

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



UTILIZACIÓN DE ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN
MORTEROS A BASE CEMENTO PORTLAND

POR:
LUCERO MARISOL SERRATO ARIAS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN
EN INGENIERÍA AMBIENTAL

NOVIEMBRE DE 2014



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

Subdirector de Estudios de Posgrado
Presente.-

Estimado Dr. César Juárez:

Por medio de la presente, le comunico que la **QFB Lucero Marisol Serrato Arias**, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis denominado: *“Utilización de escoria de horno de arco eléctrico en morteros a base cemento portland”*, por lo que no tengo inconveniente en solicitarle amablemente que gire las instrucciones pertinentes para dar paso a los trámites correspondientes y atender la solicitud del Examen de Grado de la QFB Lucero Marisol Serrato Arias para cumplir los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución.

Agradeciendo de antemano las atenciones brindadas a la presente, me despido enviándole un cordial saludo y quedando a sus apreciables órdenes.

ATENTAMENTE

“Alere Flammam Veritatis”

Ciudad Universitaria, a 29 de septiembre de 2014

DR. ANTONIO ALBERTO ZALDÍVAR CADENA

Director de Tesis
Profesor Investigador Titular A



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

Subdirector de Estudios de Posgrado

Presente.-

Estimado Dr. César Juárez:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado como Evaluador de la Tesis “*Utilización de escoria de horno de arco eléctrico en morteros a base cemento portland*” que presenta la **QFB Lucero Marisol Serrato Arias**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a usted que después de haber leído, evaluado la calidad de la tesis y la **Q.F.B. Serrato Arias** ha hecho las correcciones sugeridas a la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un cordial saludo, quedando a sus órdenes.

ATENTAMENTE

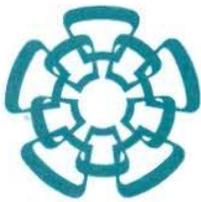
“Alere Flammman Veritatis”

Ciudad Universitaria, a 10 de Octubre de 2014

DR. JAVIER RODRIGO GONZÁLEZ LÓPEZ

Co-Director de Tesis

Evaluador



CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN
UNIDAD SALTILLO

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

Subdirector de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil
Presente.-

Estimado Dr. César Juárez:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado como Evaluador de la Tesis "*Utilización de escoria de horno de arco eléctrico en morteros a base cemento portland*" que presenta la **QFB Lucero Marisol Serrato Arias**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a usted que después de haber leído, evaluado la calidad de la tesis y la **Q.F.B. Serrato Arias** ha hecho las correcciones sugeridas a la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un cordial saludo, quedando a sus órdenes.

ATENTAMENTE

Ramos Arizpe, Coahuila a 9 de Octubre de 2014

DR. MIGUEL ÁNGEL AGUILAR GONZÁLEZ
Asesor Externo
Evaluador Externo



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Oficio SDEP-536-2014

ING. LÁZARO VARGAS GUERRA

Director del Departamento de Escolar y de
Archivo de la UANL
Presente.-

Estimado Ing. Vargas:

Por este conducto me permito comunicarle que la **Q.F.B. Lucero Marisol Serrato Arias**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual a cubierto la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales y el Reglamento General de Estudios de Posgrado de nuestra Institución.

De la manera más atenta, le solicito su colaboración para que se dé el trámite correspondiente en el Departamento a su digno cargo.

Sin más por el momento, quedo a sus apreciables órdenes para cualquier duda o aclaración.

ATENTAMENTE,
"ALERE FLAMAM VERITATIS"
Cd. Universitaria a 16 de octubre del 2014

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ÁLVARADO
Subdirector de Estudios de Posgrado



SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO

C.c.p. Archivo.
Rtp.

Dedicatoria

“Somos lo que hacemos con lo que hicieron de nosotros”. Jean Paul Sartre.

Sobran razones para dedicar esta tesis a mis padres, Luz Margarita Arias y Victor Serrato pero quiero resaltar una de manera especial. Y es que, a día de hoy, yo he sido quien he querido ser, o al menos lo he intentado, y eso debo agradecerse a ellos. Quienes mediante su ejemplo, me enseñaron el camino del esfuerzo a pesar de las adversidades; sin embargo, este ejemplo jamás ha sido impuesto. Antes bien, me han brindado la libertad de buscar mi propia opinión, aunque a veces diste mucho de la suya.

Por confiar en mí, por respetar las decisiones que tomo mientras me ven haciendo sendero; tan lejos como para cometer mis propios errores y caer con mis tropiezos; y tan cerca como para ayudarme a andar de nuevo y ser el punto de partida de mi impulso. Mil gracias.

De igual manera y con el debido respeto, este trabajo está dedicado a cuarenta y tres normalistas, que un día decidieron alzar la voz para pedir mejor educación. A ellos, mis reconocimientos.

Agradecimientos

Quiero agradecer a las instituciones que me permitieron realizar este trabajo, especialmente a Universidad Autónoma de Nuevo León, a la Facultad de Ingeniería Civil y al proyecto CONACYT 107063 CB-2008 por el soporte económico otorgado para la realización de esta tesis.

De igual forma, extiendo mis agradecimientos al Dr. Antonio Zaldívar por su confianza y enorme apoyo durante la realización de este proyecto. Así mismo, agradezco a los doctores Rodrigo González y Miguel Aguilar por fungir como revisores del presente trabajo y por su orientación, aportaciones y conocimientos compartidos que me ayudaron a concluir el presente trabajo.

Agradezco a diferentes departamentos del Instituto de Ingeniería Civil, de manera particular a los laboratorios de Materiales de la Construcción y de Tecnología del Concreto por permitirme el uso de equipos para la realización de una parte de mi experimentación; y de manera general, a la administración del instituto y a la biblioteca del mismo.

Al Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo, que por conducto del Dr. Miguel Aguilar fue posible la realización de algunos análisis de muestras.

Al Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción por recibirme para la realización de una estancia, especialmente al personal del laboratorio de Morteros y Hormigones, y de manera distinguida, al Dr. José Luis García por su apoyo y orientación en parte importante de mi experimentación.

A mis profesores de la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental y de otros programas de maestría que me brindaron de su conocimiento para enriquecer mi formación. Extiendo este agradecimiento al Dr.

Víctor Guerra Cobian por el apoyo brindado en la tramitología pertinente durante el periodo de la maestría.

A todos mis compañeros por su cariño, apoyo y experiencias compartidas estos dos años, en especial a mis compañeros de cubículo: Daniel Ruiz, Ricardo Cavazos e Ismael Díaz, así como a mis compañeros de generación Claudia Compean, Verónica Cerda, Daniel López y Raúl Guzmán.

Y por supuesto, agradezco a mis hermanas, Korina y Cinthia a quienes amo y son parte fundamental de mi motivación diaria. De igual modo, agradezco a Fabiola Cazares, quien desde la periferia, me ha acompañado en el proceso de realización de este trabajo con su amistad y comprensión.

“Mas que no sirvan estas palabras nunca de excusa, porque los verdaderos agradecimientos se expresan con acciones”.

RESUMEN

Lucero Marisol Serrato Arias	Fecha de graduación: Octubre 2014
Universidad Autónoma de Nuevo León	Facultad de Ingeniería Civil
Título del Estudio:	Utilización de escoria de horno de arco eléctrico en morteros a base cemento portland
Número de páginas: 150	Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental
Área de estudio:	Ingeniería Ambiental

Propósito: Este trabajo tuvo como finalidad la fabricación de morteros de cemento portland con adiciones de escoria de horno de arco eléctrico en masa respecto al cemento portland, con el objetivo de que los morteros producidos desarrollen una resistencia a la compresión similar a la del mortero ordinario. La utilización de un residuo industrial da como resultado una disminución en el consumo de materia prima destinada a su elaboración, al mismo tiempo que se evita la disposición final de la escoria en un confinamiento donde se convierte en un pasivo ambiental.

Método de estudio: La escoria de horno de arco eléctrico (EAF) fue molida y caracterizada mediante técnicas como: FRX, DRX, SEM EDS, TEM. Además, se le hizo un análisis de toxicidad al ambiente con la finalidad de comprobar si se categoriza o no como residuo peligroso, con base a las regulaciones mexicanas. Se fabricaron probetas de tipo prismático para determinar la resistencia a la compresión de los morteros con adiciones de 5, 10, 20, 30 y 60 % de escoria EAF en lugar de cemento portland y ensayadas a las edades de 2, 7, 28 y 90 días. Además, se hizo la prueba de expansión por medio de la reactividad álcali – sílice

para determinar si es factible la utilización segura de esta escoria en morteros. Por último, se realizó un estudio de caracterización de la microestructura en los morteros con la finalidad de estudiar el comportamiento de la escoria en la matriz cementante.

Conclusiones: Los resultados más importantes muestran que con adiciones de 5 y 10 % en peso de la escoria EAF, sustituyendo al cemento en un mortero, se obtiene una resistencia a la compresión similar a la del mortero convencional. Las pruebas de expansión indican que la escoria no presenta propiedades expansivas al ser incorporada en la matriz cementante. Al efectuar los análisis de SEM EDS no se encontraron productos de reacción de la escoria EAF en la microestructura. Los resultados de toxicidad al ambiente muestran que los elementos como Cr, As y Se no sobrepasan los Límites Máximos Permisibles (LMP), por lo que la escoria puede considerarse un residuo no peligroso.

Índice de contenido

Capítulo 1 – Introducción

Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Hipótesis	3
1.3 Objetivo general	3
1.4 Objetivos específicos	3
1.5 Justificación	4
1.6 Alcance	5
1.7 Antecedentes	5
1.7.1 Escoria de acero	6
1.7.2 Antecedentes sobre estudios de escoria EAF	7
1.7.3 Antecedentes sobre escoria EAF aplicada en asfalto	8
1.7.4 Antecedentes sobre escoria EAF como clínker	9
1.7.5 Antecedentes sobre escoria EAF como agregado para concretos	9

Capítulo 2 – Marco teórico

2.1 Percepción de los residuos en la sociedad	11
2.2 Cronología de las primeras legislaciones en el mundo	12
2.3 Legislación ambiental en México	13
2.3.1 Residuos sólidos urbanos	13
2.3.2 Residuos de manejo especial	13
2.3.3 Residuos peligrosos	14
2.4 Manejo Integral de residuos	15
2.5 Industria del acero	16
2.6 Generación de escorias en México	18
2.7 Horno de arco eléctrico	19
2.8 Cemento portland	20
2.8.1 Cementos en México	21
2.8.2 Cementos en España	22

Capítulo 3 – Metodología

3.1 Caracterización de la escoria EAF	25
3.1.2 Molienda mecánica	26
3.1.3 Distribución de tamaño de partículas (DTP)	27
3.1.4 Fluorescencia de rayos X (DRX)	27
3.1.5 Difracción de rayos X (FRX)	28
3.1.6 Microscopio electrónico de barrido	29

3.1.6.1 Preparación de muestras para microscopio electrónico de barrido	29
3.1.7 Microscopio electrónico de transmisión	30
3.1.7.1 Preparación de muestras para TEM	31
3.1.7.2 Comparación entre las técnicas de SEM y TEM	31
3.1.8 Análisis del extracto PECT	32
3.1.8.1 Determinación de pH y del reactivo a utilizar en la prueba del extracto PECT	32
3.1.8.2 Lixiviación de la muestra	33
3.1.8.3 Digestión	33
3.2 Preparación de morteros	36
3.2.1 Materiales	36
3.2.1.1 Cemento	36
3.2.1.2 Arena	37
3.2.1.3 Escoria	38
3.2.1.4 Aditivos	38
3.2.2 Mezclas de mortero	39
3.2.3 Determinación de la consistencia del mortero fresco	41
3.2.4 Determinación de la resistencia a la flexión y a compresión del mortero endurecido	44
3.2.5 Fabricación de probetas para determinación de la reactividad álcali – sílice	46
3.2.5.1 Tratamiento alcalino	48
3.2.6 Preparación de muestras para SEM EDS	49

Capítulo 4 - Resultados y discusiones

4.1 Caracterización de la escoria EAF	51
4.1.1 Distribución de tamaño de partículas (DTP)	51
4.1.2 Fluorescencia de rayos X (FRX) y espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) acoplado al microscopio electrónico de barrido (SEM)	52
4.1.3 Difracción de Rayos X (DRX)	56
4.1.4 Microscopio electrónico de barrido (SEM)	58
4.1.5 Microscopio electrónico de transmisión (TEM)	61
4.1.6 Prueba del extracto PECT y determinación de peligrosidad del residuo	64
4.1.7 Otras determinaciones realizadas a la escoria	67
4.1.7.1 Determinación de cal libre	67
4.1.7.2 Determinación de la pérdida por ignición	67
4.1.7.3 Determinación de residuo insoluble	68
4.2 Resistencia a la compresión	69
4.3 Determinación de la reactividad álcali – sílice	79
4.4 Microestructura	83

Conclusiones	94
Recomendaciones	96
Apéndice I	97
Apéndice II	99
Apéndice III	102
Referencias	103

Índice de figuras

Capítulo 2 – Marco teórico

Figura 2.1 Industrias mexicanas que más energía consumieron del 2000 – 2010	17
Figura 2.2 Esquema de horno de arco eléctrico	20

Capítulo 3 – Metodología

Figura 3.1 Diagrama de trabajo experimental	25
Figura 3.2 Molino planetario usado en el primer proceso de molienda	26
Figura 3.3 Espectrómetro de absorción atómica	34
Figura 3.4 Mezcladora para pastas y morteros	40
Figura 3.5 Moldes empleados para la fabricación de probetas para ensayos de flexión y compresión	41
Figura 3.6 Ensayo de resistencia a la flexión	45
Figura 3.7 Comparador de longitud	47
Figura 3.8 Probetas expuestas a tratamiento alcalino	48
Figura 3.9 Piezas encapsuladas en resina antes de ser pulidas	49
Figura 3.10 Pulidora para metalografías	50

Capítulo 4 – Resultados y discusiones

Figura 4.1 Micrografía de escoria EAF a 2 horas de molienda húmeda	55
Figura 4.2 Difractograma de la escoria EAF	57
Figura 4.3 Escoria EAF con 15 horas de molienda seca	
a) Morfología escoria EAF	59
b) Partícula aislada de escoria EAF	59
Figura 4.4 Escoria EAF con 2 horas de molienda en húmedo	
a) Vista general de la escoria molida	60

b) Partículas de escoria	60
c) Partícula aislada de escoria	61
Figura 4.5 Muestra de escoria EAF analizada por TEM	
a) Partícula de escoria	62
b) Partículas aisladas de escoria	62
Figura 4.6 Anillos de difracción de la escoria EAF por TEM	63
Figura 4.7 Resistencia a compresión de morteros sin aditivo a diferentes edades	70
Figura 4.8 Resistencia a flexión de morteros sin aditivo a diferentes edades	71
Figura 4.9 Relación agua/cemento empleada en la fabricación de las tres series de mortero con diferentes porcentajes de escoria adicionada	73
Figura 4.10 Resistencia a compresión de morteros con aditivo 1 en diferentes edades	75
Figura 4.11 Resistencia a compresión de morteros con aditivo 2 en diferentes edades	76
Figura 4.12 Resistencia a flexión de morteros con aditivo 1 en diferentes edades	77
Figura 4.13 Resistencia a flexión de morteros con aditivo 2 en diferentes edades	77
Figura 4.14 Porcentajes de cambios de longitud en probetas de referencia y con 30% en peso de escoria EAF contra tiempo	80
Figura 4.15 Especímenes de referencia y con 30% de escoria EAF mostrando eflorescencias sobre la superficie	82
Figura 4.16 Mortero de referencia a 90 días	84
Figura 4.17 Mortero 10 % de escoria EAF y superplastificante 1 a 90 días	85
Figura 4.18 Mortero de referencia con 90 días de edad	87
Figura 4.19 Micrografía de un mortero con 30 % de escoria EAF con aditivo 2 y 90 días de edad	88
Figura 4.20 Gráficas de proporciones atómicas Si/Ca vs Al/Ca (A) y gel C-S-H vs S/Ca (B)	89
Figura 4.21 Mortero con 30 % de escoria EAF con aditivo 2 a una edad de 90 días en BSE (a) y SE (b)	
a) Micrografía en señal de electrones retrodispersados	91
b) Micrografía en señal de electrones secundarios	91
Figura 4.22 Mapeo de un mortero con 30 % de escoria EAF y 90 días de edad	92

Apéndice I

Figura A-I.1 Prueba de consistencia de un mortero fresco realizada sobre la mesa de sacudidas	98
---	----

Apéndice II

Figura A-II.1 Probetas prismáticas para ensayos a flexión	101
---	-----

Índice de tablas

Capítulo 1 – Introducción

Tabla 1.1 Características y aplicaciones de las escorias de acero	7
---	---

Capítulo 2 – Marco teórico

Tabla 2.1 Resumen cronológico de la normativa en materia de residuos	12
Tabla 2.2 Producción de acero en México (Comparativo semestral 2007 – 2013)	16
Tabla 2.3 Generación nacional estimada de escorias	18
Tabla 2.4 Clasificación de cementos según su composición	21
Tabla 2.5 Clasificación de cementos según sus características	21
Tabla 2.6 Características mecánicas de los cementos comunes	23

Capítulo 3 – Metodología

Tabla 3.1 Características del cemento 42.5R	36
Tabla 3.2 Porcentaje de las fases que comprenden el clínker	37
Tabla 3.3 Otras características del cemento	37
Tabla 3.4 Composición química de la arena normalizada	37
Tabla 3.5 Granulometría de la arena normalizada	38
Tabla 3.6 Propiedades del Aditivo 1	39
Tabla 3.7 Propiedades del Aditivo 2	39
Tabla 3.8 Listado de las mezclas de mortero	44

Capítulo 4 – Resultados y discusiones

Tabla 4.1 Composición química de la escoria EAF por FRX	53
Tabla 4.2 Composición química de la escoria EAF por EDS	53
Tabla 4.3 Composición química vía EDS de la escoria EAF	55
Tabla 4.4 Resultados de lixiviación de la escoria EAF	66
Tabla 4.5 EDS de los puntos señalados en la Figura 4.16	84
Tabla 4.6 EDS de los puntos señalados en la Figura 4.17	85

	Índices
Tabla 4.7 EDS correspondientes a los puntos identificados en la Figura 4.18	87
Tabla 4.8 EDS correspondientes a los puntos identificados en la Figura 4.19	89
Apéndice I	
Tabla A-I.1 Valores de escurrimiento de las series SA, 1A y 2A	97
Apéndice II	
Tabla A-II.1 Materiales pesados para el diseño de mezclas para la serie SA	99
Tabla A-II.2 Materiales pesados para el diseño de mezclas para la serie 1A	99
Tabla A-II.3 Materiales pesados para el diseño de mezclas para la serie 2A	100
Tabla A-II.4 Materiales pesados para el diseño de mezclas de probetas para prueba de reactividad	101
Apéndice III	
Tabla A-III.1 Valores promedio de la serie SA	102
Tabla A-III.2 Valores promedio de la serie 1A	102
Tabla A-III.3 Valores promedio de la serie 2A	103

Capítulo 1

Introducción

La generación de residuos se ha convertido en un importante problema de contaminación ambiental; puesto que la sociedad de hoy en día exige productos más complejos y diversos, lo que ocasiona un aumento en la generación de residuos de muy diferentes características. Como consecuencia, las industrias deben encargarse del correcto manejo de los residuos generados durante todo el proceso de fabricación, almacenamiento y transporte de sus productos, y al final, de su correcta disposición. Esto implica costos adicionales al sector industrial, sobretodo, cuando se trata de residuos generados en cantidades importantes, o bien cuando éstos son considerados peligrosos por su toxicidad al ambiente. Por lo anterior, en el presente proyecto de tesis se buscó la forma de incorporar un porcentaje de escoria de horno de arco eléctrico en un mortero de cemento portland. Para ello fue necesario el acondicionamiento mecánico de la escoria de horno de arco eléctrico (EAF), para disminuir y homogenizar su tamaño original, y se realizó también la caracterización del residuo para conocer su composición y su capacidad de lixiviar elementos tóxicos al ambiente. Para la fabricación de los morteros se disminuyeron porcentajes de cemento, mismos que eran reemplazados en masa, por escoria EAF; es decir, el residuo que no tiene propiedades cementantes era adicionado al mortero en cantidades que no

afectarán significativamente la estabilidad del mortero fresco ni su resistencia a la compresión y que no indujeran expansión.

