BM0 en donde esta característica no fue tan abundante.

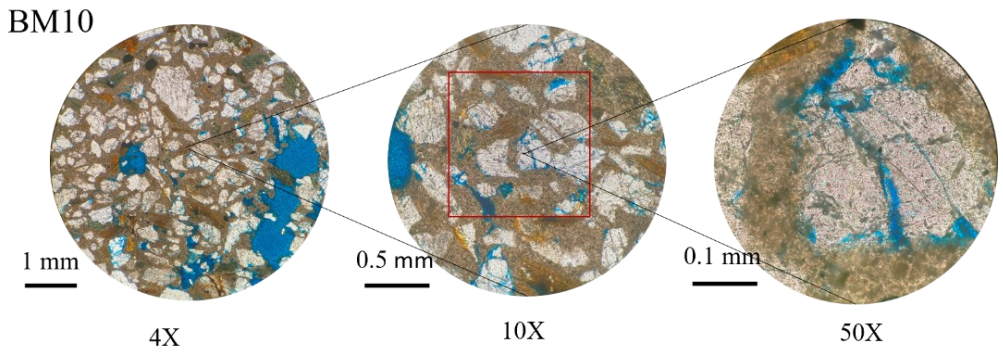


Figura 55. Sección delgada BM10 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 20x.

BM20: en la Figura 56. se observa el incremento de las discontinuidades en los granos de arena principalmente en cuarzo y plagioclasas, pareciera que sulfato de sodio reacciona en estas microfisuras y genera algún tipo de fase que después del proceso de pulido forma las microfisuras acopladas. En la Figura 56. en el recuadro rojo se señala la concentración o crecimiento de fracturas en el agregado que se dio en las muestras atacadas cuando se aumentó la sustitución de escoria por cemento.

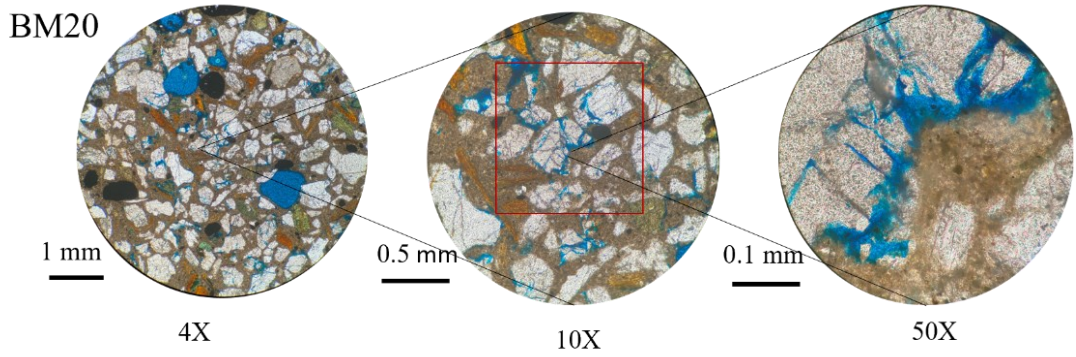


Figura 56. Sección delgada BM20 bajo microscopio petrográfico, aumentos 4x, 10x y 20x.

En términos generales, la exposición de las barras de mortero en solución de sulfato muestra una reacción en la fase del agregado, la cual podría estar asociada con las zonas afectadas en las discontinuidades, aumentando la probabilidad de que se dé la formación del yeso y ettringita secundaria, condiciones que se dan en este tipo de ataque con sulfatos.

Pasta cementante en barras: en la pasta de las barras que sufrieron exposición con iones de sulfato se logró apreciar una diferencia, en los bordes de cada lámina, se percibió un cambio en el color de la pasta, que se aprecia con mayor facilidad bajo nícoles cruzados. Los cambios en el color de la fase cementante generalmente están asociado a reacciones químicas en la composición elemental de alguno de los compuesto (Beltran Calvo & Romero Beltran, 2022; Poole & Sims, 2016; Walker, H. N.; Lane, S. D.; Stutzman, 2006), en la Figura 57. se encuentra encerrada el área de avance o cambio desde cerca a los bordes respecto a la pasta en el centro de la lámina. Este cambio está asociado al ataque en las caras superficiales de las barras.

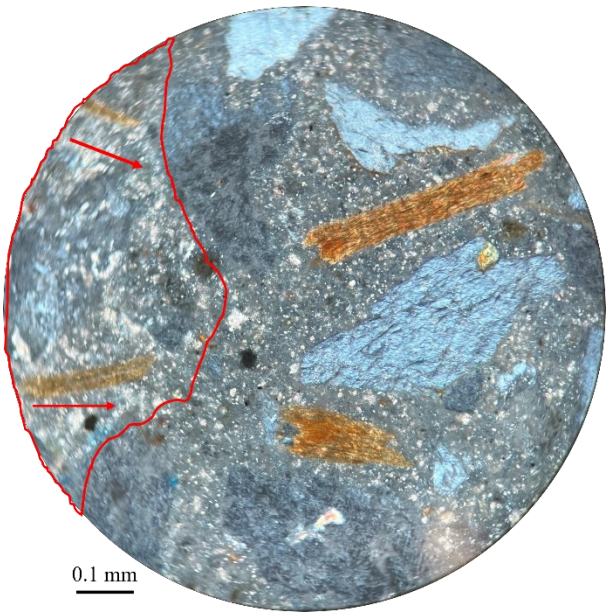


Figura 57. Cambios en la pasta de las barras expuestas a sulfato de sodio.

Fisuras en barras de mortero: a diferencia de las secciones delgadas de los cubos de mortero, en las secciones delgadas extraídas de las barras no se observan fisuras a lo largo de la pasta (Figura 58.), sin embargo, se ve en abundancia las fisuras en los granos de la arena; estas fisuras se distinguen por estar al interior y en los borde de los granos, como si en las microfisruas de los granos de arena, la solución hubiese reaccionado químicamente provocando algo parecido a un desgaste en la superficie que se conecta con las discontinuidades propias de cada fase del agregado. El ataque con iones de sulfato generó un avance de cambios químicos, la solución aprovechó las microfisuras de los granos para penetrar y provocar descomposición en zonas de debilidad de la pasta cementante.

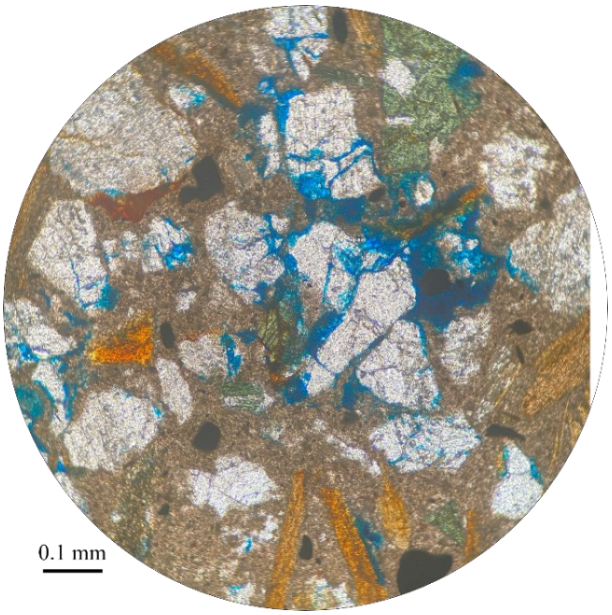


Figura 58. Formación de microfisuras en el agregado de las barras de mortero expuestas a sulfato de sodio.