1.1 Planteamiento del problema

Debido a la creciente acumulación de diversos residuos en los rellenos sanitarios y sitios de disposición, las nuevas políticas del país y las principales líneas de investigación están siendo direccionadas en dar un valor agregado a los desechos y subproductos industriales que, por lo regular son confinados, promoviendo así la reutilización o reciclaje de los residuos industriales. Esto sucede con subproductos como las diferentes escorias que se generan en cantidades importantes, por ejemplo en México, por cada tonelada de acero producido se pueden generar desde 100 y hasta 250 kg de escoria de horno de arco eléctrico (EAF); pero se acumulan en patios del generador o en sitios de disposición porque sus características son pobres lo que dificulta su inserción en otros procesos. Aunado a esto, se conoce que algunas escorias de este tipo tienen la capacidad de lixiviar metales pesados al ambiente, razón por la que su confinamiento implica costos más elevados.

Una alternativa para su reciclaje es adicionar esta escoria a un mortero de cemento portland. Por otro lado, la producción del cemento portland tiene muchas oportunidades de mejora en sus prácticas ambientales, por ejemplo en la extracción de materias primas o en la incorporación de desechos, los combustibles empleados, etc. que puedan disminuir en conjunto, el impacto ambiental de esta industria. Este es un aspecto que debe considerarse de fundamental importancia en un país como el nuestro, en donde la producción de cemento tiene relevancia económica.

1.2 Hipótesis

Los morteros con adiciones de escoria EAF mecánicamente acondicionada, desarrollan resistencias a la compresión adecuadas en comparación con los morteros ordinarios. Además, su uso en esta matriz cementante es seguro, porque no lixivia y no induce a la expansión del mortero fabricado.

1.3 Objetivo general

Determinar los porcentajes de adiciones de escoria EAF acondicionada mecánicamente para obtener morteros de cemento portland que desarrollen resistencias a la compresión similar a la resistencia generada por morteros ordinarios (sin adiciones de escoria), aportando de esta manera, una alternativa al reciclaje de este desecho siderúrgico y evitando que un porcentaje del mismo sea confinado. Además, evaluar la posible toxicidad ambiental del residuo adicionado. Y evaluar también, efectos expansivos de esta escoria incorporada en el mortero.

1.4 Objetivos específicos

Los objetivos específicos planteados en esta investigación son los siguientes:

1. Reducir mediante molienda mecánica, el tamaño de partícula de la escoria granulada con la finalidad de obtener un tamaño más homogéneo y menor que 45 micrómetros.
2. Analizar la composición de la escoria de horno de arco eléctrico (EAF) mediante técnicas de caracterización como: DRX, FRX, SEM EDS y TEM.
3. Evaluar la toxicidad ambiental de la escoria EAF a través de la prueba de extracto PECT según la norma oficial mexicana NOM-053-SEMARNAT-2003 para algunos metales pesados.

4. Establecer las relaciones agua/cemento necesarias para la fabricación morteros con adiciones de escoria en diferentes porcentajes: 5%, 10%, 20%, 30% y 60% en peso, respecto al cemento portland.
5. Determinar si existe una interacción entre la escoria y algunos aditivos en las mezclas de mortero para mejorar su resistencia a la compresión.
6. Analizar la resistencia a la compresión de las series de morteros en probetas prismáticas.
7. Determinar en los especímenes con 30% de escoria si este residuo es expansivo en el mortero.
8. Examinar la microestructura de algunos morteros para analizar los productos de reacción de la escoria.

1.5 Justificación

En la producción del cemento portland es necesaria la molienda de la materia prima y su posterior calcinación a 1500 °C, así como la molienda del clínker de cemento y yeso. En su totalidad, el proceso requiere aproximadamente de 4000 MJ/t de cemento producido. Por otro lado, se conoce que la energía necesaria para moler escoria de alto horno corresponde aproximadamente al 10% de la energía necesaria para producir cemento portland [1]. Por lo anterior, el proceso productivo del cemento se está volviendo insostenible ya que demanda el consumo de cantidades importantes de recursos naturales, altos consumos de energía eléctrica generando una gran cantidad de emisiones de efecto invernadero; por ello es necesario comprender el impacto ambiental que causa su producción. Por lo tanto, es una opción factible promover y utilizar subproductos o desechos industriales como una estrategia (y en conjunto con

otras alternativas) para disminuir, de manera general, las emisiones de CO₂ en las cementeras [2].

Además, el 4 de julio de 2006 fue publicado en el Diario Oficial de la Federación un aviso mediante el cual se dan a conocer las opciones de reciclaje para las escorias. En dicho documento la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Cámara Nacional de Acero (CANACERO) acordaron la reutilización de las escorias en diferentes rubros como: bases para la pavimentación de caminos, fabricación de gaviones, relleno o nivelación de terrenos, balastos de ferrocarril, lecho filtrante para tratamiento de aguas residuales, acondicionamiento de suelos sulfato ácidos, fabricación de cemento y agregados de concretos. Principalmente, por las dos razones anteriormente expuestas, en esta tesis se pretende incorporar escoria EAF en morteros de cemento portland.

1.6 Alcance

El alcance de este proyecto de tesis comprende las proporciones de escoria EAF adicionadas en los morteros y las edades a ensayar acordadas en los objetivos específicos de esta investigación. Del mismo modo, se reserva para los materiales y las condiciones de los ensayos descritos en el capítulo 3 del presente trabajo.

1.7 Antecedentes

Ha quedado de manifiesto que la cantidad de escorias generada es un problema ambiental importante por su generación continua, su creciente almacenamiento y por sus pobres características para ser reutilizada, optándose en la mayoría de los casos por la disposición final [3], razón por la cual se han realizado numerosas investigaciones sobre sus usos y aplicaciones, con la intención de reincorporarlas en un proceso productivo, como se mencionará en los apartados siguientes.

Por lo regular, las escorias a excepción de las de alto horno, contienen un buen porcentaje en peso de metales que pueden recuperarse siendo una fuente secundaria para la extracción o recuperación de metales, más que un residuo final. Además, algunas escorias contienen una importante cantidad de metales pesados dañinos para la salud humana y la liberación de éstos podría generar problemas a los ecosistemas [4].

De manera específica, Shi y col. [1] estudiaron los progresos y tendencias actuales en la activación de propiedades cementantes de diferentes escorias, de acuerdo con sus investigaciones realizadas concluyen que las escorias activadas con álcali como las de alto horno, las de acero en general, las de cobre y las de fósforo presentan mayores resistencias mecánicas a edades tempranas y tardías al ser comparadas con el cemento portland. Y que a su vez, también desarrollan mayor resistencia a la corrosión.

1.7.1 Escorias de acero

Las escorias de acero son el conjunto de escorias generadas en la producción de este material, se clasifican de maneras diversas de acuerdo al tipo de acero, al proceso de producción, al pretratamiento (en caso de haberlo), al pH, al color y al enfriamiento, entre otros. Por ejemplo, la CANACERO las clasifica según el horno de procedencia en: escorias de alto horno, escorias de convertidor básico al oxígeno, escorias de horno de arco eléctrico, escorias de horno de olla, y escorias de horno de arco sumergido.

Huang Yi y col. [5] realizaron un estudio que abarcó una extensa revisión bibliográfica sobre las diferentes formas en que se recicla la escoria de acero en distintos países. Además, reportaron que la escoria de acero es empleada en mayor proporción en materiales de construcción, producción de cemento y concreto, como adsorbente de metales pesados en plantas de tratamiento de aguas residuales, para la captura de CO₂ (dióxido de carbono) y también tiene algunas aplicaciones en la agricultura, como fertilizante. En su investigación

bibliográfica resumen algunas de las características de las escorias que analizaron contrastándolas con las aplicaciones comunes de las escorias en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Características y aplicaciones de las escorias de acero [5]

Características	Aplicaciones
Duras, resistentes al desgaste, adhesivas	Agregados para carreteras y obras hidráulicas
Porosas y alcalinas	Tratamiento de aguas residuales
Con óxidos de hierro o hierro	Recuperación de hierro
Con CaO, MgO, FeO, MnO	Agentes fundentes
Con compuestos cementantes (C ₃ S, C ₂ S y C ₄ AF)	Producción de cemento y concreto
Con CaO y MgO	Captura de CO ₂ y desulfuración de gases de combustión
Con FeO, CaO y SiO ₂	Materia prima para clinker de cemento
Con componentes fertilizantes (CaO, SiO ₂ , FeO, MgO)	Fertilizantes y remediación de suelos

1.7.2 Antecedentes sobre estudios de la escoria EAF

Como se ha mencionado, la tendencia mundial se enfoca hacia el reciclaje y la reutilización de residuos industriales, así por ejemplo, en Alemania se recicla alrededor del 70% de la escoria de arco eléctrico, de los cuales el 66% se reutiliza en el ramo de la ingeniería civil y el 4% en metalurgia [6]. Se considera que las escorias negras de horno de arco eléctrico presentan buenas cualidades, sin embargo se debe tener en cuenta su posible inestabilidad volumétrica, ya que suelen presentar cal libre, magnesia libre, sulfuros, óxidos altos en hierro y manganeso [7].

Qiang Wang y col. [8] reportaron que una buena proporción de silicatos y aluminatos contenidos en la escoria de acero sufren hidratación después de 90

días de reacción produciendo geles C-S-H y C-S-Al-H, así como Ca(OH)_2 . Sin embargo, las fases de los diferentes óxidos de la escoria (CaO-FeO-MnO-MgO) Fe_3O_4 y C_2F tienen muy poca participación en las reacciones de hidratación debido a su baja reactividad.

En otra investigación, Qiang Wang y col. [9] reportaron que el comportamiento de la velocidad de hidratación de los productos del cemento Portland difiere de la de los productos de la escoria de acero. Esto es porque en la matriz de cemento portland ordinario la reacción sucede a edades tempranas generando cantidades importantes de productos de hidratación; mientras que en la matriz de escoria la hidratación se desencadena de manera lenta y disminuye gradualmente. Reportaron también, la importancia del tamaño de partícula de escoria de acero ya que a tamaños pequeños (alrededor de $10 \mu\text{m}$) se mejoran las propiedades cementantes y con partículas grandes de esta escoria (alrededor de los $60\mu\text{m}$) se desempeña como agregado fino.

M.P. Luxan y col. [10] realizaron un estudio sobre la caracterización de dos escorias negras EAF encontrando que su composición química elemental fue de: Fe, Ca, Si, Mn, Al y Mg. En cuanto a su mineralogía, estas escorias presentaron compuestos como: silicatos de calcio anhidros, silicoaluminatos, Gehlenita, Larnita, Bredigita, Magnetita, Magnesioferrita y óxidos de manganeso. Los silicatos de calcio anhidros, en especial la Larnita, pudieran conferir un débil potencial de actividad hidráulica. En base a las composiciones químicas y mineralógicas de las escorias encontraron que es factible su uso en materiales de construcción puesto que el MgO , CaO libre, sulfuros y sulfatos están presentes en cantidades muy bajas por lo que no afectarían la estabilidad volumétrica.

1.7.3 Antecedentes sobre escoria EAF aplicada en asfalto

Tahir Sofilić [11] y Marco Pasetto [12, 13] trabajaron con la escoria de horno de arco eléctrico como agregado y su aplicación en asfalto obteniendo buenos resultados. Recientemente, Ameri y col. [14] elaboraron mezclas de asfalto en las

que sustituían a la caliza como agregado natural, por escoria de horno de arco eléctrico con la finalidad de emplear menos recursos naturales. Obteniendo que, cuando utilizaban la escoria para mezclas calientes de asfalto éstas presentaban mayor resistencia al daño por humedad, así como mejores propiedades adhesivas y coercitivas.

1.7.4 Antecedentes sobre escoria EAF como clínker

Tsaikiridis y col. [15] emplearon 10.5% de una escoria de horno de arco eléctrico para la fabricación de clínker para cemento Portland. Dicha escoria presentaba una importante concentración de óxidos de hierro y óxido de calcio de 26.36 % y 35.7 % respectivamente. Mediante difracción de rayos X y microscopía óptica concluyeron que con la inclusión de esta composición de escoria de horno de arco eléctrico no se vieron afectadas las características mineralógicas ni la calidad del clínker producido.

1.7.5 Antecedentes sobre escoria EAF como agregado para concretos

Han Young Moon y col. [16] realizaron experimentos empleando escorias de horno de arco eléctrico y de convertidor como agregados en concretos. Además, utilizaron diferentes métodos de curado para determinar la expansión y resistencia de los concretos a la compresión, observando un mejor comportamiento en el concreto con escoria de arco eléctrico que en el concreto con escoria de convertidor.

Manso y col. [17] reportaron que al utilizar escoria de horno de arco eléctrico como agregado en concreto se pueden obtener resistencias similares y con menor durabilidad a las del concreto convencional.

Pellegrino y col. [18] utilizaron una escoria de arco eléctrico reportando que es factible reemplazar agregados naturales tradicionales por este tipo de escorias en altos porcentajes de sustitución y de tamaño promedio entre 2-4 mm.

Chunlin y col. [19] utilizaron adiciones de hasta un 40% de escoria de arco eléctrico como agregado fino (0 – 5mm) y grueso (5 – 25mm). La composición química de la escoria utilizada fue de un 34.09 % de CaO, 28.92 % de SiO₂ y 18% de óxidos de hierro. Los autores reportaron comparativos de evaluaciones de propiedades como resistencia a la compresión y flexión, así como deformación en volumen utilizando escoria y un concreto ordinario con caliza como agregado grueso y arena con agregado fino. Los resultados muestran que los concretos con escoria EAF como agregado presentaron mayor resistencia a la compresión y menor resistencia a la flexión al comparar estas mismas propiedades contra el concreto ordinario. La deformación de los concretos con escoria fue menor que la de los concretos convencionales antes de ser sumergidos en agua y se presentó expansión después de estar en agua por 90 días.

Samir I. y col. [20] utilizaron este tipo de escoria EAF de la región del Golfo de Arabia por su alta trabajabilidad en el concreto bombeado y alta resistencia a la compresión. Cabe señalar que con adiciones de ceniza volante y humo de sílice se mejoran las propiedades de durabilidad en el concreto con este tipo de escoria.

Con la idea de generar un concreto empleando las mayores cantidades posibles de algunos residuos industriales Anastasiou y col. [21] usaron la escoria EAF como agregado grueso, ceniza volante de alto contenido de calcio como remplazo parcial del cemento y residuos de construcción y demolición como agregado fino. De sus experimentos de laboratorio concluyen que la escoria EAF como agregado grueso mejora la pérdida de resistencia a la compresión ocasionada por los residuos de demolición como agregado fino, puesto que proporciona buenas uniones agregado-ligante. Aunque es notoria la pérdida de resistencia y durabilidad de los concretos preparados con estos subproductos, logran la fabricación de uno en particular que cumple con el desarrollo de 30 MPa de resistencia a la compresión a los 28 días y durabilidad necesaria para aplicaciones menores, que se fijaron como objetivo de su investigación.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Percepción de los residuos en la sociedad

Las actividades de la vida diaria nos conducen a la generación de muy variados residuos, que por lo general, no son valorados y son considerados como basura. Lo anterior, impide que estos residuos o basura sean reciclados o reutilizados como recursos para la producción industrial o en la generación de energía [22].

En México, al igual que en otros países, el proceso de industrialización que se intensificó a partir de la segunda mitad del siglo pasado derivó en una mayor demanda de materias primas para satisfacer el creciente consumo de bienes y servicios de una población cada vez más numerosa, con patrones de consumo demandantes y con poca motivación para cambiar su estilo de vida al respecto. Lo anterior trajo como consecuencia que se agravaran los problemas ambientales como la contaminación del aire y la generación de residuos tanto

urbanos como industriales. La creciente generación, la disposición inadecuada de los residuos así como la poca inversión en alternativas para los desechos traen como consecuencia la afectación e impacto directo o indirecto en la salud de la población y de los ecosistemas naturales [23].

Sin embargo, los industriales también requieren apoyo en el manejo integral de los residuos y que los costos de las prácticas ambientales correctas no sean tan elevados, en el mismo orden, también es importante desarrollar normativas claras que faciliten el reciclaje de los residuos.

2.2 Cronología de las primeras legislaciones ambientales en el mundo

En los últimos años se ha intentado cambiar la legislación ambiental mundial a través de diferentes medidas. En la Tabla 2.1 se muestran aspectos importantes relativos a la regulación ambiental en materia de residuos.

Tabla 2.1 Resumen cronológico de la normativa en materia de residuos [22].

Año	Suceso
1965	EUA crea la primera ley federal para el manejo de residuos, con el Acta de Disposición de Residuos Sólidos (SWDA por sus siglas en inglés).
1970	Estados Unidos crea la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) con la jurisdicción de elaborar las regulaciones federales para el control de la contaminación del aire y agua, radiación, pesticidas, recursos ecológicos y disposición de residuos sólidos.
1971	Comienza la regulación ambiental mexicana con la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación [24].
1972	Declaración de Estocolmo, plantea diversas líneas de acción para contrarrestar el daño causado al ambiente y define parte de problemática de los residuos [25].
1989	México se une al compromiso de cumplir con el Convenio de Basilea (control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación) [26].
2003	En México se publica la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos [27].

2.3 Legislación ambiental en México

La gestión de residuos en México se rige con base a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos [27]. En dicha ley se define como residuo: *“Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en esta Ley y demás ordenamientos que de ella deriven”*. Así mismo, en dicha Ley se distinguen las siguientes clases de residuos [28]:

2.3.1 Residuos sólidos urbanos

Son los residuos generados en las casas habitación que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole. Dentro de este grupo los más comunes son: residuos de comida, jardines y materiales orgánicos similares, papel, cartón y derivados de papel, plásticos, vidrios, aluminio, metales ferrosos y no ferrosos, entre otros.

2.3.2 Residuos de manejo especial

Son los residuos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos. Por ser estos los de más reciente clasificación han causado un poco de confusión al momento de ser reportados por las empresas en las cédulas de

operación anual y este es un problema grave que conlleva a que las estadísticas oficiales tengan cierto margen de error, pero en general, puede decirse que dentro de este grupo se incluyen: residuos de las rocas o productos de su descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción o se destinen para este fin; residuos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, y los residuos de los insumos utilizados; residuos de los servicios de transporte, generados a consecuencia de las actividades que se realizan en puertos, aeropuertos, terminales ferroviarias, portuarias y las aduanas; lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales; residuos de tiendas departamentales, centros comerciales generados en grandes volúmenes; residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general; residuos tecnológicos provenientes de las industrias de la informática, fabricantes de productos electrónicos o de vehículos automotores y otros que al transcurrir su vida útil, por sus características, requieren de un manejo específico.

2.3.3 Residuos peligrosos

Son los residuos que poseen alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en esta Ley. Entre este grupo de residuos destacan: residuos de mantenimiento automotriz, aceites gastados, telas impregnadas, metales pesados, asbestos, pieles, lodos, residuos biológico infecciosos, solventes, breas, sustancias corrosivas y escorias. Para las autoridades es de mayor eficiencia identificar los tipos de industria que generan dichos residuos y en este rubro son las industrias química, metalúrgica y automotriz, las mayores generadoras de residuos peligrosos.