Microscopia electrónica

Fragmentos de las barras atacadas BM0, BM10 y BM20 con la solución de sulfato de sodio fueron analizados en el microscopio electrónico de barrido. En la Figura 59., se observa la morfología de cada tipo de mezcla BM0, BM10 y BM20, después de 60 días de ataque. El número de microporos en la superficie de cada tipo de mezcla parece constante, aunque, para BM20 el tamaño de poro es más grande (Figura 59.). Adicionalmente no se observa ettringita en ninguna de las micrografías, lo que significa ausencia en la formación de esta fase y por tanto una reacción química asociada. Algunos cristales parecen portlandita, sin embargo, no se reconocen las hojuelas hexagonales características.

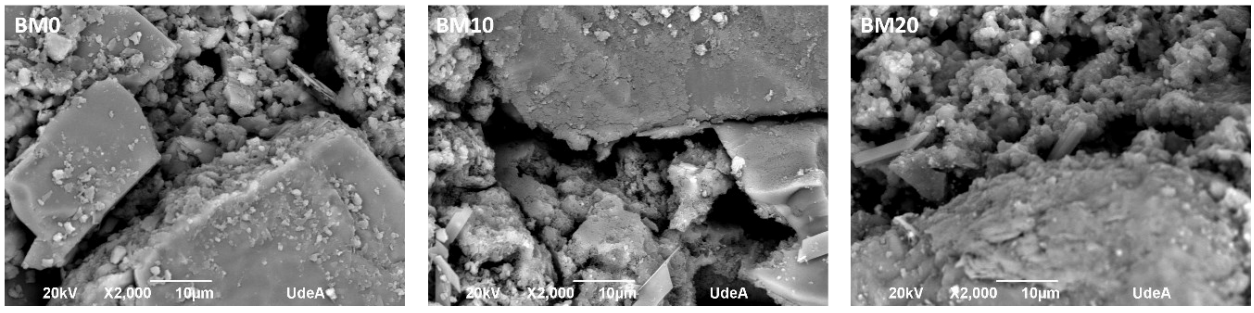
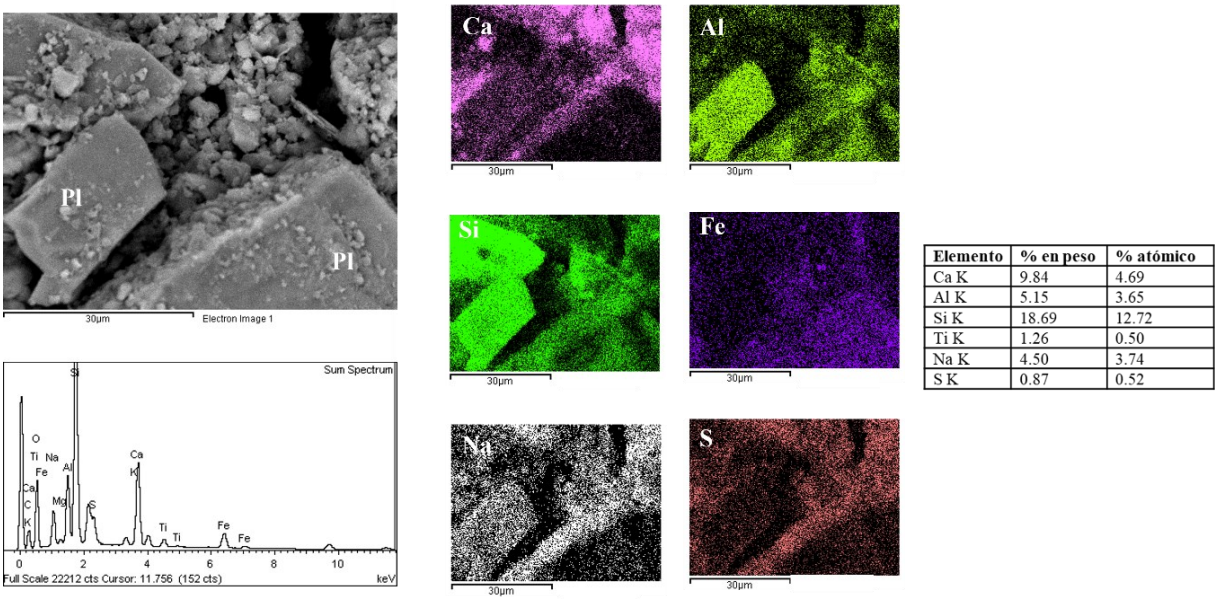


Figura 59. Micrografías SEM barras de mortero expuestas a ataque de sulfato de sódio. BM0, BM10 y BM20.

5.3.3.1 Mapeo composicional SEM/EDX de barras de mortero:

Fragmentos de las barras que estuvieron expuestos durante 60 días bajo condiciones de exposición frente ataques de sulfato de sodio, se analizaron mediante mapeo composicional SEM-EDX:

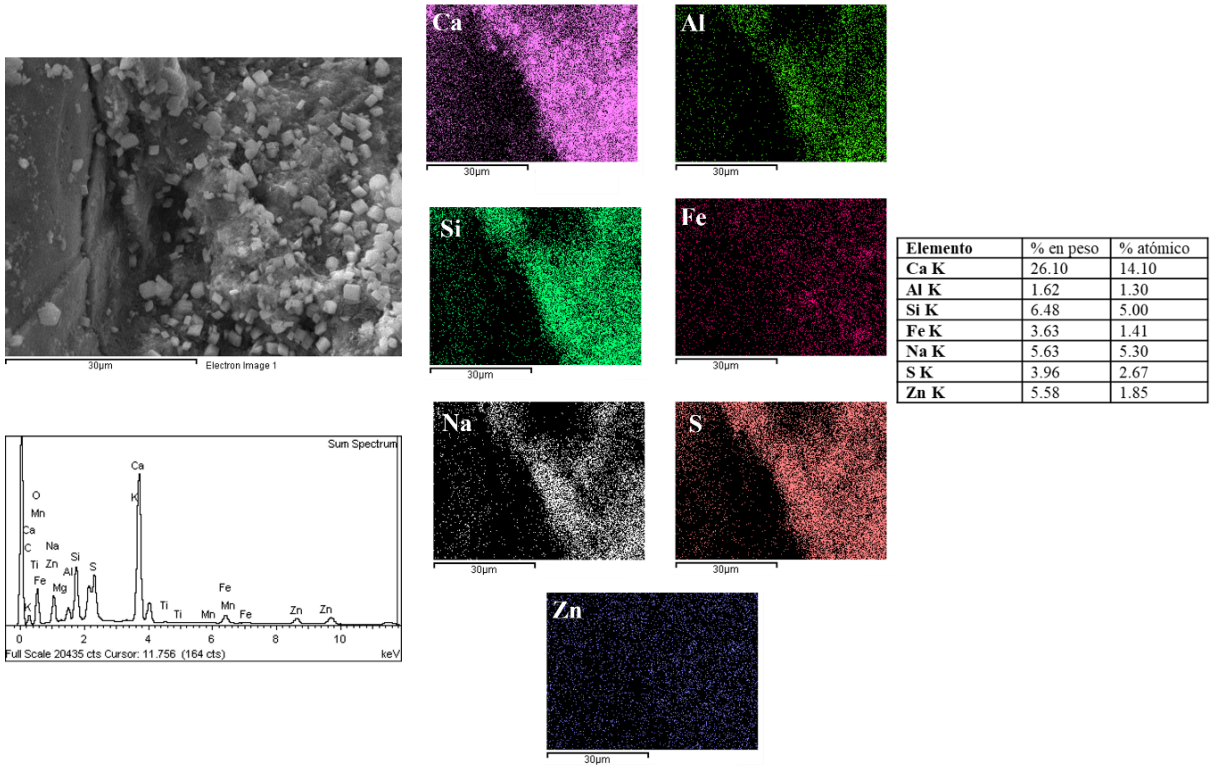
BM0: el resultado del mapeo composicional para la barra BM0 se observa en la Figura 60., allí, se evidencia la presencia de los compuestos S y Na producto de la condición de ataque de sulfato de sodio (Na_2SO_4); la exposición de la barra ante iones de sulfato indica un ataque completo en el fragmento de la barra analizado, pues la concentración de los elementos S y Na está presente y distribuida uniformemente en toda el área cementante y del agregado. Aunque la micrografía para 2000x no muestra las fases características del cemento, los componentes de Ca, Al, Si y Fe están presentes sobre el área cementante captada por el mapeo. Picos característicos de S y Na fueron mostramos por el espectro del EDX.