2.4 Manejo integral de los residuos

El manejo integral debe ser visto como el proceso que abarca desde que el generador produce los residuos hasta su disposición final, el cual pudiese ser el reciclaje, la reutilización, incineración controlada o confinamiento. En medio de este proceso se considera también el transporte, almacenamiento temporal o acopio de los desechos, y en algunos casos, tratamiento para reducir su peligrosidad.

La disposición final más practicada en México es el confinamiento permanente. En el país se cuenta con dos tipos de sitios para estos fines: los rellenos sanitarios y los rellenos de tierra controlados. Los rellenos sanitarios constituyen la mejor solución para la disposición final de los residuos sólidos urbanos; en su infraestructura involucra obras de ingeniería que controlan la fuga de lixiviados y generación de biogases. Por su parte, los rellenos de tierra controlados, aunque comparten las especificaciones de los rellenos sanitarios en cuanto a infraestructura y operación, no cumplen con las especificaciones de impermeabilización para el control de los lixiviados. La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. De acuerdo a ella, los rellenos sanitarios deben: a) garantizar la extracción, captación, conducción y control de los biogases generados; b) garantizar la captación y extracción de los lixiviados; c) contar con drenajes pluviales para el desvío de escurrimientos y el desalojo del agua de lluvia; y d) controlar la dispersión de materiales ligeros, así como la fauna nociva y la infiltración pluvial [29].

Por lo tanto, es un gran riesgo que residuos peligrosos terminen en un relleno no controlado o inadecuado. Sin embargo, al día de hoy los costes de transporte,

almacenamiento, acopio y disposición de los residuos peligrosos siempre son mayores comparados con los de los residuos sólidos urbanos o de manejo especial, lo que conlleva a la existencia de negocios informales y tiraderos clandestinos.

2.5 Industria del acero

La industria siderúrgica transforma los recursos naturales o minerales de hierro para convertirlos en acero, un material que hoy en día, es insustituible. El acero es una forma de hierro ampliamente utilizada; puede ser de una simple composición química o bien, una compleja aleación de numerosos elementos que influyen sobre las características y propiedades del producto final. De acuerdo a la World Steel Association, la producción mundial de acero en el periodo de enero a septiembre de 2013 es de 1185.62 millones de toneladas, lo que significó un aumento del 2.7% respecto al año anterior.

En la Tabla 2.2 se presenta un análisis retrospectivo de la producción de acero en México y en donde se puede observar una producción constante durante el periodo 2010 – 2011. Sin embargo, en el año 2012 y mitad del 2013 se muestra una ligera reducción de dicha producción [30].

Tabla 2.2 Producción de acero en México (Comparativo 2007-2013) [8].

Año	Semestre	Millones de toneladas	Año	Semestre	Millones de toneladas
2007	1	8.61		2	8.39
	2	8.96	2011	1	9.07
2008	1	9.57		2	9.04
	2	7.64	2012	1	8.92
2009	1	6.63		2	9.17
	2	7.5	2013	1	8.82
2010	1	8.48			

Es importante fijar nuestra atención sobre el desempeño ambiental de la industria siderúrgica en México. Por ejemplo, durante la última década, ha sido el giro industrial que más energía eléctrica ha consumido, tal como lo indica la Figura 2.1. Estas industrias coinciden en ser las que mayor impacto ambiental generan en el país.

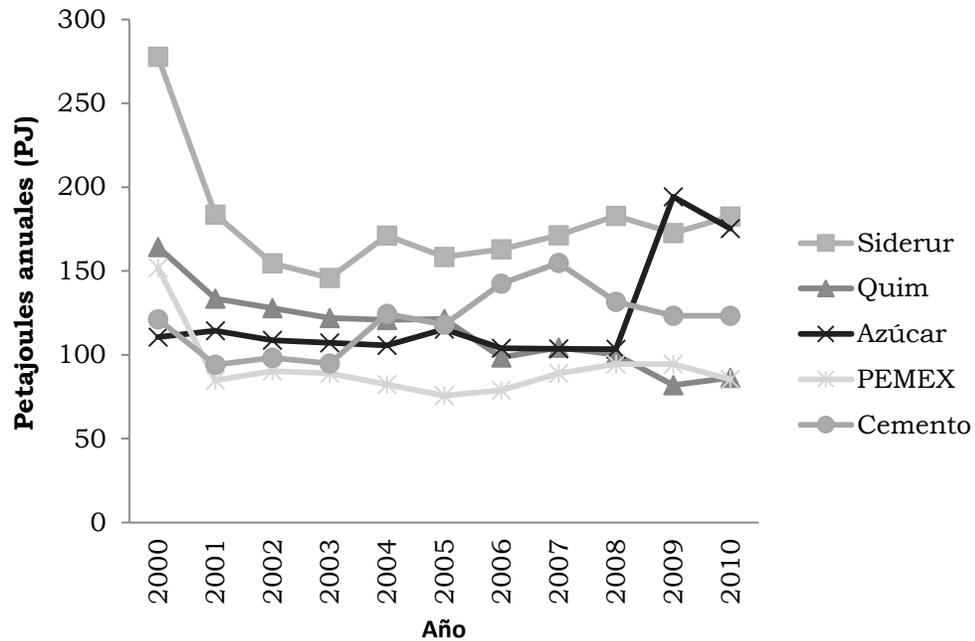


Figura 2.1 Industrias mexicanas que más energía consumieron del 2000 – 2010 [31].

Por otra parte, la industria siderúrgica afecta al agua con descargas ácidas y amoniacales; al aire con polvos, gases y humos provenientes del carbón y gas natural en procesos de combustión ineficientes [32]. Otra preocupación constante de las entidades reguladoras es que las diferentes acereras no reportan de manera homóloga sus residuos, ya sea porque la denominación de sus subproductos es propia de cada empresa y en muchas ocasiones no coinciden con los nombres enlistados en los catálogos oficiales, o bien, porque los procesos son muy específicos así como las características de los residuos generados. Estas situaciones desencadenan en que las bases de datos de las

cuales se generan las estadísticas, y por consecuencia, los diferentes planes de manejo para estos sectores no sean del todo adecuados.

Entre los residuos más reportados por estas industrias se encuentran los polvos (tierras de recuperación), lodos con contenido de metales, materiales gastados en la producción (crisoles, refractarios como ladrillo y piedra caliza) y escorias [33].

2.6 Generación de escorias en México

Las principales problemática a las que se enfrentan estos residuos es su disposición final incorrecta, el alto costo que implica el confinamiento en sitios regularizados y su falta de aprovechamiento o reutilización para otros fines. En la Tabla 2.3 se presenta la generación nacional de escoria en la última década, basada en los reportes de los generadores de escorias. Sin embargo, es importante destacar que estos reportes son reflejo de la información entregada en la cédula de operación anual (COA) federal y aunque ésta sea un requisito legal para toda empresa o establecimiento que genere residuos, la manera de clasificar en ella algunos residuos como las escorias es bastante ambigua. Además, no todas las escorias se consideran residuos peligrosos (o se desconoce que lo sean), por esta razón algunas empresas las reportan en las cédulas de operación estatales, por ello únicamente se consideran como estimaciones.

Tabla 2.3 Generación nacional estimada de escorias [32].

Tipo de escoria	Período	Toneladas
Finas	2004 - 2011	9,042.83
	2004 - 2009	6,469.20
Granulares	2004 - 2011	19,043.31
	2004 - 2009	16,747.75

2.7 Horno de arco eléctrico

La fabricación del acero en horno de arco eléctrico inicia con la fusión de la chatarra de acero por medio de una corriente o arco eléctrico y su posterior refinamiento en estado líquido. Es importante señalar que en la etapa de refinamiento es en donde se genera la escoria de acería al momento de escorificar o limpiar la superficie del metal líquido.

El horno de arco eléctrico consta de un crisol de forma cilíndrica el cual se encuentra revestido de material refractario y en su interior alberga el baño de acero líquido y escoria de horno de arco eléctrico, en lo sucesivo, a ésta última le nombraremos escoria EAF. El resto del horno está formado por paneles refrigerados por agua. La bóveda es desplazable para permitir la carga de la chatarra a través de unas cestas térmicas adecuadas. La bóveda está dotada de una serie de orificios por los que se introducen los electrodos, generalmente tres, que son gruesas barras de grafito de hasta 700 mm de diámetro. Los electrodos se desplazan de forma que se puede sincronizar su distancia con respecto a la carga a medida que se van consumiendo. Los electrodos están conectados a un transformador que proporciona unas condiciones de voltaje e intensidad adecuadas para generar el arco, con intensidad variable, en función de la fase de operación del horno. Otro orificio localizado en la bóveda permite la captación de los gases de combustión, que son depurados convenientemente para evitar contaminar la atmósfera. El horno va montado sobre una estructura oscilante que le permite bascular para proceder a la colada del metal líquido y escoria.

Por lo general, en los hornos de arco eléctrico se funde chatarra de acero que proviene de astilleros, desguace de buques, maquinaria, calderería pesada y ferrocarriles. También se procuran aceros al carbón o de muy baja aleación para acortar la duración oxidante de las coladas y evitar problemas en la laminación. Es muy recomendable que las chatarras estén limpias y libres de óxido, suciedad, pinturas, aceites, etc. [34]. En la Figura 1.2 se muestra el esquema simplificado de un horno de arco eléctrico ordinario.

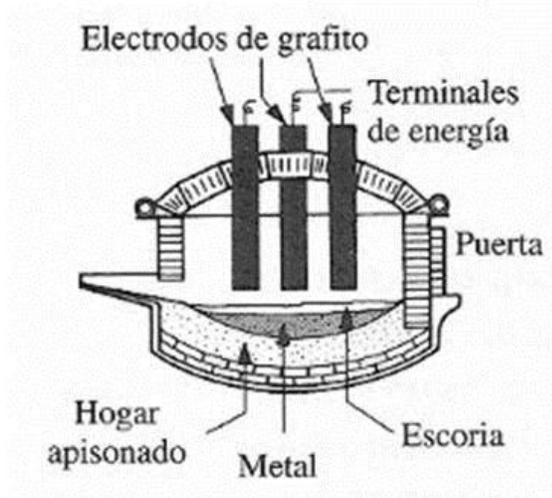


Figura 2.2 Esquema de un horno de arco eléctrico.

2.8 Cemento portland

El cemento portland es un cemento hidráulico por su capacidad de fraguar y endurecerse al reaccionar con el agua. Es producido por la pulverización del clínker y consiste, esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos, regularmente contiene agua, sulfato de calcio, más de 5% de caliza, entre otros productos [35] y en la actualidad prácticamente es imprescindible en la industria de la construcción.

Desgraciadamente, para su fabricación se liberan 0.498 toneladas de CO₂ por cada tonelada de cemento producido. Las cementeras emiten alrededor del 7% del CO₂ global. Aunado a ello, su producción genera otros problemas ambientales como la liberación de polvos y partículas menores, gases, presencia en el ecosistema de metales pesados, ruido y vibraciones [36]. Por lo tanto, las tendencias mundiales se encaminan en reducir la utilización de combustibles fósiles en los hornos empleando materiales diversos y en nuestro país esto es regulado por la NOM-040-SEMARNAT-2002 [37]. De igual manera, las nuevas

tendencias han optado también por reciclar subproductos como materias primas, como se observó en el capítulo anterior.

2.8.1 Cementos en México

En nuestro país, la clasificación de los tipos de cemento se encuentra regulada por la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004 [38], donde se dividen de acuerdo a su composición como es marcado en la Tabla 2.4 o de acuerdo a sus características especiales como en la Tabla 2.5.

Tabla 2.4 Clasificación de cementos según su composición.

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
TPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto horno

Tabla 2.5 Clasificación de cementos según características especiales.

Nomenclatura	Características especiales
RS	Resistente a sulfatos
BRA	Baja reactividad álcali - agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

Sin embargo, para cuestiones prácticas es conveniente dividirlos también según las resistencias mecánicas que son capaces de desarrollar. La resistencia normal de un cemento es la resistencia mínima mecánica a la compresión a los 28 días y se indica como 20, 30 ó 40 en Newtons por milímetro cuadrado (N/mm²). Entonces de acuerdo a esto, se clasifican en 20, 30 y 40 MPa, pero

existen otras dos clases 30R y 40R con las mismas características de resistencias que los ya mencionados, con la única diferencia que a edad temprana (3 días) presentan resistencias de 20 y 30 MPa, respectivamente.

2.8.2 Cementos en España

La instrucción para la Recepción de Cementos (RC-97) [39] establece los siguientes tipos de cemento: a) CEM, cementos comunes constituidos fundamentalmente, de clinker de cemento portland y una cantidad pequeña de yeso; b) BL, cementos comunes con una determinada composición e índice de blancura específicos; c) ESP, cementos para usos especiales, en ellos el uso de clinker de cemento portland ocupa un lugar secundario frente a las adiciones de escoria, puzolanas o cenizas volante; d) CAC/R, cementos con alto contenido de aluminato de calcio; e) cementos con características adicionales, estos últimos, presentan características como resistencia a sulfatos y/o agua de mar (y se identifican como SR y/o MR) o pueden tener la propiedad de desarrollar bajo calor de hidratación (BC).

Los cementos comunes CEM se subdividen, a su vez, en tipos de la siguiente forma: a) CEM I, cemento portland; b) CEM II, cemento portland con adiciones (para designar las diferentes adiciones permitidas se agregan letras a la denominación); c) CEM III, cemento portland con escorias de horno alto; d) CEM IV, cemento puzolánico; e) CEM V, cemento compuesto.

En cuanto a las características mecánicas que deben cumplir los cementos comunes o cementos portland CEM, éstas se designan según la Tabla 2.6, donde se debe considerar que 1 N/mm^2 es equivalente a 1 MPa y que la R de la nomenclatura hace referencia a que esas clases tienen la capacidad de desarrollar alta resistencia inicial, según la norma española UNE-EN 197-1:2000 [40].

Tabla 2.6 Características mecánicas de los cementos comunes.

Clase resistente	Resistencia a compresión (N/mm ²)			
	Resistencia inicial		Resistencia normal	
	2 días	7 días	28 días	
32,5	---	≥ 16,5	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 13,5	---		
42,5	≥ 13,5	---	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20,0	---		
52,5	≥ 20,0	---	≥ 52,5	---
52,5 R	≥ 30,0	---		

Capítulo 3

Metodología

Este capítulo tiene la finalidad de explicar la fase experimental del presente proyecto. Se comienza con una etapa exploratoria, la cual incluye el acondicionamiento mecánico de la escoria EAF, a partir de dos procesos de molienda. Posteriormente, se presenta la descripción de las técnicas, métodos y equipos utilizados en la caracterización de la materia prima; que comprende la determinación del tamaño de partículas, la fluorescencia de rayos X, la difracción de rayos X, la observación de partículas de escoria por microscopía electrónica de barrido y de transmisión. Como última fracción de la etapa exploratoria se describe la realización de la prueba del extracto PECT en la escoria EAF, para determinar la toxicidad al medio ambiente.

En el presente capítulo también se describen los ensayos que se realizaron a los morteros. Abarcando desde el proceso de fabricación de los diferentes series de morteros; la prueba de consistencia en los morteros frescos; las pruebas de resistencia a la compresión; la determinación de la reactividad álcali-sílice para

conocer si la escoria presenta comportamiento expansivo en el mortero; y, por último, el estudio de la microestructura de algunas probetas elaboradas.

En la Figura 3.1 se muestra un diagrama de trabajo que resume la fase experimental de esta tesis.

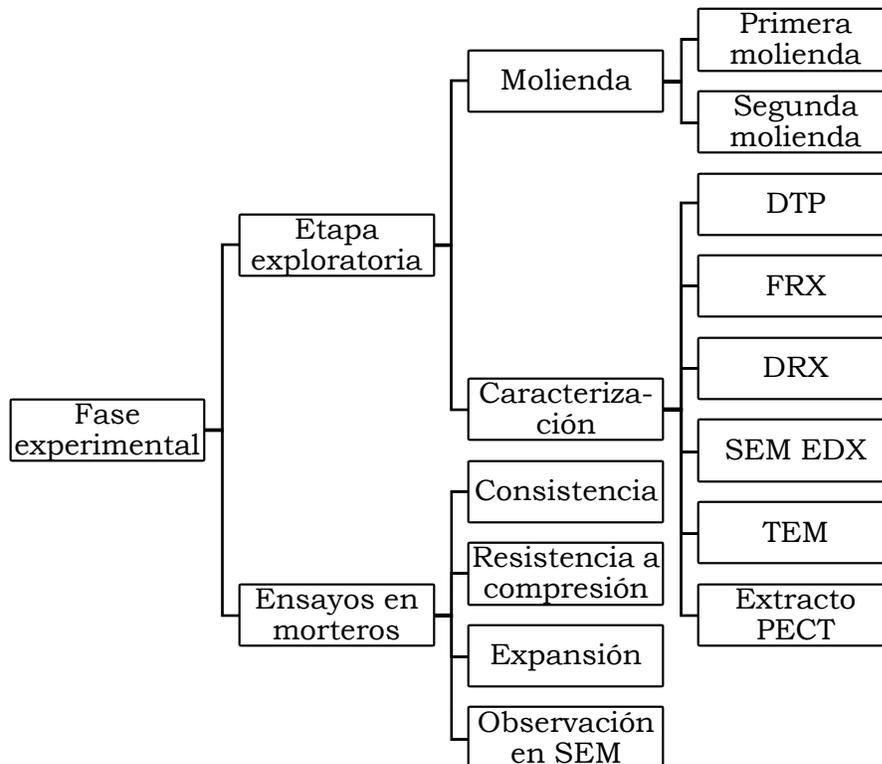


Figura 3.1 Diagrama de trabajo experimental.

3.1 Caracterización de la escoria EAF

Es importante realizar la caracterización de cualquier subproducto; como en este caso, la escoria de horno de arco eléctrico, antes de su utilización como materia prima y de evaluar su incorporación en cualquier matriz. También debe tomarse en cuenta que las escorias pueden presentar diferentes propiedades físicas (porosidad, dureza, etc.), composición química y morfología que dependen, a su vez de factores como su origen, enfriamiento y almacenamiento.

Debido a que en sus condiciones originales la escoria presentaba muy diversos tamaños aproximadamente desde 13 mm y hasta 5mm, se decidió realizar la molienda mecánica de la escoria antes de ser incorporada a la matriz del mortero en donde la cantidad añadida de escoria EAF será igual a la masa del cemento que se restará del mortero, con la finalidad de asegurar un tamaño de partícula homogéneo menor que las 45 μm similar a la del cemento.

3.1.2 Molienda mecánica

Previo a la caracterización química y microestructural de la materia prima fue importante llevar a cabo una primera molienda mecánica de la escoria en un molino de bolas de tipo planetario, modelo Pulverisette 6 de la marca Fritsch® como el que se muestra en la Figura 3.2. Se utilizaron tazones de acero con capacidad de 500 gramos y la relación material:medio de molienda fue de 5:1. Las condiciones de molienda fueron de 15 h de molienda, a 350 revoluciones por minuto (RPM) y con paros programados de 30 minutos en intervalos de 2.5 h, con la finalidad de dar protección al molino.



Figura 3.2 Molino planetario usado en el primer proceso de molienda.

Para la fabricación de los morteros fue necesaria una mayor cantidad de escoria molida, por lo que se optó por continuar las moliendas en un molino

rápido de tipo planetario de Ceramic Instruments® (segunda molienda). Se utilizaron tazones de alúmina con capacidad de 1000 g. Las cargas o batches consistieron en 500 g de escoria, 250 g de agua y 250 g de bolas, a tiempos de molienda de 2 h. Una vez terminadas las moliendas se retiraba el agua y la escoria molida se ponía a secar en una estufa durante 12 h. Por último la escoria seca se cribaba por medio de una malla #325 (45 μm) de la marca comercial Tyler, se trabajó con el material que pasaba la malla.