Elemento	% en peso	% atómico
Ca K	9.84	4.69
Al K	5.15	3.65
Si K	18.69	12.72
Ti K	1.26	0.50
Na K	4.50	3.74
S K	0.87	0.52

Figura 60. Mapeo composicional EDX. Barra BM0.

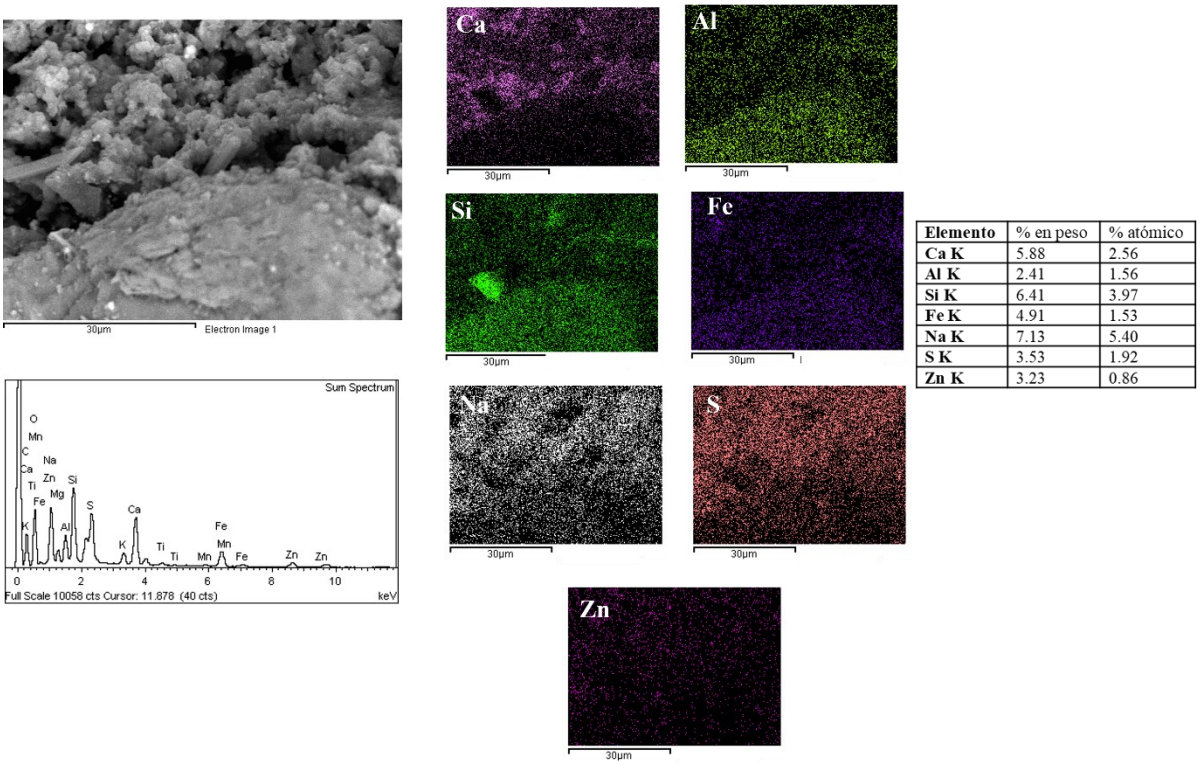
BM10: en el mapeo composicional del fragmento tomado para la barra BM10 se aprecia nuevamente la presencia de S y Na asociadas al sulfato de sodio (Na_2SO_4), a diferencia de BM0 en el espectro de BM10 aparecen picos de Zn que están asociados a la presencia de la escoria. No se observan cambios significativos en la distribución de los elementos característicos del cemento Ca, Al, Si y Fe respecto a al mapeo de BM0 (Figura 61.). Cabe mencionar que en el punto donde tomó el mapeo, la micrografía (2000x) permite identificar la presencia de cristales cúbicos que podrían estar asociados al ataque de la sal en la superficie del fragmento de la barra.



Elemento	% en peso	% atómico
Ca K	26.10	14.10
Al K	1.62	1.30
Si K	6.48	5.00
Fe K	3.63	1.41
Na K	5.63	5.30
S K	3.96	2.67
Zn K	5.58	1.85

Figura 61. Mapeo composicional EDX. Barra BM10.

BM20: el EDX composicional del fragmento de barra BM20, muestra una estructura superficial totalmente porosa y sin presencia de ninguna de las fases del cemento, la morfología superficial no está desarrollada o por lo menos no hay evidencia de fases (Figura 62.); solo se reconoce C-S-H, sin embargo, está distribuido de forma discontinua y lleno de micro vacíos. No hay diferencias significativas en los picos arrojados por el espectro respecto al BM10.



Elemento	% en peso	% atómico
Ca K	5.88	2.56
Al K	2.41	1.56
Si K	6.41	3.97
Fe K	4.91	1.53
Na K	7.13	5.40
S K	3.53	1.92
Zn K	3.23	0.86

Figura 62. Mapeo composicional EDX. Barra BM20.

Diferencias entre cubos y barras de mortero

El análisis petrográfico de las secciones delgadas de cubos y barras de mortero permitió identificar cambios significativos en la morfología y relación entre componentes de cada tipo de mezcla. Los cambios encontrados estarían asociados a la condición de curado con exposición de sulfato de sodio para el caso de las barras en contraste con los cubos que fueron curados sin ningún tipo de agente de ataque.

El sulfato de sodio en las barras de mortero provocó la formación de fisuras al interior del área de los granos de arena entrelazando las microfisuras o discontinuidades de las fases minerales, en los granos de cuarzo y plagioclasa fue más notorio este efecto (Figura 63. a)). Para el caso de los cubos de mortero que no fueron atacados con sulfato, las fisuras se presentaron a lo largo de la pasta y en algunas ocasiones atravesando fragmentos de roca (Figura 63. b)). Comparando los tipos de fisuras presentados en las barras Figura 63. a) y los cubos Figura 63. b), se concluye que la inducción de las fisuras en los cubos está asociada a la deformación ocasionada con el ensayo de resistencia a compresión, mientras que en las barras las fisuras son de carácter químico en la que el sulfato de sodio generó un tipo de erosión en las discontinuidades de los agregados. El mecanismo de ataque de los iones de sulfato de sodio ocurre ataque desde las fisuras existente en las partículas de la arena, estas se cubren o llenan con la mezcla de cemento durante la mezcla y fraguado y después empieza

a actuar y es mucho más eficiente sobre estas zonas, ya que las fases cementantes presentan menor área, son zonas de mayor debilidad y finalmente el resultado es que el ataque deja expuestas estas fisuras, adicionalmente, estas fisuras sirven como superficie o espacio para el crecimiento de yeso o ettringita tardía que generaran presión y estarían en capacidad de aumentar el tamaño de las microfisuras.