3.1.3 Distribución de tamaño de partículas (DTP)

Una vez terminada la etapa de molienda y para conocer el tamaño promedio de partículas obtenido, se analizaron muestras de escoria en un equipo marca Microtrac® modelo S3500 con capacidad de medición desde 0.02 micras hasta 2.8 mm. Las mediciones se realizaron por vía húmeda, utilizando alcohol isopropílico como medio de dispersión. Con la finalidad de tener una mejor dispersión de las partículas de escoria, se hicieron tratamientos de 15 min en baño ultrasónico en una solución con alcohol isopropílico y dos gotas del agente dispersante Tritton X-100®.

3.1.4 Fluorescencia de rayos X (FRX)

Se realizó análisis un de fluorescencia de rayos X, con el objetivo de conocer la composición química de la escoria de horno de arco eléctrico. La absorción de rayos X produce iones excitados electrónicamente que vuelven a su estado fundamental mediante transiciones que involucran a los electrones de los niveles de mayor energía. En este proceso hay un desprendimiento de energía igual a la diferencia de energía de los niveles entre los que se produce el salto electrónico, en forma de radiación electromagnética correspondiente a la región de rayos X. Debido a que las energías de los distintos niveles electrónicos son características para cada tipo de átomos, la radiación X emitida será característica para cada elemento [42].

Para realizar el análisis por esta técnica de FRX fue necesario hacer una pastilla de la mezcla de 10 g de escoria molida con pastillas de cera. Preparada la pastilla de la escoria, ésta fue analizada en un equipo de la marca Bruker modelo S4 Pioneer®, con un voltaje de excitación de 4 kW. El equipo de FRX tiene como fuente un tubo rayos X con ánodo de Rh, y realiza un barrido que cubre un total de 71 elementos (del Na al U) con un total de 588 líneas en condiciones de vacío. La interpretación de los datos se hizo mediante el software Spectra Plus.

3.1.5 Difracción de rayos X (DRX)

Los rayos X son una forma de radiación electromagnética y de alta energía con una longitud de onda del orden atómico en materiales sólidos. Cuando un haz de rayos X incide sobre un material sólido, una parte es difractada en muchas direcciones diferentes por los electrones asociados en cada átomo del material, generando señales que se interpretan en un equipo a diferentes intensidades y diferentes valores del ángulo 2θ de Bragg, útil para la identificación de las fases cristalinas [41].

Con la finalidad de conocer las fases presentes en la escoria de horno de arco eléctrico, se hizo un análisis de difracción de rayos X. Sin embargo, la determinación de fases se vuelve compleja, principalmente por el ruido que genera la gran cantidad de hierro en la escoria y que al ser un residuo, su composición no es pura.

El análisis de DRX se realizó por duplicado; es decir, la primera muestra de escoria se procesó en un equipo X'Pert Pro® bajo las siguientes condiciones: voltaje de excitación de 40 kv y una intensidad de corriente de 40 mA, con un tiempo de barrido de 0.03 ($^{\circ}2\theta$ /segundo) en un ángulo inicial (2θ) de 5° y final de 100° . La temperatura para el análisis se fijó en 25°C . La segunda muestra fue analizada en un difractómetro D8 Advance de la marca Bruker® con un detector Vantec a las mismas condiciones de voltaje de excitación e intensidad de corriente que la primera muestra. Con un tiempo de barrido de 0.5 03

($^{\circ}2\theta$ /segundo), en ángulo inicial (2θ) de 10° y final de 100° . El límite de detección de la técnica por DRX es de 5% e.p. La interpretación del difractograma fue indexada con la ayuda de la base de datos de la ICDD.

3.1.6 Microscopio electrónico de barrido

El microscopio electrónico de barrido es básicamente una fuente de electrones que son enfocados por dos lentes condensadores hacia la muestra que se encuentra en vacío. Los electrones penetran la superficie y éstos interactúan con los átomos de la muestra, resultando la emisión de electrones o fotones de la superficie, o dicho en otras palabras, resultando en la generación de varias formas de radiación detectadas por varias ventanas. La cual es recibida en un detector móvil y que puede recorrer la muestra, y posteriormente, se transforma en imagen.

Los electrones secundarios y retrodispersados son los más importantes para la formación de la imagen. Los electrones que se utilizan para la formación de la imagen provienen de regiones cercanas a la superficie como son los electrones secundarios (SE, por sus siglas en inglés). Por el contrario, los electrones que se utilizan para llevar a cabo el análisis químico provienen de una zona más lejana a la superficie como son los electrones retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés) [43].

3.1.6.1 Preparación de muestras para microscopio electrónico de barrido

La preparación de las muestras para su análisis microestructural fue realizado mediante la forma tradicional, de acuerdo con la norma ASTM E3-80 [44]. Las muestras de escoria EAF fueron montadas en una resina epóxica de la marca comercial Struers®, bajo las siguientes condiciones: razón en la preparación resina:catalizador 15:2 (15 ml de resina y 2 ml del endurecedor) y una vez inmersas las muestras en los moldes con la mezcla, eran sometidas a

vacío en un desecador para esta función; las muestras permanecían así hasta que no se observaran burbujas de aire ascendiendo a la superficie del molde.

Luego de terminar la etapa de montaje, las muestras fueron desbastadas usando abrasivos de papel de carburo de silicio SiC de los números 280, 340, 360, 400, 600, 1200 y 2400 en una desbastadora de platos UNI POL-830, MTI Corporation®. Es importante mencionar que, entre cada cambio de lija, las muestras eran lavadas con acetona y puestas en un dispositivo de ultrasonido para eliminar partículas sobre la superficie que pudieran interferir las siguientes etapas del pulido. La etapa de pulido fino fue realizada sobre un paño del tipo Microcloth de Struers®, finalmente se pulieron con pasta de diamante de 3 micras. Por la naturaleza de las muestras, durante la etapa de desbaste y pulido se utilizó acetona como lubricante.

Además, se hizo una preparación para el análisis de la muestra de escoria EAF en polvo y para obtener una mejor dispersión de la muestra se colocó una fracción de la misma en un tubo de ensayo con 5 ml de propilenglicol, el cual fue sometido a un baño de ultrasonido por 15 min. Después, con la punta de una pipeta Pasteur, se tomó un poco de esta suspensión y se colocó sobre una cinta de carbono. Una vez seca la cinta, fue colocada en un portaobjetos para su análisis.

Ambas muestras, el trozo de escoria montada en resina y la escoria en polvo dispersada fueron recubiertas con oro por 120 y 60 segundos, respectivamente. Las muestras fueron analizadas en un microscopio electrónico de barrido JSM-6490LV de JEOL® con un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X (EDX) INCA de Oxford Instruments®.

3.1.7 Microscopio electrónico de transmisión

El microscopio electrónico de transmisión, TEM, por sus siglas en inglés, emplea una técnica cuyo principio está basado en la información generada por la longitud de onda del haz de electrones que incide sobre una muestra sólida,

a voltajes de aceleración altos. La distribución de la densidad electrónica en la muestra conduce a la formación de imágenes de interferencia de la radiación transmitida, las cuales revelan características de morfología y estructura [45]. En la presente tesis esta técnica fue empleada con la finalidad de obtener información sobre la forma y el tamaño de las partículas de escoria y, en específico, después del proceso de molienda.

3.1.7.1 Preparación de muestras para TEM

Uno de los requisitos para el análisis por microscopía electrónica de transmisión es que la muestra sea muy pequeña y esté muy bien dispersada. Para analizar la muestra en el TEM fue necesario hacer una suspensión de 10.5 mg de escoria molida en 1 ml de agua desionizada. La adición de escoria hace cambiar la coloración del agua a un café oscuro. Por último, se dio un tiempo de decantación de 8 minutos a la suspensión, para que precipitara la mayor parte del material en el fondo del vial, dejando las partículas más pequeñas flotando en la parte superior. De esta última parte fue tomada una alícuota de 0.2 ml, y fue depositada sobre una rejilla de cobre para su análisis. El equipo utilizado fue un microscopio electrónico de transmisión de emisión de campo JEOL® 2010F con una resolución de 1.9 angstroms (Å). Además, el equipo cuenta con contraste de difracción en campo oscuro y brillante (Brigth Field, BF y Dark Field, DF. por sus siglas en inglés), difracción de electrones y difracción de haz de electrones convergente. El filamento utilizado fue de LaB₆ a un voltaje de aceleración de 200 kV [46].

3.1.7.2 Comparación entre las técnicas de SEM y TEM

Es importante mencionar que ambas técnicas de microscopía son ampliamente utilizadas en la investigación y a nivel industrial, en procesos de manufactura y control de calidad. Sin embargo, tienen algunas diferencias en su principio y funcionamiento. La resolución del TEM puede alcanzar hasta 0.5

nm y magnificaciones de 500,000X muy por encima de la resolución del SEM que es de 3 nm y hasta 300,000X.

3.1.8 Análisis del extracto PECT

La prueba del extracto PECT de la escoria EAF se hizo tomando como base la Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-2003 [47]. Esta norma es obligatoria y aplica en la generación y manejo de residuos peligrosos, para determinar, con base legal, las características de peligrosidad CRIT (corrosividad, reactividad, inflamabilidad y toxicidad).

3.1.8.1 Determinación de pH y del reactivo a utilizar en la prueba del extracto PECT

A continuación se describe el procedimiento necesario para determinar la toxicidad de un residuo, a través de su extracto PECT (prueba de extracción) de acuerdo a la NOM-053-SEMARNAT-2003 [47].

Para la determinación del pH original, se pesaron 5 g de escoria obtenida del primer proceso de molienda y fueron disueltos en 96.5 ml de agua destilada. Posteriormente, esta suspensión fue colocada sobre una plancha en agitación, por medio de un agitador magnético durante 3 min. Previo a la medición del pH, se hizo la curva de calibración del potenciómetro por medio de 3 estándares o buffers de pH conocidos. En esta primera medición, el pH obtenido fue de 11.82.

Posteriormente, se agregaron 3.5 ml de ácido clorhídrico HCl 1N a la solución y se le aplicó un tratamiento térmico por 10 minutos en un baño previamente a 50 °C. Una vez que la muestra fue retirada del baño y enfriada hasta temperatura ambiente, se procedió a realizar una curva de calibración del potenciómetro y la toma de la segunda lectura del pH dando un valor de 11.30 por la acción del ácido. Lo anterior sugiere que la muestra no es corrosiva ya que su valor de pH es menor a 12.5 tal como lo establece la norma [47].

La norma requiere que, con base a los resultados, se determine el reactivo a utilizar en la lixiviación; en este caso, el pH de 11.30 nos indica que el reactivo a utilizar es el número 2, que contiene ácido acético glacial ($\text{CH}_3\text{-COOH}$) y es utilizado para muestras con un pH mayor que 5; de lo contrario, se utilizaría el reactivo 1 que, además, contiene NaOH 1N.

3.1.8.2 Lixiviación de la muestra

El reactivo 2 fue preparado diluyendo 5.7 ml de ácido acético glacial en agua desionizada, hasta completar el volumen de 1 litro en un matraz de aforación. La solución para lixiviar fue preparada con 20 partes del volumen del reactivo por 1 parte del peso de la muestra a lixiviar. Por lo anterior, se pesaron 45 gramos de muestra de escoria molida (misma que se utilizó para la determinación de pH) y 900 ml del reactivo 2. Se preparó también un blanco, que contenía únicamente el reactivo 2, que fue preparado y tratado bajo las mismas condiciones que la muestra.

Tanto la muestra como el blanco fueron colocados en un aparato de agitación rotatorio, por espacio de 18 horas (la normatividad marca 18 ± 2 horas) con una velocidad de 30 RPM (la normatividad establece 30 ± 2 RPM).

Una vez transcurridas las 18 horas de lixiviación, se procedió a filtrar el contenido de los recipientes, tanto el que contenía la muestra, como el blanco; según el numeral 9.1.2.5 de la NOM-053-SEMARNAT-2003 [47]. Es importante mencionar que no fue necesaria la reducción del tamaño de partícula, ya que la muestra fue previamente molida. A la solución filtrada en esta etapa se le conoce como extracto PECT y fue almacenada a 4°C hasta el día siguiente, cuando se continuó el proceso de digestión.

3.1.8.3 Digestión

En la norma NEN 5763 [48] se indica el procedimiento para la determinación de cromo por espectrometría de absorción atómica (usando técnica de flama), mediante la digestión con ácido nítrico y sulfúrico.

Para el análisis de Cromo (Cr), Selenio (Se) y Arsénico (As) se tomó una alícuota de la solución filtrada. El volumen de la alícuota y los reactivos empleados para el proceso de digestión con los que fue tratada la muestra, se realizaron en función del analito; para luego ser analizadas en el equipo de absorción atómica Varian® modelo SpectrAA 220 como el de la Figura 3.3.

Para el caso del Cromo, se tomó una alícuota de 50 ml del filtrado y fue colocada en un tubo de digestión, al cual se añadieron 2 ml de ácido nítrico HNO_3 concentrado. Posteriormente, el tubo de digestión de la muestra, junto con los tubos de los controles de calidad (blanco del lixiviado, blanco de digestión y muestra control), se colocaron en una placa de calentamiento durante dos horas, previamente, estabilizada a una temperatura de 95 °C y se aseguró que permaneciera constante, para que la digestión fuera adecuada.



Figura 3.3 Espectrómetro de absorción atómica.

La determinación de la concentración de Arsénico y Selenio se realizó de acuerdo con el Anexo I de la Normativa para el análisis de suelo [48], mediante la técnica espectrométrica de absorción atómica, la cual debe realizarse a través del método de generación de hidruros, que requiere una digestión previa con ácido nítrico y clorhídrico.

Para el Arsénico y el Selenio, los estándares fueron aforados con ácido clorhídrico HCl al 3%. Se tomaron 50 ml del extracto para cada analito (As y Se), a la muestra se le añadieron 2 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado y 1 ml de ácido nítrico concentrado y se colocan en una placa de calentamiento a 95 °C durante dos horas. En este tiempo, todos los tubos de reacción, tanto de las muestras como de los controles de calidad antes mencionados, estuvieron cubiertos con un vidrio de reloj y la digestión se realizó bajo una campana de extracción, manteniendo la temperatura constante.

Luego de transcurrido este tiempo, a los viales correspondientes al Arsénico, se les adicionaron 5 g de urea y 5 g de L-cisteína. Se observó una liberación de burbujas casi inmediata cuando este reactivo es añadido a la solución. Mientras que a los viales para la determinación de Selenio, se les adicionaron 1 g de urea. Después se dejaron reaccionar en un baño de agua, bajo una campana de extracción, por un período de 30 minutos. Posteriormente, se preparó una solución de boro hidruro de sodio, la cual tiene como objetivo actuar como agente reductor para la formación de hidruros de Selenio y Arsénico, para preparar la muestra antes de ser analizada por la técnica de espectrometría de absorción atómica.

3.2 Preparación de morteros

Esta sección se explica la segunda etapa de la fase experimental de esta tesis. Esta etapa tiene la finalidad de describir los materiales empleados para la preparación de los especímenes y ensayos de los morteros, para lo cual se especifican las normas y procedimientos que fueron utilizados como guía para su elaboración.

3.2.1 Materiales

A continuación se describen cada uno de los materiales utilizados en la fabricación de los morteros para los experimentos de esta tesis.

3.2.1.1 Cemento

En la Tabla 3.1 se muestra el porcentaje en masa de la composición química de los compuestos del cemento 42,5 R y que cumple con la norma UNE-EN 197-1:2000. Mientras que en la Tabla 3.2 se muestra el porcentaje en masa de las fases del clínker y en la Tabla 3.3, algunas otras características del cemento. La información contenida en estas tablas es expedida por el fabricante.

Tabla 3.1 Características del cemento 42.5 R.

Compuesto	% peso
Na ₂ O	0.19
Al ₂ O ₃	5.05
CaO	65.13
Fe ₂ O ₃	5.49
SiO ₂	18.79
MgO	1.92
SO ₃	3.42
Total	100.00

Tabla 3.2 Porcentaje de las fases que componen el clinker

Na ₂ O eq	0.40406
Clinker	
C ₃ S	57.91
C ₂ S	6.28
C ₃ A	3.82
C ₄ AF	15.44

Tabla 3.3 Otras características del cemento

Clinker	95-100%
Cloruros	0.001%
Sulfatos	0.04%
Fraguado (mín.)	60 min
Fraguado (máx.)	720 min
Resistencia (28d)	42.5-62.5 MPa

3.2.1.2 Arena

Para la elaboración de los morteros se empleó arena normalizada del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc), la cual cumple con la norma UNE 80101 [49]. En la Tablas 3.4 y 3.5 se muestran la composición química, así como la granulometría de la arena utilizada para fabricar las probetas.

Tabla 3.4 Composición química de la arena normalizada [49].

Composición	Porcentaje (%)
SiO ₂	≥ 98
Humedad	< 0,2

Tabla 3.5 Granulometría de la arena normalizada

Malla (mm)	Residuo acumulado (% peso)
2,00	0
1,60	7 ± 5
1,00	33 ± 5
0,50	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 5

3.2.1.3 Escoria de horno de arco eléctrico

La escoria es un subproducto de la fundición del acero generada en un horno de arco eléctrico producida en una acerera de la región norte de México. Este residuo fue acondicionado mecánicamente por el segundo proceso de molienda y caracterizado por DTP, FRX, DRX y SEM EDX, previo a su utilización.

3.2.1.4 Aditivos

Con la finalidad de conseguir mejor fluidez, disminuir la relación agua/cemento y conseguir mejores resistencias a la compresión, se emplearon aditivos superplastificantes a base de policarboxilatos para la fabricación de dos series de probetas de esta investigación. Así mismo, se podrá analizar si los aditivos seleccionados desarrollan un comportamiento sinérgico o negativo con la escoria presente en las mezclas de los morteros.

Aditivo 1

En la Tabla 3.6 se enlistan las características principales del aditivo 1 superplastificante y reductor de agua basado en policarboxilatos, Glenium Sky 549 [50].

Tabla 3.6 Propiedades del Aditivo 1

Función principal:	Reductor de agua de alta actividad / superplastificante
Efecto secundario:	Riesgo de disgregación a dosis elevadas
Aspecto físico:	Líquido turbio pardo claro
pH a 20°C:	6,5 ± 1
Densidad a 20°C:	1,056 + 0,02 gr/cm ³
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/50 RPM:	< 60 cps
Contenido de cloruros:	< 0,1 %

Aditivo 2

En la Tabla 3.7 se enlistan las características principales del aditivo 2 superplastificante y reductor de agua basado en policarboxilatos, Glenium Sky 604 [51].

Tabla 3.7 Propiedades del Aditivo 2

Función principal:	Reductor de agua de alta actividad / superplastificante
Efecto secundario:	Riesgo de disgregación a dosis elevadas
Aspecto físico:	Líquido amarillento turbio
pH a 20°C:	5,5 ± 1
Densidad a 20°C:	1,048 ± 0,002 g/cm ³
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/50 RPM:	< 100 cps
Contenido de cloruros:	< 0,1 %

3.2.2 Mezclas de mortero

En la Figura 3.4 se muestra una amasadora automática de la marca Matest® modelo E93 en donde se realizaron las mezclas de mortero, siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1015-2 [52] como se resume a continuación.



Figura 3.4 Mezcladora para pastas y morteros.