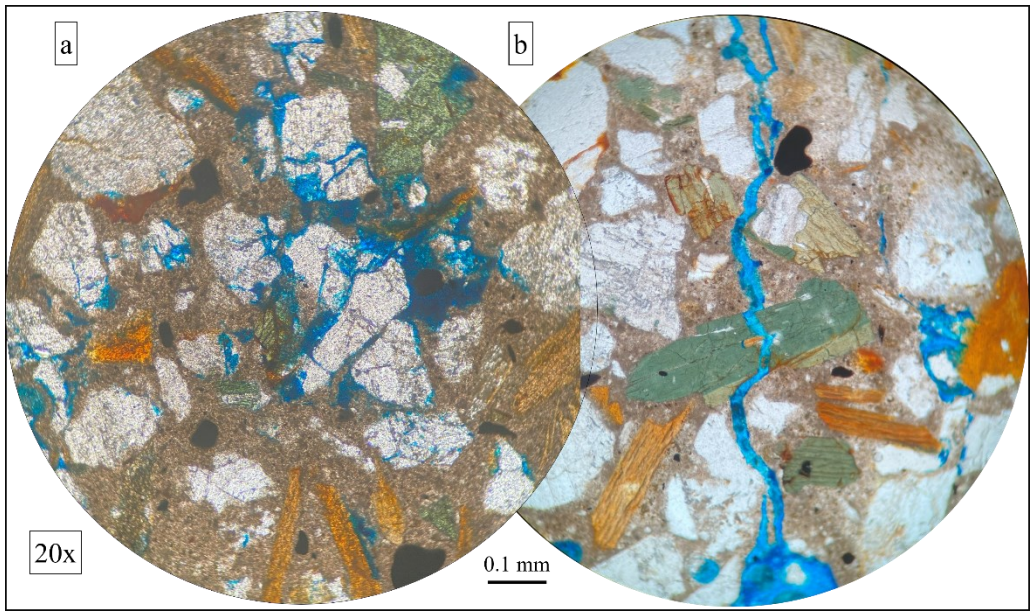


Figura 63. Comparación entre la aparición y propagación de fisuras en las barras a) atacadas con respecto a los morteros b) que no fuero atacas.

La pasta en las barras de mortero reaccionó químicamente desde los bordes hacia el interior del área de cada sección analizada. El color de la pasta en las muestras de las barras en el borde tiene mayor intensidad, destacándose entre colores amarillos a marrón claro Figura 64., a). En el interior de área de las secciones se conservó el color marrón característico observado en los cubos de mortero que no fueron atacados Figura 64., b). Los cambios en los colores podrían estar asociados con la formación de fases secundarias o la interrupción de las fases C-S-H, portlandita y ettringita (Poole & Sims, 2016; Walker, H. N.; Lane, S. D.; Stutzman, 2006).

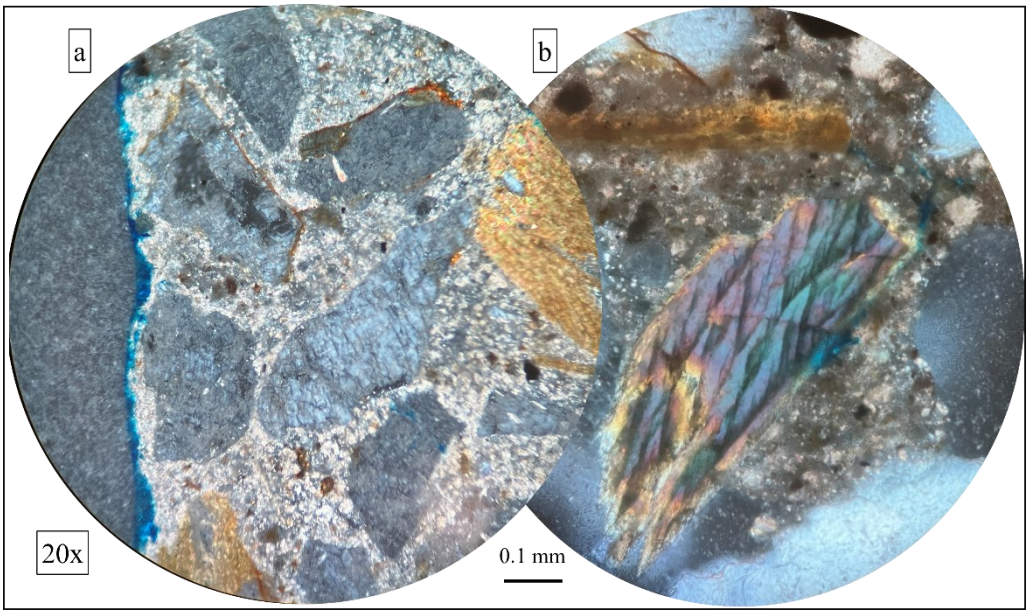


Figura 64. Diferencias entre a) color de pasta en los bordes de las barras y b) la pasta al interior de las barras de mortero expuestas.

La microscopía electrónica SEM permitió evidenciar otra diferencia importante entre las barras y cubos de mortero. La falla en los cubos producida por la prueba de resistencia a la compresión generó la abertura del mineral en la dirección del plano de foliación (Figura 65.). En las secciones delgadas de las barras de mortero por el contrario no se presentó la tendencia de las micas a desplegarse, ya que, las barras bajo exposición no fueron sometidas pruebas de compresión. La anterior situación indica la alta susceptibilidad de fases minerales como la biotita para fallar a lo largo de su plano de foliación, considerando además que cuando hay alguna exposición agresiva las fases C-S-H, portlandita y ettringita se ven menos desarrollada y con una morfología menos densas Figura 65.

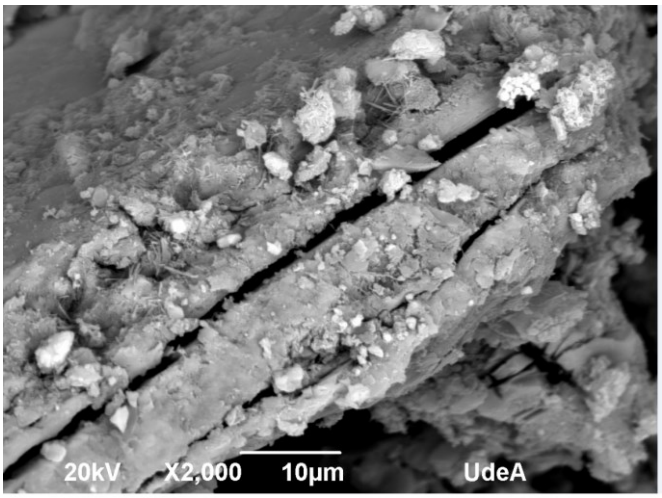


Figura 65. Abertura de plano de foliación de mineral de biotita.