Una cierta cantidad de agua es adicionada al tazón de la amasadora, seguida de una cantidad predeterminada de cemento que, para fines de esta investigación, puede variar de un mortero a otro dependiendo del porcentaje de escoria agregado y de la consistencia. Las cantidades empleadas se especifican en el Apéndice II, en la Tabla A-II.1.

El mezclado se inicia a una velocidad lenta de $(140 \pm 5 \text{ RPM})$ durante 30 segundos. Posteriormente, y a la misma velocidad, es adicionada la arena, de igual forma, durante 30 segundos, para después aumentar a la velocidad media a $(285 \pm 10 \text{ RPM})$ amasando por 30 segundos a esta velocidad.

Para verificar que el amasado sea homogéneo, se detiene el mezclado durante 15 segundos y se revisa que sea correcto, es decir que tenga buena consistencia y que todo el contenido del tazón sea mezclado; se deben completar otros 75 segundos sin mezclar. Una vez terminado este tiempo, se debe continuar mezclando a velocidad rápida (285 ± 10 RPM), durante 60 segundos. Por último, el mortero es vaciado en los respectivos moldes, como el que se presenta en la Figura 3.5 y cumplen con las características de la norma EN-12390, con profundidad y anchura interiores de cada compartimiento de $40 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$, y la longitud de cada compartimiento de $160 \text{ mm} \pm 0.4 \text{ mm}$. El colado se realiza en dos capas y luego de cada capa el molde se lleva a la mesa vibratoria. Al final, el molde se envuelve en una película plástica y se lleva a la cámara de curado, en donde permanecerá 24 h, para luego desmoldar las tres probetas de cada amasada.



Figura 3.5 Moldes empleados para la fabricación de las probetas para ensayos de flexión y compresión.

3.2.3 Determinación de la consistencia del mortero fresco

La consistencia del mortero fresco se determina mediante la mesa de sacudidas, según el procedimiento descrito en la norma UNE EN 1015-3 [53] basado en el valor de escurrimiento. La consistencia es una medida de la fluidez y de la humedad del mortero fresco y proporciona una medida de su deformabilidad cuando el mortero es sometido a un determinado tipo de esfuerzo mecánico.

El valor del escurrimiento se basa en la medición del diámetro de una muestra de mortero fresco, colocado sobre el disco de una mesa de sacudidas, con la ayuda de un molde troncocónico, así el mortero es sometido a una determinada cantidad de sacudidas verticales.

El equipo empleado para esta determinación fue el siguiente: a) una mesa de sacudidas que cuenta con bastidor, una placa rígida con un disco, un eje horizontal y una leva de elevación, así como un eje de elevación; b) un molde troncocónico de latón con altura de $60 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ y un diámetro interior de $100 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ en la base y de $70 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ en la parte superior con un espesor mínimo de 2.0 mm con la superficie interior pulida al igual que los bordes; c) un pisón de sección de sección circular no absorbente con medidas de 40 mm de diámetro y 200 mm de longitud aproximadamente con una masa de $0.250 \text{ kg} \pm 0,015 \text{ kg}$; d) un calibre con capacidad para medir diámetros de hasta 300 mm con una exactitud de 1 mm; e) una paleta; f) una regla metálica u otra herramienta para enrasar.

La determinación de la consistencia se realizó como se describe a continuación:

Este procedimiento es realizado para dos de las tres amasadas del mismo mortero, con la finalidad de buscar la reproducibilidad de los valores de escurrimiento. Antes de comenzar cada ensayo, se limpia el disco de la mesa de sacudidas y el molde troncocónico, humedeciendo ligeramente las superficies, para evitar que éstas absorban la humedad del mortero. El molde humedecido se debe colocar en el centro del disco de la mesa de sacudidas. El mortero fresco

es introducido dentro del molde en dos capas y cada capa es compactada con 15 golpes del pisón (la norma establece un mínimo de 10, sin máximo) con la finalidad de asegurar un llenado homogéneo del molde. Es importante enrasar el exceso. Luego de apisonar la última capa en el molde, éste se debe levantar lenta y verticalmente. Posteriormente, se realizan 15 sacudidas a la mesa, con una frecuencia de una sacudida por segundo y el mortero se extiende sobre el disco, midiendo el diámetro del mortero extendido, con la ayuda de un calibre, en dos direcciones perpendiculares entre sí.

Es importante calcular el valor de escurrimiento promedio de las muestras. Si estos valores individuales difieren de su valor promedio en menos del 10%, entonces podrían ser utilizados como valor de escurrimiento del mortero. Si los valores individuales difieren en más del 10%, entonces el ensayo debe ser repetido. Si al repetirse, vuelven a sobrepasar este porcentaje, se debe variar la relación agua/cemento-escoria en ese mortero. En este caso, en el Apéndice I, en la Tabla A-I.1 se muestran los valores promedio correspondientes de los escurrimientos de cada mortero.

Una vez comprobado que cada una de las mezclas para los morteros cumple los requisitos de consistencia, se deben realizar en total tres amasadas para cada tipo de mortero. En la Tabla 3.8 se muestra los porcentajes de escoria utilizados en las diferentes series de morteros empleados en esta tesis para los ensayos de compresión y flexión.

Tabla 3.8 Listado de las mezclas de mortero

Aditivo	Escoria (% peso)	Clave
Sin aditivo	0%	SA00%E
Sin aditivo	5%	SA05%E
Sin aditivo	10%	SA10%E
Sin aditivo	20%	SA20%E
Sin aditivo	30%	SA30%E
Sin aditivo	60%	SA60%E
Aditivo 1	0%	1A00%E
Aditivo 1	5%	1A05%E
Aditivo 1	10%	1A10%E
Aditivo 1	20%	1A20%E
Aditivo 1	30%	1A30%E
Aditivo 2	0%	2A00%E
Aditivo 2	5%	2A05%E
Aditivo 2	10%	2A10%E
Aditivo 2	20%	2A20%E
Aditivo 2	30%	2A30%E

Las relaciones agua/cemento y agua/cemento-escoria, así como las cantidades pesadas de cada material para la realización de los especímenes se especifican en el Apéndice II, en la Tabla A-II.1.

3.2.4 Determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión del mortero endurecido

La resistencia a flexión de un mortero se determina aplicando una carga en tres puntos de los prismas del mortero endurecido hasta su ruptura, los prismas

o probetas tienen dimensiones de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Por otra parte, la resistencia a la compresión del mortero se determina en cada una de las dos mitades (semiprismas) resultantes del ensayo de la resistencia a flexión, esto según lo indicado mediante la norma española UNE-EN 1015-11 [54].



Figura 3.6 Ensayo de resistencia a la flexión.

Para realizar estos ensayos se requirieron los siguientes equipos y herramientas: a) moldes metálicos (como los de la Figura 3.5) que deben cumplir las especificaciones descritas en el Apéndice A de la norma anteriormente citada; b) un pisón que es una barra rígida de material no absorbente de sección cuadrada de $12 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de lado con una masa de $50 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$., la cara de apisonar es plana y perpendicular al eje del pisón; c) una cámara de curado que debe ser capaz de mantener una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del $95\% \pm 5\%$ o del $65\% \pm 5\%$; d) una regla para enrasar.

De cada mortero que se muestra en la Tabla 3.8 se prepararon 9 probetas correspondientes a 3 amasadas. Dos probetas de cada serie fueron tomadas para ensayarse a flexión a las siguientes edades: 2, 7, 28 y 90 días y en esta penúltima edad fueron ensayadas 3 probetas. Del ensayo de flexión se obtuvieron dos semiprismas como se observa en la Figura 3.6, que fueron ensayados a

compresión, obteniéndose 4 mediciones a compresión para todas las edades, con excepción de los de 28 días de edad, en que se hicieron 6 mediciones.

3.2.5 Fabricación de probetas para determinación de la reactividad álcali –sílice

El método acelerado en probetas de mortero se basa en la medida del cambio de longitud que experimentan los especímenes que son fabricados con el material que se quiere estudiar después de haber sido sumergidos en agua a 80 ± 2 °C (durante el primer día) y en una disolución de NaOH 1N a 80 ± 2 °C (durante los siguientes 14 días), según la norma UNE 146508 EX [55].

Para la realización de este ensayo de expansión por la reactividad álcali-sílice se utilizaron los siguientes aparatos y reactivos: a) una amasadora que cumpliera los requisitos de la norma UNE-EN 196-1 [56] como se ilustra en la Figura 3.1; b) un pisón con adecuada anchura, para compactar manualmente las probetas en los moldes; c) una cámara húmeda, según la norma UNE-EN 196-1 con una humedad relativa superior al 90% y regulada a una temperatura de 20 ± 1.5 °C.; d) moldes que cumplan las especificaciones de la norma UNE 80113 (de dimensiones de 25 mm x 25 mm x 280 mm) además de enrasar las caras internas de los moldes; e) un comparador de longitud con un micrómetro u otro aparato de medida, graduado para medir en unidades de 0.001 mm., como el que se ilustra en la Figura 3.7. Para la calibración de este comparador antes y después de cada conjunto de medidas se debe contar con una barra de referencia de 254 mm \pm 2.5 mm de longitud; f) un contenedor que resista la exposición prolongada a 80 °C e inerte a la disolución de NaOH 1N, con capacidad suficiente para contener las probetas necesarias y que pueda asegurar que las probetas no se toquen entre sí, ni con las paredes del mismo contenedor; g) una estufa con una temperatura regulada a $80 \pm 2,0$ °C; h) disolución de hidróxido de sodio 1N.

Para este ensayo de expansión se fabricaron morteros de referencia y morteros con 30% de escoria reemplazando la composición en peso del cemento

(con la misma medida de consistencia de las probetas anteriores). El enmoldado debe ser muy cuidadoso, ya que no se hace vibración, pero se debe asegurar que la mezcla se coloque de manera uniforme a lo largo de los moldes.



Figura 3.7. Comparador de longitud.

Terminado esto, los moldes se recubren con una película plástica y se llevan a la cámara de curado estándar durante 24 horas; se secan, se llevan al comparador de longitud y ésta se considera como la medición inicial de cada espécimen. Todos los valores son reportados con una precisión de 0.001 mm. Una vez terminado lo anterior, las probetas que son sometidas a un curado estándar son llevadas de nuevo a la cámara de curado y aquellas que tienen un tratamiento alcalino se someten a esas condiciones.

3.2.5.1 Tratamiento alcalino

Las probetas expuestas a tratamiento alcalino fueron colocadas en un contenedor y sumergidas con suficiente solución de NaOH 1N, previamente calentada a 80 ± 2 °C, tal como se muestra en la Figura 3.8.

Tres probetas de referencia se utilizaron en esta investigación para el curado normal, y otras tres para el tratamiento alcalino. Cuatro probetas con 30% de escoria EAF se utilizaron para el curado estándar y otras cuatro (con este mismo porcentaje de escoria) para someterlas a medio alcalino. Las mediciones de los días posteriores se llevaron a cabo tal y como se explicó anteriormente. Los contenedores eran sellados y colocados en la estufa a 80 ± 2 °C cuando era el caso, o de lo contrario se llevaban a la cámara de curado. Las medidas de la longitud de las probetas se realizaron en los días 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 21, 28 y 30 días y cada una de éstas es una medición n.



Figura 3.8. Probetas expuestas a tratamiento alcalino.

3.2.6 Preparación de muestras para SEM EDS

Se eligieron los morteros sin escoria y con 10% de escoria EAF agregada, para analizar su microestructura. Las muestras eran tomadas de pedacería de probetas de las series de referencia y de 10% de escoria, después de que dichos especímenes fueran ensayados a flexión y compresión. Se cortaron trozos pequeños de las probetas ensayadas a las edades programadas, y fueron sumergidas en acetona, para desplazar el agua libre y en vacío para detener el proceso de hidratación del mortero [57, 58]. Estos trozos eran guardados en un desecador, para su posterior montaje en frío con resina epóxica.

Para el montaje en frío de las muestras se utilizaban 15 ml de resina epóxica de Struers, con 2 ml de catalizador. En un molde limpio y seco se colocaba un trozo del espécimen ensayado y se cubría con la mezcla resina-catalizador, asegurándose que no quedaran poros o partes sin recubrir. Por último, la muestra montada fue colocada en un desecador para hacer vacío con la finalidad de eliminar aire y rellenar los poros que pudieran haber en la muestra.

Las muestras montadas eran desmoldadas después de 12 h o más tiempo de fraguado, hasta asegurar que la resina se haya endurecido, tal y como se puede observar en la Figura 3.9. Por último, las muestras eran cortadas transversalmente, pulidas y recubiertas el día en que eran analizadas en el microscopio electrónico de barrido.



Figura 3.9. Piezas encapsuladas en resina antes de ser pulidas.

Para el pulido grueso de las muestras fueron utilizadas lijas de SiC de los números: 280, 360, 600, 1200, 1500 y 2400. En la etapa de pulido fino, las muestras fueron pulidas con pasta de diamante de 3 μm de la marca Struers, sobre un paño de tipo microcloth de la marca Buehler®. En la Figura 3.10 se muestra la pulidora UNI POL -830, MTI Corporation® con velocidad variable entre 130 - 180 RPM utilizada en la preparación de las muestras para su análisis de microestructura.



Figura 3.10 Pulidora para metalografías.

Antes de ser observadas en el microscopio de barrido electrónico, era necesario volver las muestras conductoras; por lo tanto, los especímenes encapsulados eran envueltos (con excepción del borde superior que sería analizado) con papel aluminio y, posteriormente, eran recubiertos con oro en una evaporadora de la marca DentonVacuum DeskV®. Una vez que la presión se mantenía por más de 5 segundos en 90 torrs, comenzaba el recubrimiento el cual duraba de 60 a 100 segundos, dependiendo del tamaño de la muestra.

Capítulo 4

Resultados y discusiones

En el presente capítulo se exponen y discuten los resultados obtenidos, primero en la etapa exploratoria para acondicionar y caracterizar la escoria EAF; y después, los resultados obtenidos en los ensayos realizados en los morteros, como fue la resistencia a la compresión, pruebas de expansión para algunos especímenes y estudio de la microestructura.

4.1 Caracterización de la escoria EAF

4.1.1 Distribución de tamaño de partícula (DTP)

La escoria proveniente del primer proceso de molienda presentó un tamaño de partícula promedio de 13.83 μm . La gráfica correspondiente presentaba una distribución bimodal en la que en el primer pico se obtiene un tamaño de partícula medio de 2.47 μm y en el segundo, de 29.50 μm . Lo anterior pudiera deberse a que el material presentaba una alta tendencia a aglomerarse, después de la molienda mecánica. Muestras de estas primeras moliendas fueron tomadas para su caracterización química y mineralógica.

Posteriormente y para la fabricación de los morteros, se hizo molienda mecánica de la escoria EAF en un molino rápido planetario de Ceramics Instruments®, este fue el segundo proceso de molienda. Una de las razones por la que se utilizó este molino es debido a que el tiempo de molienda se disminuye considerablemente, de 15 h en el molino planetario de Fritsch® en seco a 2 h en el molino rápido planetario en húmedo. Lo anterior nos conduce a un gran ahorro en tiempo de molienda y energía en el caso de que se utilice en un futuro algún escalamiento industrial.

Al correr el análisis de distribución de tamaño de partícula de la escoria EAF, a 2 h de molienda en húmedo, se apreció una distribución normal más homogénea, con un tamaño de partícula promedio de 10.33 μm . Lo anterior pudiera deberse a que el agua es un buen agente dispersante que facilita una interacción más homogénea entre las bolas y la escoria. Es importante señalar que la naturaleza química de la escoria no se veía afectada, ya que ésta no es soluble en agua. Una vez que se completaba el tiempo de molienda, la escoria húmeda era secada en una estufa durante 12 h.

4.1.2 Fluorescencia de rayos X (FRX) y espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) acoplado al microscopio electrónico de barrido (SEM)

En la Tabla 4.1 se presentan los porcentajes de óxidos de la escoria EAF obtenida por la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX). En tanto que en la Tabla 4.2 se presentan los resultados de la escoria analizada por espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) de la misma escoria analizada por FRX y donde se puede observar que no existe una gran diferencia en los porcentajes de los compuestos detectados por ambas técnicas. Sin embargo, es conocido que la técnica por FRX tiene una mejor resolución.

Tabla 4.1 Composición química de la escoria EAF por FRX.

Compuesto	% peso
Fe₂O₃	45.000
CaO	24.110
SiO₂	9.070
MgO	6.925
Al₂O₃	5.540
MnO	4.195
Cr₂O₃	1.003
SO₃	0.421
TiO₂	0.328
P₂O₅	0.255
V₂O₅	0.169
SrO	0.043
Nb₂O₅	0.039
ZrO₂	0.014

Tabla 4.2 Composición química de la escoria EAF por EDS.

Compuesto	% peso
FeO	43.80
CaO	25.06
SiO₂	13.33
MgO	5.20
Al₂O₃	5.85
MnO	5.33
Cr₂O₃	1.25

El alcance y límite de detección de una y otra técnica son diferentes, aunque el principio sea el mismo; sin embargo, el análisis semicuantitativo (EDS) es útil para un primer acercamiento a la composición química de la escoria. De los compuestos encontrados en esta primera aproximación vía EDS se observó que el subproducto, escoria EAF está conformado principalmente por óxidos de hierro. Por medio de difracción de rayos X (DRX) fueron identificadas las distintas fases o variantes del óxido de hierro. Además, también se observa una

concentración muy similar del 5 % peso en los compuestos de MgO, Al₂O₃ y MnO. Los compuestos en concentraciones menores muy difícilmente son detectados por la técnica de EDS acoplada a un SEM, esto se puede adjudicar a distintas razones; por ejemplo, en el EDS se emplea la información de una parte de los electrones de la superficie para obtener la composición, en tanto que en FRX se contempla prácticamente, toda la muestra.

En la Figura 4.1 se muestra una micrografía obtenida en el SEM, donde se indica, mediante números del 1 al 6, los puntos analizados por EDS en una muestra de escoria y en la Tabla 4.3 se resumen los elementos encontrados en cada uno de los puntos seleccionados con sus respectivos % peso. Los resultados muestran que la composición química de cada uno de los puntos analizados en la escoria no es la misma, ya que varía de punto a punto, lo que sugiere que la composición química de la escoria no es homogénea.

Al realizar una comparación de la escoria EAF analizada en este proyecto de tesis, con otros análisis químicos de escorias del mismo tipo, reportados en la bibliografía científica, como los referenciados en los antecedentes del capítulo 1, se pudo encontrar que los porcentajes en masa de los elementos analizados varían considerablemente y esto pudiera ser a consecuencia de las diferencias intrínsecas de cada proceso de producción; como la materia prima, la temperatura y el enfriamiento de las escorias.