4.2. Discusión de resultados

El tamaño de partícula de la escoria de acero favorece su incorporación y sustitución como material cementante, ya que no requiere gastos energéticos de procesamiento para reutilizarse dentro de la matriz de morteros de cemento. Además, la densidad de la escoria superior a $4\ g/cm^3$ favorecería su uso en aplicaciones en las que se requieren morteros de alta densidad o aislantes.

La disminución de fluidez de las mezclas obedece a varios factores entre los que están: la alta capacidad de absorción que tiene el polvo de escoria de acero; la presencia de micáceos como biotita y moscovita que por su alta capacidad de absorción de agua pudo generar la reducción de la trabajabilidad de la mezcla (Lema Zambrano, 2021); la composición química de la escoria de acero, que con más del 50 % de contenido de Zn tiene efectos en el proceso de hidratación del cemento y genera un retraso en el fraguado y endurecimiento del mortero. Es importante considerar aplicar algún activador químico que disminuya este efecto (Tan et al., 2023). En la Figura 66. se muestran las consecuencias en resistencia a la compresión, pues el tipo de curado influye directamente en esta propiedad, donde los valores de resistencia más altos fueron obtenidos en las muestras curadas por inmersión, independientemente del tipo de material (Hernandez et al., 2018),

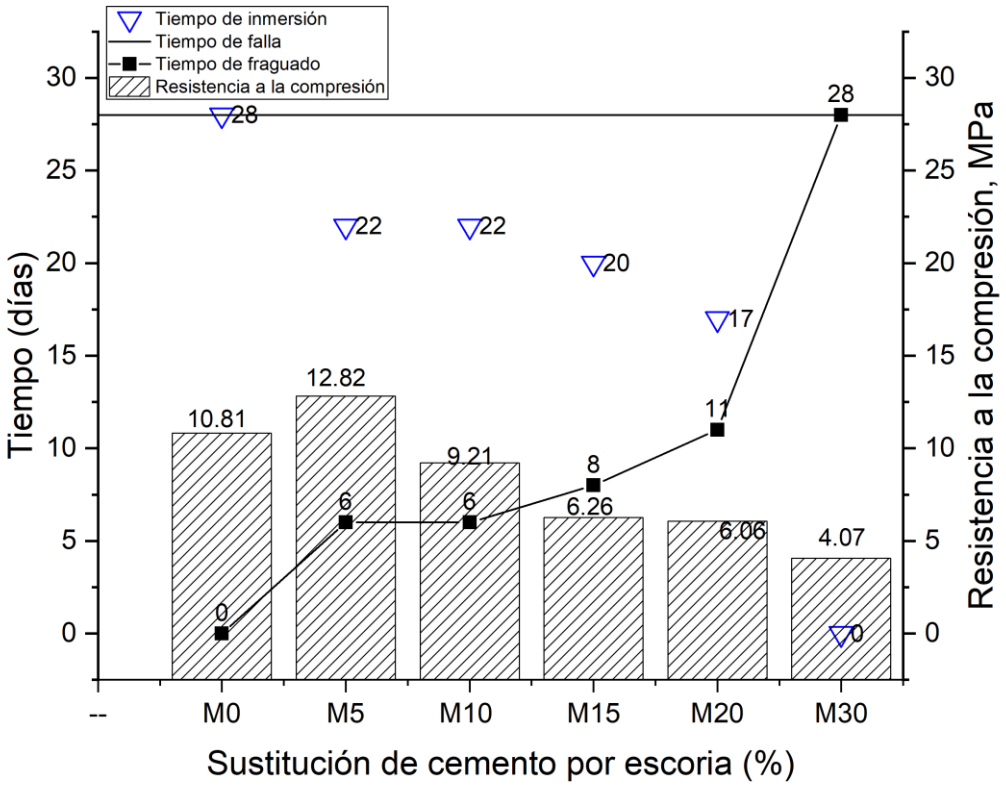


Figura 66. Relación entre el tiempo inmersión en agua y resistencia a la compresión.

En la Figura 67. se contrastan los resultados a nivel macroscópico con la prueba de resistencia a la compresión y el análisis petrográfico de los cubos de mortero. La correspondencia entre la disminución de la resistencia a compresión y las imágenes obtenidas en la microscopia óptica y electrónica permiten confirmar la pérdida de calidad en la adherencia o debilidad de la zona intersticial con el aumento de sustitución de cemento por escoria; y de esta manera es posible considerar un efecto integral o completo en el compuesto, es decir, la microestructura afecta la macroestructura de los morteros, teniendo en cuenta que a nivel macro, se cumple con algunas exigencias normativas, por ejemplo, en la Figura 67. también se observa el límite de resistencia a compresión f'_c=7.5 MPa que de acuerdo con la normativa Colombia es posible emplear en aplicaciones de uso no estructural, esto significa que porcentajes de sustitución de hasta el 10% podrían evaluarse como alternativas de acuerdo con la Tabla D.3.4-1 NSR 10 podría pensarse en hacer un diseño de mezclas para mortero tipo S y N, evaluando la incorporación. En la Figura 67. también se puede ver la relacion entre el aumento de espacio entre pasta y grano de arena con el aumento de sustitución.

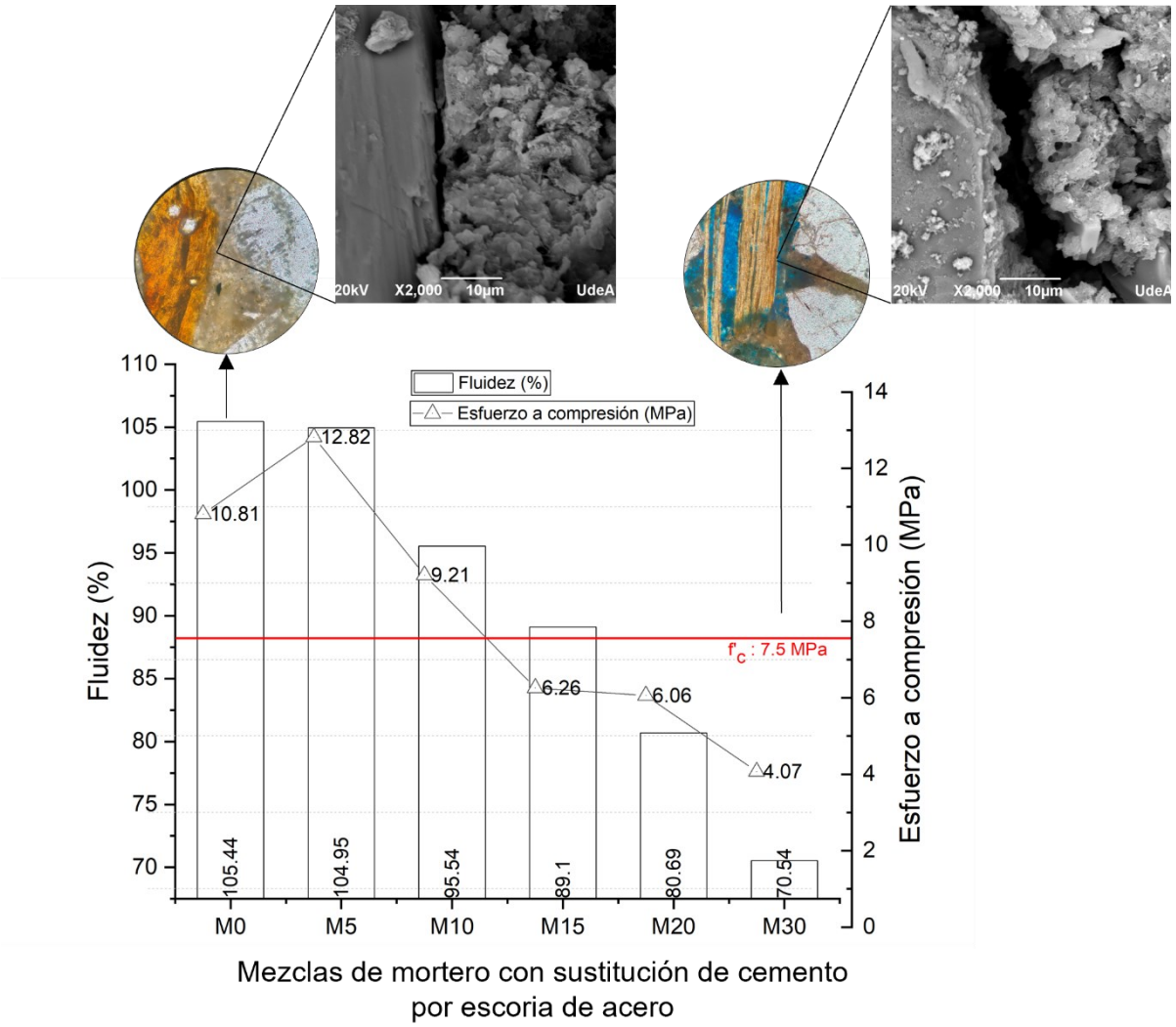


Figura 67. Relación entre propiedades macroestructural y microestructurales.

Por medio de la petrografía se pudo encontrar que después del endurecimiento de los cubos se formaron aglomerados de escoria de acero, lo que tiene concordancia con los resultados encontrados durante la caracterización de la escoria de acero, y que explica los efectos que tiene en la disminución de las propiedades físicas y mecánicas.

La variación en los picos encontrados por la prueba de DRX está en consonancia con la reducción de los elementos Ca, Al, Si y Fe que muestran los EDX cuando se incorporó la escoria de acero en reemplazo de cemento, su distribución disminuyó en las proximidades a los granos de arena y aparecieron con mayor intensidad otros elementos como Mn, Cl, Ti y Zn, que posiblemente dieron desarrollo a las fases identificadas en el difractómetro del cubo M30, Mn_3O y Zincita y modificaron algunas fases del cemento.

Las micrografías SEM permitieron identificar los cambios microestructurales de las mezclas de mortero con y sin exposición frente a sulfato de sodio (Na_2SO_4). Los cambios en el color

de la pasta en los bordes de las barras dan cuenta de la reacción química que provoca el ataque, que a través del mapeo composicional EDX se observó que está distribuido de manera uniforme por toda el área y forma cristales cúbicos cerca de la superficie de los fragmentos de barra analizados. Adicionalmente, el efecto en la microestructura de las mezclas de mortero está asociado entonces con la interrupción de las reacciones químicas que normalmente ocurren en el cemento; la pérdida de adherencia; y en algunos casos la presencia de minerales micáceos; cada uno de estos factores, en la medida en que creció el porcentaje de sustitución de cemento por escoria de acero y/o la mezcla fue atacada con iones de sulfato, fue posible observar mayor afectación en las propiedades macroestructurales como la fluidez, la resistencia a la compresión y la cambios en la superficie del mortero.

Capitulo V: Conclusiones y recomendaciones

- Pese a que el polvo de escoria de acero tiene características físicas de tamaño y densidad deseables para su incorporación como sustituto del cemento en la fabricación de mortero, su composición química reacciona durante el proceso de hidratación del cemento y cambia las propiedades en estado fresco y endurecido del mortero.

- La composición química de la de escoria de acero está constituida principalmente por metales de Zn, Fe, Pb, Mg y Mn, lo que la convierte en potencial contaminante por lixiviación en los vertederos donde son dispuestas. Evaluar su inmovilización y estabilización en materiales de construcción se convierte en una alternativa que ayuda al desarrollo de los ODS 9. Industria, innovación e infraestructura y 13. Acción por el clima.

- Es evidente que la incorporación de escoria de acero genera un cambio en el color de acabado de la superficie endurecida, esto permite considerar la escoria como una alternativa de pigmentación en aplicación de elementos arquitectónicos de uso ornamental. Por otro lado, los tiempos de fraguado del cemento se ven afectados por el alto contenido de Zinc de la escoria. Este efecto trae consigo un retardo en el inicio del curado del cemento y como consecuencia reducción de sus propiedades mecánicas. Sin embargo, con un estudio detallado de diseño de mezclas podría pensarse en evaluar el uso de la escoria como activador retardante para aplicaciones de uso no estructural.

- La mezcla con mejor desempeño físico y mecánico fue M5, en ella la resistencia a la compresión de los cubos aumentó y la fluidez cayó solo el 1 % respecto a la muestra control M0. De acuerdo con la normativa colombiana se podría valorar el uso de estas escorias en porcentajes inferiores al 5 % para aplicaciones de uso no estructural como es el caso de recubrimiento de muros o elementos estructurales interiores, protección de taludes y morteros de embellecimiento.

- El análisis petrográfico permitió observar con el aumento del porcentaje de sustitución de cemento por escoria, efectos en la adherencia y zona intersticial de los granos de arena, donde a mayor cantidad de escoria era más débil y deficiente la unión. Esa condición tuvo relación directa con la presencia de vacíos en las mezclas de mortero, y a su vez la disminución en las propiedades mecánicas.

- Durante la elaboración de las mezclas de mortero se observó una mezcla homogénea de la escoria de acero con el agua, la petrografía permitió encontrar la formación de aglomerados de polvo de escoria de acero, en especial para los porcentajes del 20 y 30%.

- El análisis petrográfico deja en evidencia los efectos adversos que genera agregado micáceo en el comportamiento físico y mecánico de los morteros, ya que como se observó en el análisis microestructural de las secciones delgadas, los agregados micáceos reaccionan físicamente con facilidad.

- Pese a que la arena empleada en este estudio está compuesta con un alto porcentaje de cuarzo (44 %), no se observan reacción o geles en la zona intersticial que indiquen algún tipo de agregado reactivo en la arena de tipo álcali-sílice; sin embargo, estas reacciones se dan con tiempos más prolongados de análisis.

- La reducción de las propiedades mecánicas de las mezclas con sustitución de cemento por escoria mostró relación directa con los análisis en el SEM, donde se observó una morfología menos densa y con mayor cantidad de poros a medida que se aumenta la sustitución de cemento. Adicionalmente, con ayuda de las micrografías fue posible diferenciar el desarrollo de las fases cristalinas del cemento en un mortero con mayor o menor porcentaje de sustitución y además con algún grado de exposición que para el caso de esta investigación fueron frente a sulfato de sodio.

- La petrografía aplicada al estudio de adiciones alternativas y patologías en morteros de cemento hidráulico como se pudo ver en este trabajo representa una potente técnica clave para mejorar el desempeño de los materiales a base de cemento en las obras civiles frente a condiciones normales y/o de degradación.

Recomendaciones y futuras investigaciones

Considerando el alcance de este proyecto de investigación, después de finalizar se sugieren algunas preguntas y recomendaciones que ayudarían y contribuirían a la ampliación de esta temática y de esa forma proponer trabajos futuros en esta línea de investigación.