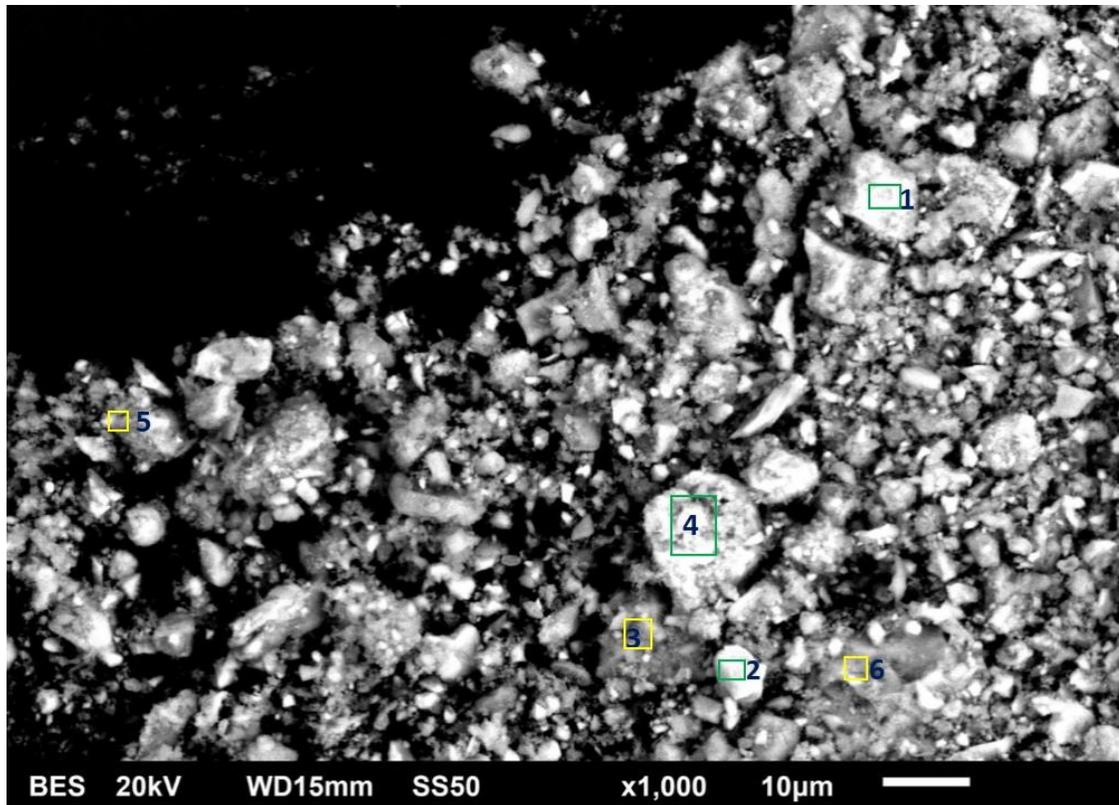


Figura 4.1 Micrografía de la escoria EAF a 2 h de molienda en húmedo.

Tabla 4.3 Composición química vía EDS de la escoria EAF.

Elemento	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
	(% peso)					
Mg	12.64	4.88	0.63	13.12	6.29	8.07
Al	2.38	8.03	1.05	0.97	5.94	2.92
Si	0.86	10.57	10.05	1.11	4.16	2.89
Ca	2	32.66	75.31	2.38	11.6	10.27
Cr	3.18	0.88	0	0	2.22	1.7
Mn	8.91	4.85	0.88	8.34	5.92	7.11
Fe	67.09	36.19	7.64	72.79	62.14	65.84
Cu	1.58	1.94	2.61	0	0	0
Zn	1.36	0	1.83	1.29	1.73	1.2
Total	100	100	100	100	100	100

4.1.3 Difracción de rayos X (DRX)

En la Figura 4.2 se muestra el análisis de difracción de rayos X realizado a la escoria EAF y en donde se pueden observar picos característicos de Wustita (FeO – carta PDF 00-006-0615) y Magnetita (Fe_3O_4 – carta PDF 00-019-0629) como óxidos de hierro. También, se encontraron Mayenita ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ – carta PDF 00-009-0413) y Larnita (Ca_2SiO_4 – carta PDF 00-033-0302). Además, se puede observar ruido en exceso en los difractogramas, lo que impidió identificar fases con reflexiones menores.

En el análisis por DRX se hubiera esperado detectar fases presentes en la escoria a más bajas concentraciones, como la Olivina ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) o Magnesioferrita (MgFe_2O_4) tal como fueron detectados en el análisis por FRX. Lo anterior, pudiera deberse a que el límite de detección del difractómetro de rayos X es del 5 % y que, las fases en menor concentración se pudieron enmascarar tras las señales mayores.

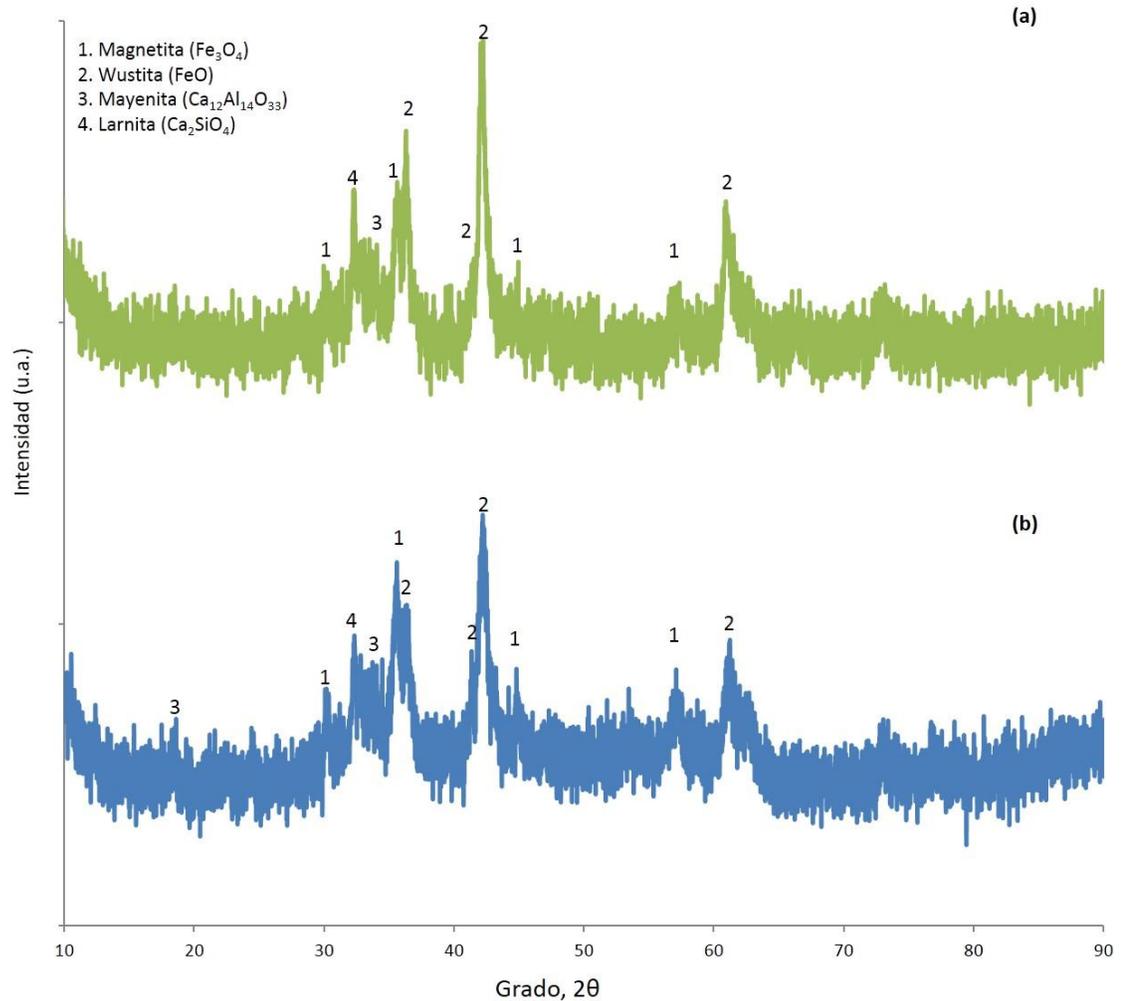


Figura 4.2 Difractograma de la escoria EAF.

En la Figura 4.2 se observa el patrón de señales emitidas por dos muestras de la escoria de horno de arco eléctrico empleada para esta investigación. Con la única diferencia de que la parte superior corresponde a una muestra de escoria EAF, proveniente de la primera molienda de laboratorio, mientras que la parte inferior responde al patrón de una muestra de escoria EAF de la segunda molienda, obtenida de un molino industrial. Es importante resaltar que ambos patrones son muy similares coincidiendo en las fases principales y variando en, algunos casos, en la intensidad de las mismas.

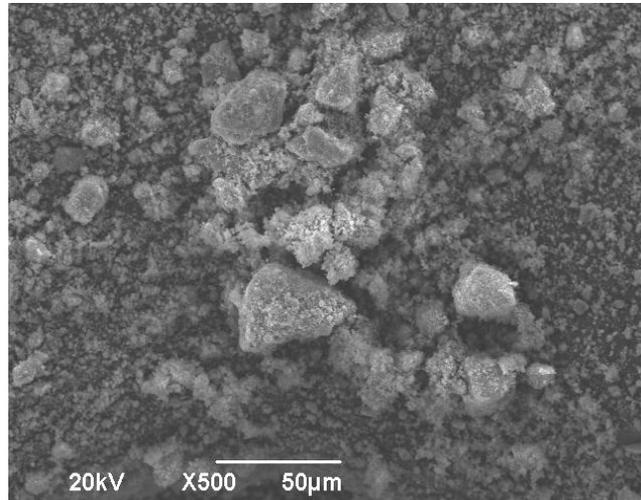
La identificación de los picos de difracción de la Figura 4.2 a) y b), que corresponden a las fases encontradas en la escoria de este proyecto de tesis, concuerda con lo reportado en la bibliografía científica y en específico en los trabajos de Iacobescu y col. [59] quienes identificaron Larnita (Ca_2SiO_4), Gehelenita ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$), Wustita (FeO) y Magnetita (Fe_3O_4). Por otra parte, S. Abu-Eishah y col. [20] reportaron como fases principales de su escoria Wustita (FeO) y Larnita (Ca_2SiO_4). Frías Rojas y col. [60] encontraron Wustita (FeO), Magnesioferrita/Magnetita (MgFe_2O_4)/(Fe_3O_4), Hematita (Fe_2O_3) y Larnita (Ca_2SiO_4).

Es importante mencionar que la alta concentración de óxidos de hierro encontrados en forma de magnetita puede ser una señal indicativa de que las condiciones reductoras y la eficiencia de producción han sido irregulares.

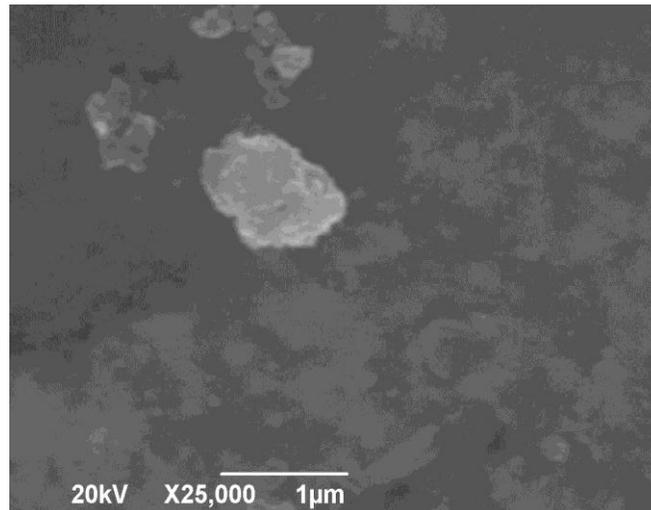
La mayor parte de la bibliografía científica reporta que la Magnetita se encuentra presente en escorias EAF, tal como lo hacen Wonbaek Kim y col. [61] quienes identificaron y diferenciaron esta fase de la Maghemita que no es muy reportada en este tipo de escorias EAF. La identificación de la fase Maghemita por difracción de rayos X es complicada, puesto que ambas fases poseen estructura cúbica y sus parámetros cristalográficos son muy similares y tienden a enmascarse. Por ello, no se descarta que esta fase se encuentre presente en la escoria de esta investigación.

4.1.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La Figura 4.3 a) y b) muestra las micrografías de la escoria EAF provenientes del primer proceso de molienda, donde se pueden observar tamaños de partículas del orden de 1 a 50 μm y morfología muy heterogénea, con una tendencia a aglomerarse, como puede verse en la Figura 4.3 b).



a) Morfología de escoria EAF.

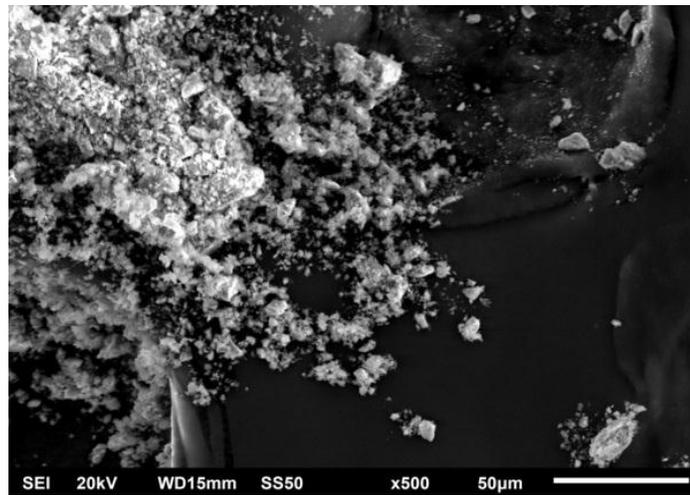


b) Partícula aislada de escoria EAF.

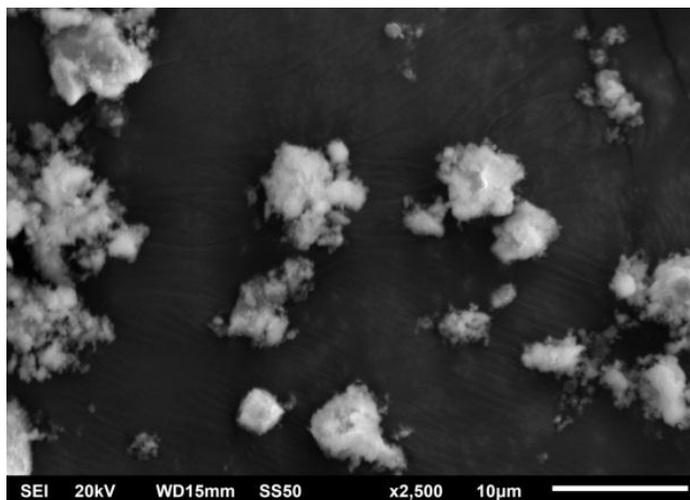
Figura 4.3 Escoria EAF del primer proceso de molienda.

Antes de analizar la muestra por microscopía electrónica de barrido fue necesario someterla a 20 min en un dispositivo de ultrasonido, porque cuando el tiempo de ultrasonido era corto, 5 - 10 min por ejemplo, las partículas no lograban separarse. En la Figura 4.4 a), b) y c) se muestra la morfología de la escoria EAF con 2 h de molienda en húmedo, es decir, del segundo proceso de molienda. Es importante mencionar que esta escoria fue utilizada en la

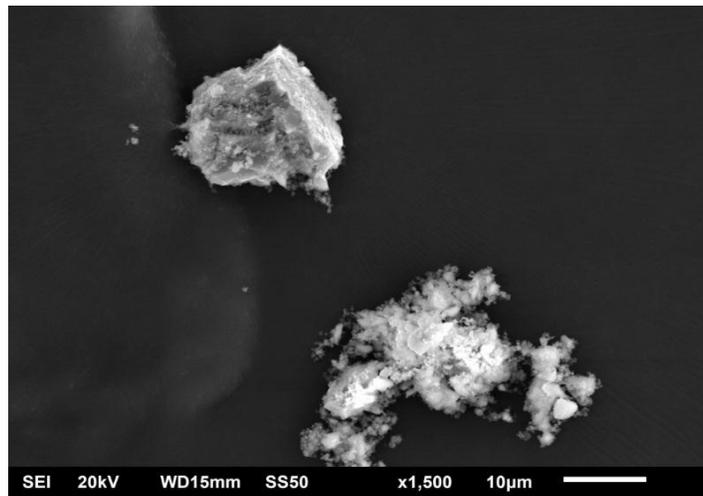
fabricación de los morteros. En la Figura 4.4 a) se muestra una micrografía de la vista general de la escoria EAF después del proceso de molienda en húmedo y en donde se puede observar una fuerte tendencia a aglomerarse. En la Figuras 4.4 b) y c) se pueden observar fragmentos desprendidos de las partículas de escoria durante la molienda. Por otro lado, en la Figura 4.4 c) en la parte superior se puede apreciar una partícula de escoria más completa, compacta y angulosa, como se esperaría de una partícula después de un proceso de molienda mecánica.



a) Vista general de la escoria molida.



b) Partículas de escoria

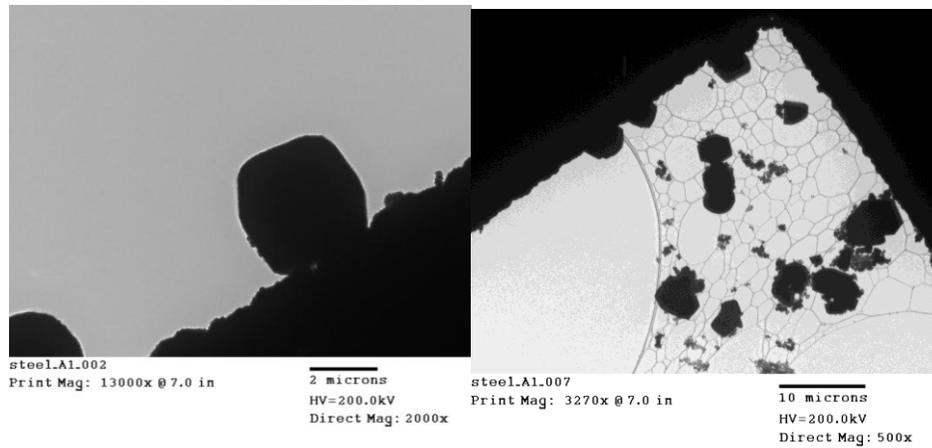


c) Partícula aislada de escoria

Figura 4.4 Escoria EAF del segundo proceso de molienda. (a) Vista general, (b) Partículas de escoria y (c) Partícula aislada de escoria

4.1.5 Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

La Figura 4.5 a) y b) corresponde a micrografías de escoria con 15 horas de molienda en seco, primer proceso de molienda. Además, en el inciso a) se muestra una partícula de escoria molida aislada y tamaño de partícula aproximado a 2 μm . Las partículas de la escoria molida muestran una morfología angulosa no regular como consecuencia de la molienda mecánica.



a) Partícula de escoria b) Partículas aisladas de escoria

Figura 4.5 Muestra de escoria EAF analizada por TEM

En la Figura 4.6 se muestran los anillos de difracción de la escoria EAF utilizados para la identificación de fases presentes en la escoria por medio de la medición de las distancias interplanares utilizando el software OIM™ Data Analysis. Las mediciones interplanares obtenidas fueron 2.853067 Å, 2.436054 Å y 1.752848 Å y comparadas con las cartas cristalográficas de la ICDD para la Maghemita (carta PDF 00-024-0081) con valores de 2.953 Å, 2.5177 Å y 1.7045 Å; mientras que para los valores reportados para la Magnetita (carta PDF 00-019-0629) son 2.967 Å, 2.5432 Å y 1.6158 Å concluyendo que no se debe descartar una u otra fase mediante las distancias interplanares obtenidas de esta manera, ya que los valores son muy similares.

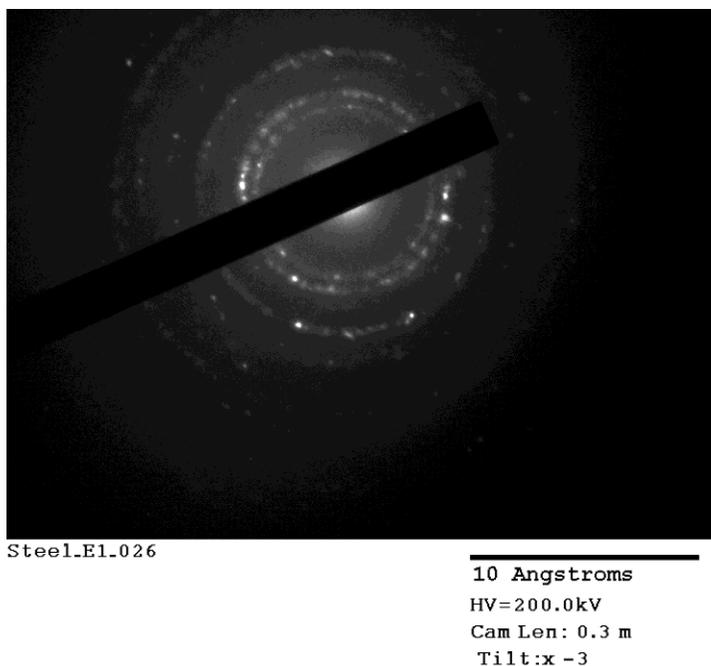


Figura 4.6 Anillos de difracción de la escoria EAF por TEM.

La Magnetita (Fe_3O_4) es muy conocida por sus propiedades magnéticas; pues es un óxido de hierro en sus dos estados de oxidación (II y III) y es una fase cristalina termodinámicamente estable a condiciones atmosféricas ambientales. Además, su campo coercitivo es menor, a medida que aumenta la temperatura y decrece la magnetización residual debido a que la red puede captar un exceso de iones trivalentes. Los iones ferrosos y férricos de las posiciones octaédricas comparten los electrones de valencia, lo que permite que sea un compuesto no estequiométrico y de elevada conductividad eléctrica [61].

La Maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) de tamaño de grano grueso es una modificación meta estable a baja temperatura de la Hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$); de hecho, también se conoce como Hematita magnética. Ésta no es muy abundante en la naturaleza, pero algunas formas de obtenerse es mediante la oxidación de la Magnetita o por calentamiento de la Hematita y es común que esta fase aparezca en minerales sometidos a la acción del calor o parcialmente reducidos [62], que son condiciones a las que la escoria EAF de esta investigación fue sometida. Por otra

parte, la Maghemita es una fase isoestructural de la Magnetita, pero con una mayor proporción de iones férricos (⁺³); por ejemplo, es común que aparezca en matrices como suelos por desgaste de la Magnetita, pero también presenta un comportamiento ferromagnético, como también lo hace la escoria EAF que se utilizó en este proyecto.

Por lo anterior y debido a que la medición de las distancias interplanares fueron realizadas de forma “manual” mediante el software OIM™, es difícil diferenciar entre la presencia de una y otra fase, cuando se trata de un material que no es puro, como es el caso de este subproducto y más cuando la composición química de cada fase no es homogénea, como ya se había discutido anteriormente. Debido a ello, se pudiera concluir que la fase Maghemita está presente en la muestra, al igual que las identificadas por DRX con picos característicos que corresponden a las fases Magnetita, Wustita, Larnita y Mayenita. Es importante señalar que este tipo de técnicas de caracterización son complementarias unas de las otras.

4.1.6 Prueba del extracto PECT y determinación de peligrosidad del residuo

La Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-2003 establece que se deberá realizar el análisis CRIT (Corrosividad, Reactividad, Inflamabilidad y Toxicidad) para determinar si un residuo es peligroso. En este proyecto sólo se realizó la prueba de toxicidad al ambiente, debido a que las demás pruebas CRIT fueron descartadas, según las características de la escoria.

Con base en los procedimientos de la Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-2003 se obtuvo un pH de 11.30 en la escoria EAF descartando así que sea un residuo peligroso corrosivo, de acuerdo con la NOM-052-SEMARNAT-2005 [63]. Esta norma establece que un residuo será considerado como corrosivo si cumple lo siguiente: a) es un líquido acuoso y presenta un pH menor o igual

que 2.0 o mayor o igual que 12.5, b) es un sólido que cuando se mezcla con agua destilada presenta un pH menor o igual que 2.0 o mayor o igual que 12.5, c) es un líquido no acuoso capaz de corroer el acero al carbón, tipo SAE 1020, a una velocidad de 6,35 mm o más por año a una temperatura de 328 K (55°C).

La NOM-052-SEMARNAT-2005, por definición, establece que un residuo reactivo es aquel que cumple las siguientes características: a) después de ponerse en contacto con el aire se inflama en un tiempo menor que cinco minutos, sin que exista una fuente externa de ignición, b) reacciona espontáneamente al contacto con agua y genera gases inflamables, c) en contacto con el aire y sin una fuente de energía suplementaria genera calor, d) posee en su constitución cianuros o sulfuros liberables que, cuando se expone a condiciones ácidas, genera gases.

Un residuo se considera inflamable cuando se presentan las siguientes características: a) es un líquido o una mezcla de líquidos que contienen sólidos en solución o suspensión que tiene un punto de inflamación inferior a 60.5 °C, b) no es líquido y es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos a 25 °C. De lo anterior, la escoria EAF no presentó ninguna de las características citadas en cuanto a inflamabilidad.

La toxicidad al ambiente en la escoria EAF fue realizada con base en la NOM-052-SEMARNAT 2005 [63]. En la Tabla 4.4 se resumen los resultados de lixiviación. En la última columna se presenta el Límite Máximo Permisible (LMP) en unidades de mg/l del extracto PECT. Lo anterior indica que la capacidad de lixiviación de la escoria EAF utilizada en este proyecto de tesis no sobrepasa el Límite Máximo Permisible establecido y, por lo tanto, no puede considerarse un residuo peligroso.

Tabla 4.4 Resultados de lixiviación de la escoria EAF

Elemento	(mg/L)	LMP* (mg/L)
As	<0.005	5.0
Cr	<1.0	5.0
Se	<0.005	1.0

*Límite Máximo Permisible

De acuerdo con lo anterior, la toxicidad al ambiente para un residuo se obtiene a partir de la lixiviación, a través del extracto PECT. A continuación, se exponen algunas razones por las cuales se consideró de importancia analizar la lixiviación de Cr, As y Se; así como algunos ejemplos de sus consecuencias en la salud y el ambiente.

La liberación de metales o de elementos peligrosos de las escorias puede ocasionar problemas como la contaminación del agua o del suelo, así como un riesgo toxicológico para los humanos a través de la inhalación de partículas menores que 10 micras [4].

Di Santi y col. [64] reportan que es recomendable hacer análisis de lixiviados a las escorias generadas del proceso de acería. Además, mencionan que una fracción del cromo presente se encuentra como Cr_2O_3 y es recomendable la prueba de eco toxicidad, ya que el cromo hexavalente es muy soluble en agua.

Engström y col. [65] investigaron la solubilidad de los minerales puros de las escorias y señalan que la lixiviación del cromo está relacionada con fases como la Merwinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$). Gelfi y col. [66] también estudiaron el comportamiento de lixiviación de escorias de EAF respecto al cromo, concluyendo que para la liberación de este elemento influye, de manera significativa, la forma en que la escoria se enfría al terminar el proceso.

Ahumada y col. [67] en un estudio sobre las condiciones de salud de una población vecina a una planta recicladora cercana al municipio de Monterrey,

Nuevo León, reportaron que el cromo está asociado con el cáncer de pulmón, trastornos alérgicos, perforación de la mucosa y del tabique nasal. Algunas investigaciones [68-70] han sido dirigidas en la cuantificación de otros elementos diferentes al cromo y los metales pesados, como plomo, bario, níquel, antimonio, molibdeno, cadmio, arsénico y selenio, entre otros. En el presente proyecto de tesis se hizo la cuantificación del cromo, el arsénico y el selenio por ser de los más dañinos y más comunes en la bibliografía relacionada a este tipo de escorias EAF.

En cuestión de salud y seguridad laboral, al contacto del agua con arseniuros de escorias se produce la Arsina (AsH_3) que le puede ocasionar una grave intoxicación al trabajador [71]. Mientras que respecto a la toxicidad ambiental, Armienta y col. [72] reportaron que el arsénico presente en polvos metalúrgicos puede migrar hacia los acuíferos, contaminando el agua, lo que trae como consecuencia afectaciones muy diversas como: enfermedades cardiovasculares (anemia, leucopenia, miocarditis, problemas en la circulación periférica), hepáticas, dérmicas (hiperqueratosis, hipo e hiperpigmentación) y relacionadas con el cáncer, entre otros metales y metaloides.

Panda y col. [73] reportaron que el cromo en la escoria se encuentra presente como Cr (III) que es la especie menos tóxica, debido a que este estado de oxidación es más estable y permanece inmovilizado. Por las referencias citadas anteriormente y por lo que se desconoce sobre los efectos de algunos metales pesados liberados en el ambiente, es de suma importancia realizar análisis como el descrito por la NOM-053-SEMARNAT, tal como se hizo con la escoria EAF de esta investigación.

4.1.7 Otras determinaciones realizadas a la escoria

Es importante conocer la composición química del cemento que se utilizará; por ejemplo, la del cemento usado en este proyecto se presentó en el capítulo

anterior. Sin embargo, existen otros parámetros del cemento que brindan información útil sobre el comportamiento que pudiese tener este material de construcción respecto a la estabilidad volumétrica en los especímenes, sobre la hidratación o carbonatación durante el tiempo que este material fue almacenado o transportado y sobre materia inerte que el cemento contenga. A sabiendas de que el objetivo de este trabajo es adicionar un porcentaje de escoria EAF en peso, mismo que será disminuido de la cantidad de cemento en el mortero, se decidió realizar en muestras de escoria las pruebas respectivas que nos brindan la información anteriormente mencionada.

4.1.7.1 Determinación de cal libre

Mediante las especificaciones de la norma UNE-80243, se determinó el porcentaje en peso de cal libre en la muestra de escoria, el cual correspondió al 0.1%. Esta es una prueba que se practica en el cemento para conocer su grado de clinkerización y es importante también porque porcentajes altos de cal libre, por lo regular, conducen a problemas de expansión en los especímenes. Respecto a la cal libre de la escoria, el 0.1% no es una cantidad significativa para promover fenómenos expansivos, primero porque lo recomendable es que las adiciones que se le hagan al mortero no sobrepasen el 1% en masa de cal libre; y segundo, porque para confirmarlo se realizó el ensayo de reactividad álcali sílice para expansión y los resultados del mismo se exponen más adelante.

4.1.7.2 Determinación de la pérdida por ignición

Además, se realizó también el cálculo de la pérdida por ignición en una muestra de escoria de la cual se obtuvo 3.43% en peso. Este es un valor aceptable, ya que la normatividad sugiere que, salvo algunas excepciones, en la calcinación no se pierda una cantidad igual o mayor que el 5% en peso. La importancia de esta determinación radica en que un porcentaje elevado indica prehidratación y carbonatación.

4.1.7.3 Determinación de residuo insoluble

Por último, la escoria fue sometida al ensayo de residuo insoluble, lo que resultó en un 21.21%, cuando la norma recomienda que no supere el 5% en masa. El residuo insoluble es un dato que ofrece una idea de la presencia de componentes inertes que no aportan poder conglomerante al cemento o impurezas que provienen del yeso y que se disuelven en HCl; pero en este caso se asume que, efectivamente hay impurezas porque no se trata de un cemento, sino de un subproducto. Por lo tanto, era de esperar que este porcentaje fuese alto; porque, como se observó en los resultados de fluorescencia y difracción de rayos X, la escoria de horno de arco eléctrico no tiene tantos silicatos como sí los tiene el cemento ordinario.

4.2 Resistencia a la compresión

En la Figura 4.7 se muestran los resultados de las pruebas de la resistencia a la compresión de los morteros ensayados, según la norma UNE-EN 1015-11 a las edades de 2, 7, 28 y 90 días con porcentajes de adición de escoria EAF de 0, 5, 10, 20, 30 y 60 % en peso sin el uso de aditivo. Tal como se representa en la Tabla 2.8 del anterior capítulo, para las pruebas de resistencia a la compresión se fabricaron tres series de morteros las cuales se clasificaron de la siguiente manera:

La serie SA corresponde a las mezclas de morteros que fueron realizadas sin usar algún aditivo superplastificante durante su elaboración; la serie 1A corresponde a los morteros en los que se utilizó el aditivo número 1 durante su mezclado; mientras que la serie 2A corresponde a aquellas mezclas de mortero donde se usó el aditivo superplastificante número 2. Por otro lado, los dígitos siguientes en la nomenclatura de las series de morteros representan el porcentaje de escoria de horno de arco eléctrico que fue incorporado en la mezcla y este mismo porcentaje fue restado de la totalidad de cemento y comprenden desde 00%E hasta 60%E, en la serie SA y hasta 30%E en las series 1A y 2A.

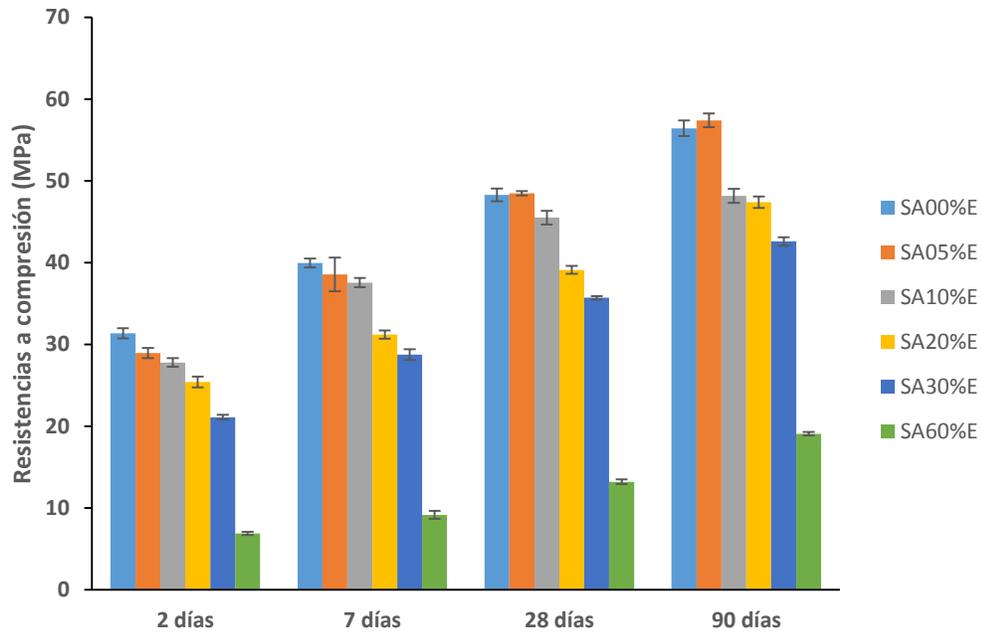


Figura 4.7 Resistencia a compresión de morteros sin aditivo a diferentes edades.

Como se puede observar en la Figura 4.7, hay una tendencia en que la resistencia a la compresión disminuye a medida que aumenta el porcentaje de adición de escoria incorporada en el mortero, esto se observa de manera general, en las cuatro edades a que se realizó el ensayo. Este fenómeno puede atribuirse al hecho de que la composición química de la escoria no es lo suficientemente amorfa como para presentar reactividad o para aportar cantidades importantes de compuestos como los silicatos que favorecieran las reacciones de hidratación; sin embargo, las resistencias alcanzadas son considerables. Debido al número de datos manejados, las barras de error se colocaron únicamente en las gráficas de resistencia a la compresión y cabe resaltar que en la Figura 4.7, estos indicadores son bastante pequeños, lo que sugiere que las mediciones no varían, considerablemente entre ellas. Otro aspecto que conviene señalar en dicha figura es el comportamiento de la serie de morteros con 5% de escoria EAF; ya que a los 28 y a los 90 días desarrollaron una resistencia igual, o incluso mayor a la serie de morteros sin escoria. Esto se puede asociar a las investigaciones adelante mencionadas que aseguran que la escoria presenta mejor comportamiento a edades tardías; sin embargo, debe tenerse en cuenta que para afirmar esto sería necesario confirmar con más especímenes y a otras edades.

Esta misma tendencia se aprecia en la gráfica de la resistencia a la flexión de los morteros de la serie SA, que se representa en la Figura 4.8, donde se puede observar una disminución más marcada de la resistencia a la flexión cuando se incrementa el porcentaje en peso de escoria. Aunque se destaca el comportamiento de la muestra con un 30% de escoria a las primeras tres edades, que se mantiene similar al 5 y 10% y por encima de la resistencia alcanzada por la serie con 20% de escoria; esto ya no sucede a los 90 días, debido a que el mortero ya había alcanzado su resistencia a la flexión correspondiente y fue menor que el alcanzado por las probetas con menos escoria. A primera instancia, esto sugiere que las mezclas con 30% de escoria empiezan a mostrar un comportamiento anómalo, o al menos fuera de la tendencia; sin embargo, esto se vio reflejado solamente en la resistencia a flexión, no en la compresión. En la última edad, se vuelve a observar la tendencia a la disminución de esta propiedad mecánica, como consecuencia de la sustitución decreciente del cemento.

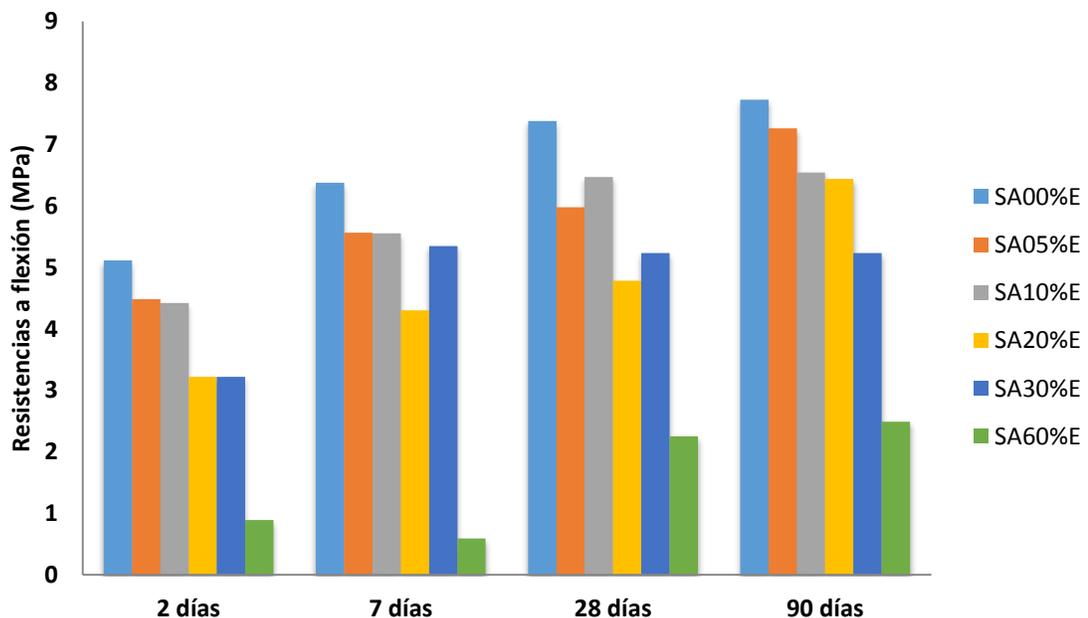


Figura 4.8 Resistencia a flexión de morteros sin aditivo a diferentes edades.

E.E. Hekal y col. [74] y Qiang Wang y col. [75] reportaron en sus respectivos trabajos sobre la hidratación de mezclas de cemento portland con escoria EAF, que al reemplazar el cemento se disminuyen las propiedades cementantes del sistema; y por consiguiente, se afectan las propiedades mecánicas. Lo que ambos investigadores afirman, se refleja en las Figuras 4.7 y 4.8 de esta investigación.

Sin embargo, es importante destacar que la diferencia en los valores de resistencia a la compresión de la muestra de referencia (morteros con 00%E) son mínimos, al ser comparados con los morteros con adiciones parciales de escoria EAF del 5 y 10 % en peso. Además, a las edades de 28 y 90 días, los especímenes con un 5 y 10 % en peso de escoria EAF, sin el uso de aditivo, tuvieron mejores valores de resistencia a la compresión por arriba de los 42.5 MPa que la muestra de referencia con sólo cemento y arena. Por otra parte, debido a que los valores de resistencia a la compresión y flexión para los morteros donde se emplearon porcentajes del 60 % en peso de escoria fueron muy bajos, se decidió no continuar estudiando este porcentaje de adición.