- La mezcla con el 5 % de sustitución de cemento por escoria de acero (M5) mostró ser positiva para la reacción del cemento, se sugiere hacer ensayos detallados sobre este porcentaje, donde se examine con cuidado todos los ensayos químicos, mecánicos y petrográficos.
- Utilizar pruebas de lixiviación para medir la capacidad de estabilización e inmovilización de los metales pesados de la escoria una vez endurecidas las mezclas de morteros. De este modo se podría evaluar la susceptibilidad de uso del mortero en aplicaciones con exposición a agua.
- Evaluar el comportamiento de la escoria con diferentes acelerantes o activadores que ayuden a contrarrestar el retraso o tardanza del proceso de fraguado por la sustitución del cemento por la escoria de acero.
- Es preciso hacer pruebas de medición del calor de hidratación durante el fraguado de las mezclas.
- Se sugiere hacer estudios del ataque del sulfato con intervalos de secado y humedad.

- Hacer un análisis del costo ambiental y económico que podría genera reutilizar este residuo como materia prima.
- Evaluar el comportamiento de los morteros frente a otros ambientes de deterioro o que induzcan algún tipo de patología en la matriz.
- En estudios futuros se recomienda complementar los análisis con pruebas de porosimetría MPI, seguimiento térmico en cámara multiespectral y generación vacío durante las pruebas de ataque de sulfato con el fin de acelerar el deterioro de las muestras. También se recomienda pruebas mecánicas con edómetros para evaluar el hinchamiento por ettiringita.

Referencias

ASTM - American Society for Testing and Materials (C150, , C144, C1012, C125, C109, C230, C305, C672, C702, C778, C856, D2487, D4318, D5550, D6919, D854).

A.M. Neville. (1997). *Properties of Concrete: Fourth and Final Edition*. 271–729. http://www.amazon.com/Properties-Concrete-Fourth-Final-Edition/dp/0470235276

ACI Education Bulletin E3-13. (2013). ACI Education Bulletin E3-01 "CEMENTITIOUS MATERIALS FOR CONCRETE." *American Concrete Institute*, 1–25. http://www.concrete.org/general/fE3-01.pdf

Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2018). Characterization and constructive utilization of sludge produced in clari-flocculation unit of water treatment plant. *Materials Research Express*, *5*(3). https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab23a

AIS, A. colombiana de ingeniería sismica-. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resitente NSR-10. *Scielo*.

Al-Harahsheh, M., Altarawneh, S., Al-Omari, M., Altarawneh, M., Kingman, S., & Dodds, C. (2021). Leaching behavior of zinc and lead from electric arc furnace dust – Poly(vinyl) chloride residues after oxidative thermal treatment. *Journal of Cleaner Production*, *328*(May), 129622. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129622

Alejandro Giraldo, M. M., & Iván Tobón, J. (2006). Evolución mineralógica del cemento Portland durante el proceso de hidratación. *Dyna*, *73*, 69–81. https://www.redalyc.org/pdf/496/49614807.pdf

Alizadeh, M., & Momeni, M. (2016). The effect of the scrap/DRI ratio on the specification of the EAF dust and its influence on mechanical properties of the concrete treated by its dust. *Construction and Building Materials*, *112*, 1041–1045. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.011

Arango-L., J. F. (2022). *Patología de la construcción: fundamentos* (Primera).

Araos Henríquez, P., Aponte, D., Ibáñez-Insa, J., & Barra Bizinotto, M. (2021). Ladle furnace slag as a partial replacement of Portland cement. *Construction and Building Materials*, *289*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123106

Asocreto. (2010). *Tecnología del Concreto Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas*.

Badiye, A., Kapoor, N., & Shukla, R. K. (2022). Introduction to Microscopy. In *Forensic Microscopy: Truth Under the Lenses*. https://doi.org/10.4324/9781003120995-1

Bedoya Henao, C. A., Tobón, J. I., Monsalve Valencia, J. J., Vanegas Palacio, C., & Valencia Betancur, M. (2016). Evaluación de patologías en el concreto usando microscopía óptica. *Informador Técnico*, *80*(2), 142. https://doi.org/10.23850/22565035.491

Beltran Calvo, G. I., & Romero Beltran, N. (2022). *El concreto asfáltico visto bajo el microscopio*.

Brandner, U., Antrekowitsch, J., & Leuchtenmueller, M. (2021). A review on the

fundamentals of hydrogen-based reduction and recycling concepts for electric arc furnace dust extended by a novel conceptualization. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(62), 31894–31902. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.062

Chang, Z., Long, G., Zhou, J. L., & Ma, C. (2020). Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, *154*(November 2019), 104606. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104606

Cholake, S. T., Farzana, R., Numata, T., & Sahajwalla, V. (2018). Transforming electric arc furnace waste into value added building products. *Journal of Cleaner Production*, *171*, 1128–1139. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.084

Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Carnevale Miino, M., Cillari, G., & Ricciardi, P. (2021). A review on alternative binders, admixtures and water for the production of sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, *295*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126408

Colorado, H. A., Garcia, E., & Buchely, M. F. (2016). White Ordinary Portland Cement blended with superfine steel dust with high zinc oxide contents. *Construction and Building Materials*, *112*, 816–824. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.201

da Silva Magalhães, M., Faleschini, F., Pellegrino, C., & Brunelli, K. (2017). Cementing efficiency of electric arc furnace dust in mortars. *Construction and Building Materials*, *157*, 141–150. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.074

Damineli, B. L., Pileggi, R. G., Lagerblad, B., & John, V. M. (2021). Effects of filler mineralogy on the compressive strength of cementitious mortars. *Construction and Building Materials*, *299*(March). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124363

de Luxan, M. P., Frias, M., & Sanchez de Rojas. (1988). La Difraccion De Rayos Laser En El Analisis De La Granulometría De Particulas. In *Quimica Hoy*.

Eliana Llano, & Gloria Restrepo. (2022). Efecto del intemperismo sobre las propiedades fisicoquímicas, el desempeño y la durabilidad de suelos viales aditivados con estabilizantes químicos. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, *3*(1), 2–15. https://doi.org/10.54021/seesv3n1-001

Fares, G., Al-Zaid, R. Z., Fauzi, A., Alhozaimy, A. M., Al-Negheimish, A. I., & Khan, M. I. (2016). Performance of optimized electric arc furnace dust-based cementitious matrix compared to conventional supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, *112*, 210–221. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.068

Ferro Beltrán, M. (2021). *El Camino de Colombia hacia las edificaciones Neto Cero Carbono*. 1–197.

Ficem. (2019). *Cifras de la insdustria cementera mundial*. 2–3.

FICEM. (2020). *El cemento, El concreto y su contribución en el desarrollo de ciudades sostenibles y resilientes*.

Ficem, & Procemco. (2021). *Hoja de Ruta Colombia Industria del Cemento*. 1–124. https://procem.co/pdf/hoja-de-ruta/hr-colombia-final-11032021.pdf

Galusnyak, S. C., Petrescu, L., & Cormos, C. C. (2022). Environmental impact assessment of post-combustion CO2 capture technologies applied to cement production plants. *Journal of Environmental Management*, *320*(December 2021), 115908. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115908

Gómez Cortés, J. G. (2022). *Durabilidad del concreto reforzado* (U. N. de Colombia (Ed.); 1st ed.).

González, J., & Sancho, M. (2017). *Análisis De La Distribución De Tamaños De Partículas Mediante Difracción Láser: Aplicación Para La Mejora De Mezclas De Especias Y Aromas*. 1–92. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/85416/26751784R_TFG_1499272324385786210592494804720 8.pdf?sequence=2

Gutierrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*.

Hamad, A. J. (2017). Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, *29*(4), 373–380. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2015.09.003

Hernández Moreno, S. (2019). *Degradación y durabilidad de materiales y componentes constructivos* (Primera).

Hernandez, N., Lizarazo-Marriaga, J., & Rivas, M. A. (2018). Petrographic characterization of Portlandite crystal sizes in cement pastes affected by different hydration environments. *Construction and Building Materials*, *182*, 541–549. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.142

Hewlett, P., & Liska, M. (2003). *Lea ' s Chemistry of Cement and Concrete Edited by*. https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6256-7.50031-X

Hincapié, L. C. S. (2015). Evaluación De Escorias Siderúrgicas De Horno De Arco Eléctrico En Mezclas De Concreto Estructural. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9), 1689–1699.

IPCC. (2021). Comunicado de prensa del IPCC. *Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático (IPCC)*, 1–5. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf

Jabbour, M., Metalssi, O. O., Quiertant, M., & Baroghel-Bouny, V. (2022). A Critical Review of Existing Test-Methods for External Sulfate Attack. *Materials*, *15*(21). https://doi.org/10.3390/ma15217554

Kirthika, S. K., Singh, S. K., & Chourasia, A. (2020). Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete- A review. *Journal of Cleaner Production*, *268*, 122089. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122089

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & P., W. C. (2008). *Design and Control of Concret*

Mixtures.

Kusuma, R. T., Hiremath, R. B., Rajesh, P., Kumar, B., & Renukappa, S. (2022). Sustainable transition towards biomass-based cement industry: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *163*(January), 112503. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112503

Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Fernández, J. M., & de Brito, J. (2017). Experimental study of the mechanical stabilization of electric arc furnace dust using fluid cement mortars. *Journal of Hazardous Materials*, *326*, 26–35. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.051

Lema Zambrano, J. C. (2021). *Mejoramiento del comportamiento físico y químico de las arcillas y materiales micáceos presentes en agregados finos de mala calidad para su uso en la producción de concreto hidráulico*.

Lozano-Lunar, A., da Silva, P. R., de Brito, J., Álvarez, J. I., Fernández, J. M., & Jiménez, J. R. (2019). Performance and durability properties of self-compacting mortars with electric arc furnace dust as filler. *Journal of Cleaner Production*, *219*, 818–832. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.145

Lozano-Lunar, Angélica, Raposeiro da Silva, P., de Brito, J., Fernández, J. M., & Jiménez, J. R. (2019). Safe use of electric arc furnace dust as secondary raw material in self-compacting mortars production. *Journal of Cleaner Production*, *211*, 1375–1388. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.002

Lozano Peña, J. E. (2014). *Utilización del microscopio en el diagnóstico de ataque de sales de sulfato de sodio y de sulfato de magnesio en la pasta de cemento de morteros* (Universidad Nacional de Colombia (Ed.); Primera).

Magalhães, M. da S., Faleschini, F., Pellegrino, C., & Brunelli, K. (2019). Influence of alkali addition on the setting and mechanical behavior of cement pastes and mortars with electric arc furnace dust. *Construction and Building Materials*, *214*, 413–419. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.141

Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. (2009). *Materiales para ingeniería civil* (Segunda). PEARSON.

Marsh, A. T. M., Velenturf, A. P. M., & Bernal, S. A. (2022). Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration. *Journal of Cleaner Production*, *362*(May), 132486. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486

Martins, A. C. P., Franco de Carvalho, J. M., Costa, L. C. B., Andrade, H. D., de Melo, T. V., Ribeiro, J. C. L., Pedroti, L. G., & Peixoto, R. A. F. (2021). Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance. *Construction and Building Materials*, *291*, 123265. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123265

Meshram, S., Raut, S. P., Ansari, K., Madurwar, M., Daniyal, M., Khan, M. A., Katare, V., Khan, A. H., Khan, N. A., & Hasan, M. A. (2023). Waste slags as sustainable construction materials: a compressive review on physico mechanical properties.

Journal of Materials Research and Technology, *23*, 5821–5845. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.176

Metha, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *CONCRETE Microstructure, Properties, and Materials* (McGraw Hill (Ed.); 3rd ed.).

Nair, A. T., Mathew, A., A R, A., & Akbar, M. A. (2022). Use of hazardous electric arc furnace dust in the construction industry: A cleaner production approach. *Journal of Cleaner Production*, *377*(March), 134282. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134282

Nesse, W. D. (2004). *Introdution to optical mineralogy*.

Nikolic, I., Crossed D Signurovic, D., Markovic, S., Veselinovic, L., Jankovic-Castvan, I., Radmilovic, V. V., & Radmilovic, V. R. (2020). Alkali activated slag cement doped with Zn-rich electric arc furnace dust. *Journal of Materials Research and Technology*, *9*(6), 12783–12794. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.024

Pang, L., Liao, S., Wang, D., & An, M. (2022). Influence of steel slag fineness on the hydration of cement-steel slag composite pastes. *Journal of Building Engineering*, *57*(May), 104866. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104866

Pico Cortés, C. M. (2012). *Propuesta de concreto con agregado fino de escoria de cubilote como aporte al estudio de la durabilidad y propiedades acústicas*.

Poole, A. B., & Sims, I. (2016). *CONCRETE PETROGRAPHY A handbook of investigative techniques*.

Rashad, A. M. (2022). Behavior of steel slag aggregate in mortar and concrete - A comprehensive overview. *Journal of Building Engineering*, *53*(January), 104536. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104536

Rocha, J. H. A., Toledo Filho, R. D., & Cayo-Chileno, N. G. (2022). Sustainable alternatives to CO2 reduction in the cement industry: A short review. *Materials Today: Proceedings*, *57*, 436–439. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.565

Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*.

Sánchez de Guzmán, D. (2006). *Durabilidad y patología del concreto* (2nd ed.).

Sedaghatdoost, A., Behfarnia, K., Bayati, M., & Vaezi, M. sadegh. (2019). Influence of recycled concrete aggregates on alkali-activated slag mortar exposed to elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, *26*(July), 100871. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100871

Srivastava, A., & Singh, S. K. (2020). Utilization of alternative sand for preparation of sustainable mortar: A review. *Journal of Cleaner Production*, *253*, 119706. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119706

Suárez hicapié, L. C. (2018). *Evaluación de escorias siderúrgicas de horno de arco eléctrico en mezclas de concreto estructural*. Universidad de los Andes.

Sun, C., Chen, L., Xiao, J., Singh, A., & Zeng, J. (2021). Compound utilization of

construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, *170*(November 2020), 105561. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105561

Tan, J., Sierens, Z., Vandevyvere, B., Dan, H., & Li, J. (2023). Zinc oxide in alkali-activated slag (AAS): retardation mechanism, reaction kinetics and immobilization. *Construction and Building Materials*, *371*(February), 130739. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130739

Thomas, C., Rosales, J., Polanco, J. A., & Agrela, F. (2018). Steel slags. In *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00007-5

Tobón, J. I. (2011). *Evalucación del desempeño del cemento pórtland adicionada con nanopartículas de sílice.*

Walker, H. N.; Lane, S. D.; Stutzman, P. E. (2006). Petrographic Methods of Examining Hardened Concrete : A Petrographic Manual. *Fhwa-Hrt-04-150*, *July*, 353.

Zhang, H. (Ed.). (2011). Building Materials in civil Engineering. In *Woodhead Publishing*.