Por otro lado, los valores de resistencia a la compresión a la edad de 28 días fueron 48.28, 48.46 y 45.50 MPa a 0, 5 y 10 % en peso de escoria EAF adicionada, respectivamente. Conviene remarcar estos datos, con la finalidad de hacer una comparación gruesa con los resultados obtenidos por Iacobescu y col. [59] con valores de resistencia a la compresión de 47.5, 46.6 y 42.8 MPa en morteros fabricados con clínker y escoria EAF en sustitución parcial del cemento de belita de baja energía a 0, 5 y 10 % en peso de escoria, respectivamente. Así mismo, Tsaikiridis y col. [15] reportaron un comportamiento similar en valores de resistencia a la compresión con sustituciones parciales de cemento de 10.5 % en peso de escoria EAF. Por esta razón es importante contrastar que, a pesar de haber conseguido resistencias a la compresión bastante cercanas en esta investigación, tenemos a favor que es menos costoso y consume menos energía emplear la escoria EAF sustituyendo en peso al cemento portland, que utilizarla como clínker.

En la actualidad se han desarrollado numerosos aditivos para mejorar las propiedades del concreto que ya son de uso común y han sido bien aceptados por investigadores e industriales. Los aditivos utilizados en este proyecto son superplastificantes a base de policarboxilatos y fueron empleados con la finalidad de mejorar la trabajabilidad del mortero en estado fresco con una buena consistencia como la recomendada en la norma UNE-EN 1015-3. Adicionalmente, estos aditivos fueron utilizados para disminuir la cantidad de agua empleada en las mezclas, dado que ambos aditivos utilizados son reductores de agua que disminuyen la porosidad, mejorando las propiedades de resistencia y durabilidad [76]

En la Figura 4.9 se presenta un gráfico de la relación agua/cemento o agua/material cementante, que en este trabajo se utiliza indistinto, para cada porcentaje de adición de escoria EAF en el mortero, de acuerdo con la consistencia. Es decir, se realizaron primero mediciones del valor de escurrimiento en una mesa de sacudidas para un mortero de referencia sin aditivos y sin escoria incluida en el mortero. La media de estas tres mediciones fue 17.1 cm, para que la consistencia entre los diferentes morteros con escoria y superplastificantes sean comparables entre sí, no debe haber variación del 10% de su valor de escurrimiento respecto al mortero referencia. Sin embargo, 10% es un nivel amplio, y de hecho, los morteros fabricados no presentaron una variación por arriba del 5% con respecto a la referencia (16.2 – 18.0 cm de valor de escurrimiento en la mesa de sacudidas). La trabajabilidad del mortero es un aspecto muy importante de la mezcla, cuando se lleva a la práctica, de ahí la razón de usar la consistencia como base para establecer la cantidad de agua requerida en las mezclas [23].

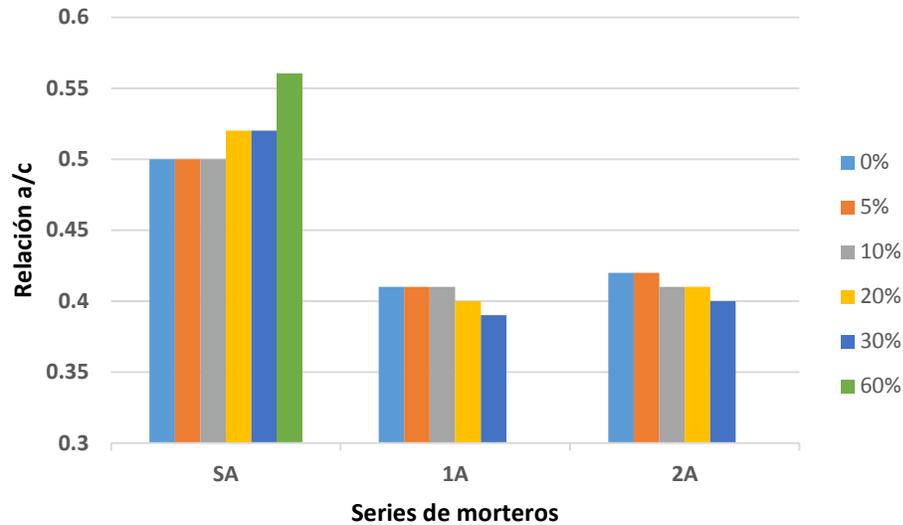


Figura 4.9 Relación agua/cemento empleada en la fabricación de las tres series de morteros con diferentes porcentajes de escoria adicionada.

El motivo de utilizar superplastificantes a base de policarboxilatos es porque se ha demostrado que son más efectivos que los de ácido naftalensulfónico (SNF). Además, estos compuestos son ampliamente recomendados para morteros y concretos con baja relación agua/cemento ya que su actividad disminuye al aumentar dicha relación [77], comportamiento observable en la Figura 4.9.

En las Figuras 4.7, 4.10 y 4.11 se puede observar que, en general, los morteros con 5 y 10 % de escoria EAF presentan una buena resistencia a la compresión en comparación con las mezclas de referencias (sin escoria EAF). Incluso cuando no se utilizan aditivos (Figura 4.7) se puede observar que con un 5 % de escoria en las dos últimas edades, los especímenes igualaron y posteriormente superaron los MPa alcanzados por la muestra de referencia. Ahora bien, con el uso de ambos aditivos, los valores de las resistencias alcanzadas por los morteros con 5 y 10 % de escoria EAF son aún más cercanos a los morteros que no contienen escoria (1A00%E y 2A00%E).

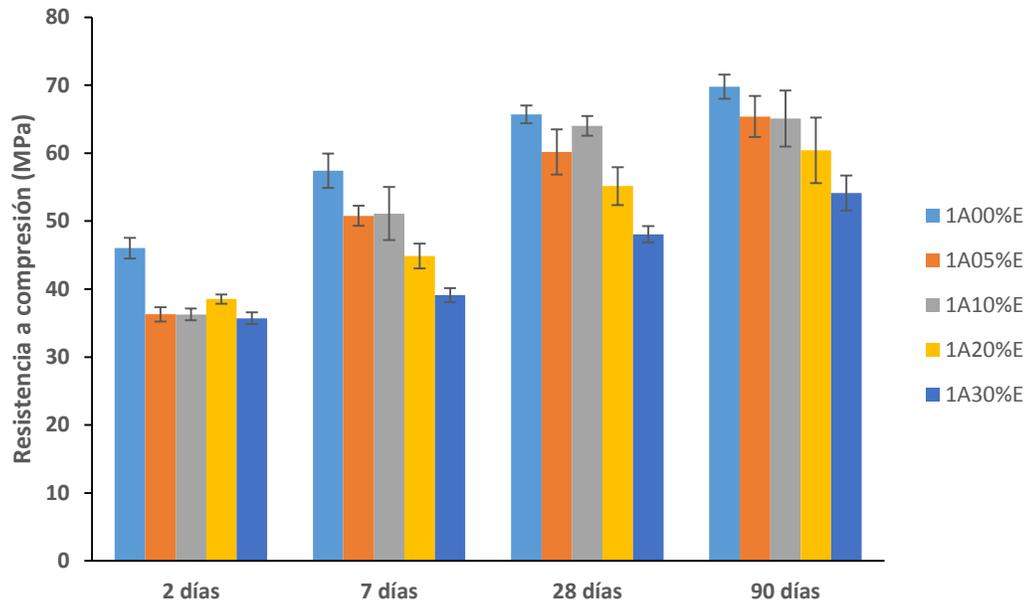


Figura 4.10 Resistencia a compresión de morteros con aditivo 1 en diferentes edades.

Se puede observar en las Figuras 4.10 y 4.11 que con el aditivo 1 y el 2 a la edad de 28 días, las series de morteros adicionados con un 5 % y un 10 % con escoria EAF alcanzan valores de resistencia a la compresión comparables con respecto al mortero de referencia sin escoria EAF. Sin embargo, es importante señalar que con el aditivo 1 los morteros con escoria tardan más en desarrollar dicha resistencia que el aditivo 2. En cambio, con el uso del aditivo 2 se alcanzan resistencias similares comparados con el mortero sin escoria a edades tempranas de 2 y 7 días. Y en cuanto a valores totales, al final del experimento; es decir, a 90 días, cuando el sistema cementante ya debería ser estable, los morteros con el segundo aditivo alcanzaron mayor resistencia, aunque las diferencias se expresan en unos pocos MPa.

Respecto a las barras de error, se observa en términos generales, que los datos que más se separan de la media son los de las series con adiciones de 20 y 30% de escoria. Sin embargo esta tendencia no es muy clara en la Figura 4.10 en comparación con la Figura 4.11, lo que podría sugerir que los valores de los morteros con el superplastificante dos eran más inestables cuando se

adicionaban los porcentajes de escoria EAF antes mencionados. Lo que pudiera ser resultado de un amasado no muy homogéneo, es decir, que el excedente de escoria no se haya distribuido homogéneamente en toda la mezcla ocasionando que unas probetas (de la misma amasada) tuvieran asentamientos irregulares de escoria lo que propiciara una variación mayor en los datos de la misma serie.

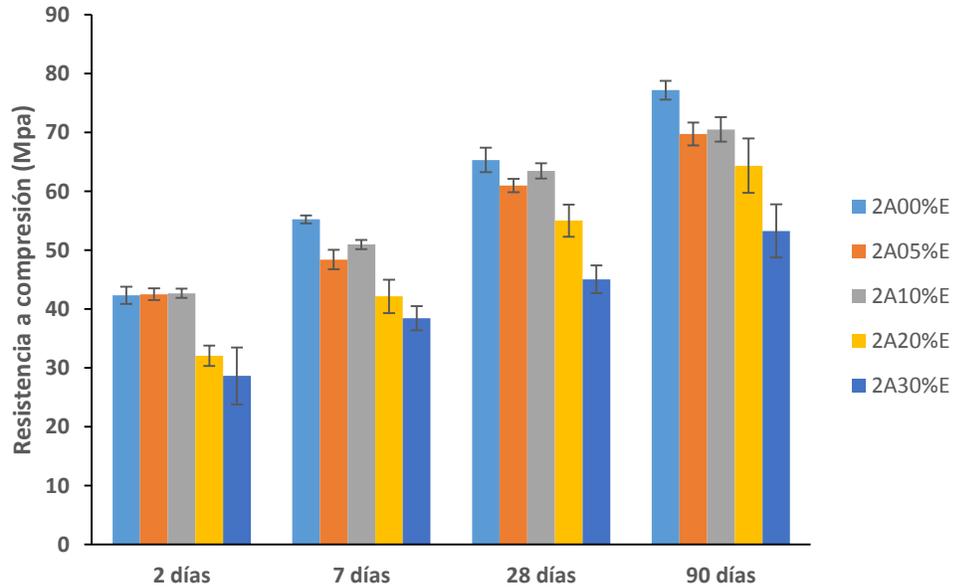


Figura 4.11 Resistencia a compresión de morteros con aditivo 2 en diferentes edades.

En cuanto a las resistencias a flexión ensayadas para las mismas series de morteros con aditivos 1 y 2, se obtuvieron las gráficas presentadas en las Figuras 4.12 y 4.13, respectivamente.

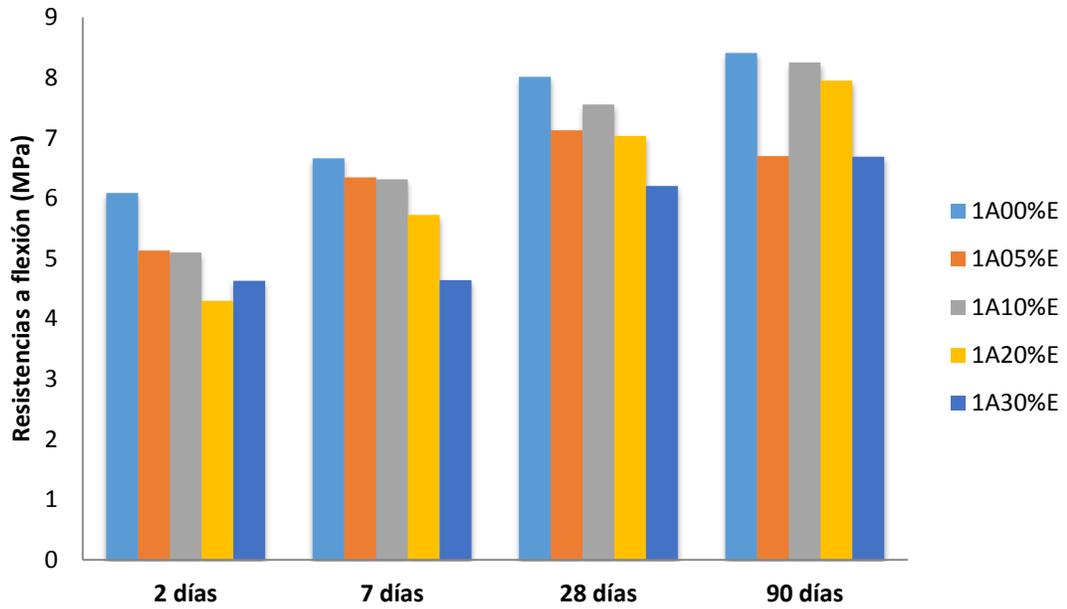


Figura 4.12 Resistencia a flexión de morteros con aditivo 1 en diferentes edades.

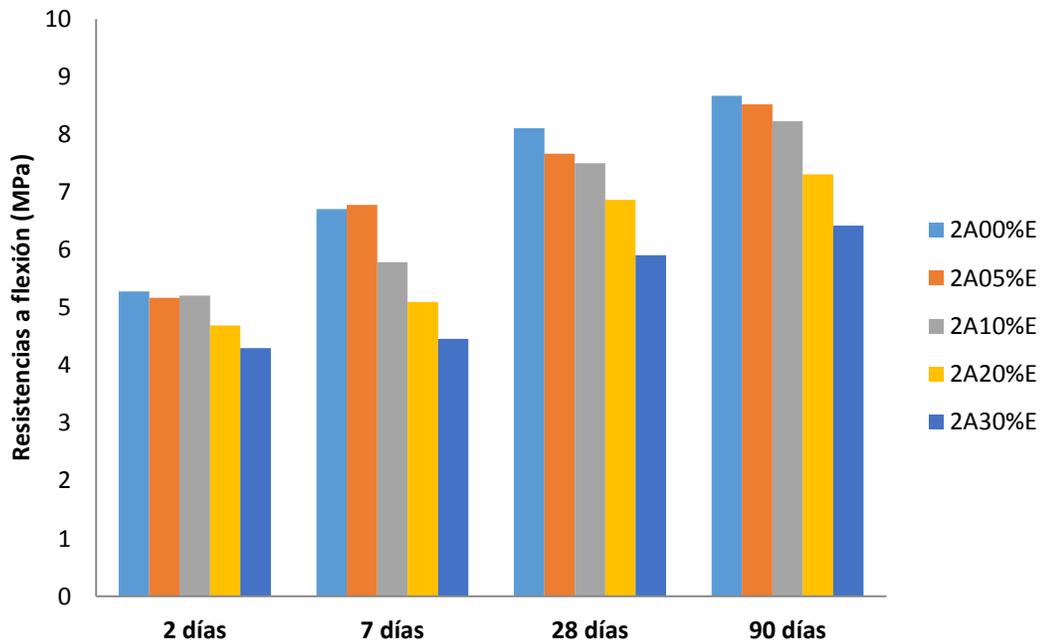


Figura 4.13 Resistencia a flexión de morteros con aditivo 2 en diferentes edades.

Respecto a la resistencia a flexión, se obtuvieron mejores resultados con el mortero de 10% de escoria incluida cuando se usaba en la mezcla el primer aditivo. Por otro lado, esta propiedad mecánica se vio favorecida en la adición del 5% de escoria, cuando se usaba el aditivo número 2. Aunque, en general, es muy poca la diferencia desarrollada por los morteros con uno u otro aditivo, a las diferentes edades y con las distintas concentraciones de escoria EAF, cabe destacar que el comportamiento esperado para estas mezclas, que la propiedad mecánica se vea reducida al aumentar la cantidad de escoria, se cumple claramente con el superplastificante 2. Pero, al igual que sucede con la resistencia a flexión, la diferencia entre los morteros con 5 y 10% de escoria frente al mortero de referencia (1A00%E y 2A00%E) no es muy significativa; pues, como se observa en las Figuras 4.12 y 4.13, se refleja solo en décimas de unidad.

La manera en como los superplastificantes actúan frente al cemento ha sido un tema de estudio que se vuelve complejo debido a la diversidad de aditivos existentes en el mercado y a la variabilidad de un cemento a otro. Entre los pioneros en este tema se encuentran Uchikawa y col. [78] quienes reportaron que, además de las fuerzas electrostáticas involucradas en esta interacción, también tienen efecto las fuerzas de repulsión estérica. Estas últimas contribuyen de forma predominante a la dispersión del cemento y sus productos hidratados, en presencia de un aditivo compuesto por una larga cadena de carbonos con cadenas laterales ramificadas. Estas estructuras favorecen la formación de una capa de absorción que contiene muchas regiones de alta densidad, que se acomodan unas sobre otras en la superficie de una partícula de cemento. Los resultados que se obtuvieron en el presente trabajo concuerdan con lo reportado por Palacios y col. [80] respecto a que los policarboxilatos hacen más fluidas las mezclas de cemento-escoria que las mezclas conteniendo solamente cemento (aunque la escoria que emplearon en esa investigación era distinta de una EAF). Flatt y col. [79] atribuyen dicho efecto a que en las pastas sin escoria parte del policarboxilato es empleado por el C_3A para formar una fase organomineral, dejando menos mezcla disponible en la fase acuosa para dispersar los granos de cemento. Por lo tanto, incrementando la cantidad de

escoria y disminuyendo la de cemento, el C_3A disponible para interactuar con el policarboxilato se ve reducido según lo observado por Palacios y col. [80], lo que explica la buena fluidez de las mezclas con escoria. La fluidez de los morteros elaborados en esta investigación se reporta mediante el valor de escurrimiento que se presenta en la Tabla A-I.1, correspondiente al Apéndice I de este trabajo.

4.3 Determinación de la reactividad álcali – sílice

Manso y col. [81], además de Juckes y col. [82], han reportado que la utilización de escorias EAF como agregado presenta tendencia a la expansión. Por lo anterior, en este trabajo de tesis se hicieron mediciones de barras de mortero de referencia y de mortero con un 30% de escoria incorporada en el mortero. La principal razón para realizar este ensayo empleando el 30% y no una concentración distinta fue para favorecer la aparición de un efecto negativo (expansivo) en caso de haberlo pues este tipo de manifestaciones patológicas comprometen la durabilidad y la vida útil de las estructuras.

Las mediciones de expansión en las probetas se realizaron de acuerdo con lo establecido en la norma UNE 146508 EX, la cual sugiere hacer las mediciones de longitud hasta los 14 días. Sin embargo, en este proyecto se hicieron hasta los 30 días, únicamente para comprobar si la estabilidad de las probetas se mantenía o si, con mayor tiempo de exposición, la expansión se excedía del límite permitido. Además, con la finalidad de observar el comportamiento de los morteros a la expansión, se analizaron los morteros de referencia y con escoria.

En la Figura 4.14 se muestran las mediciones de las diferencias de longitud expresadas en porcentaje que presentaron las barras de referencia y las barras con escoria EAF con respecto al tiempo, es decir a los 30 días de duración del experimento.

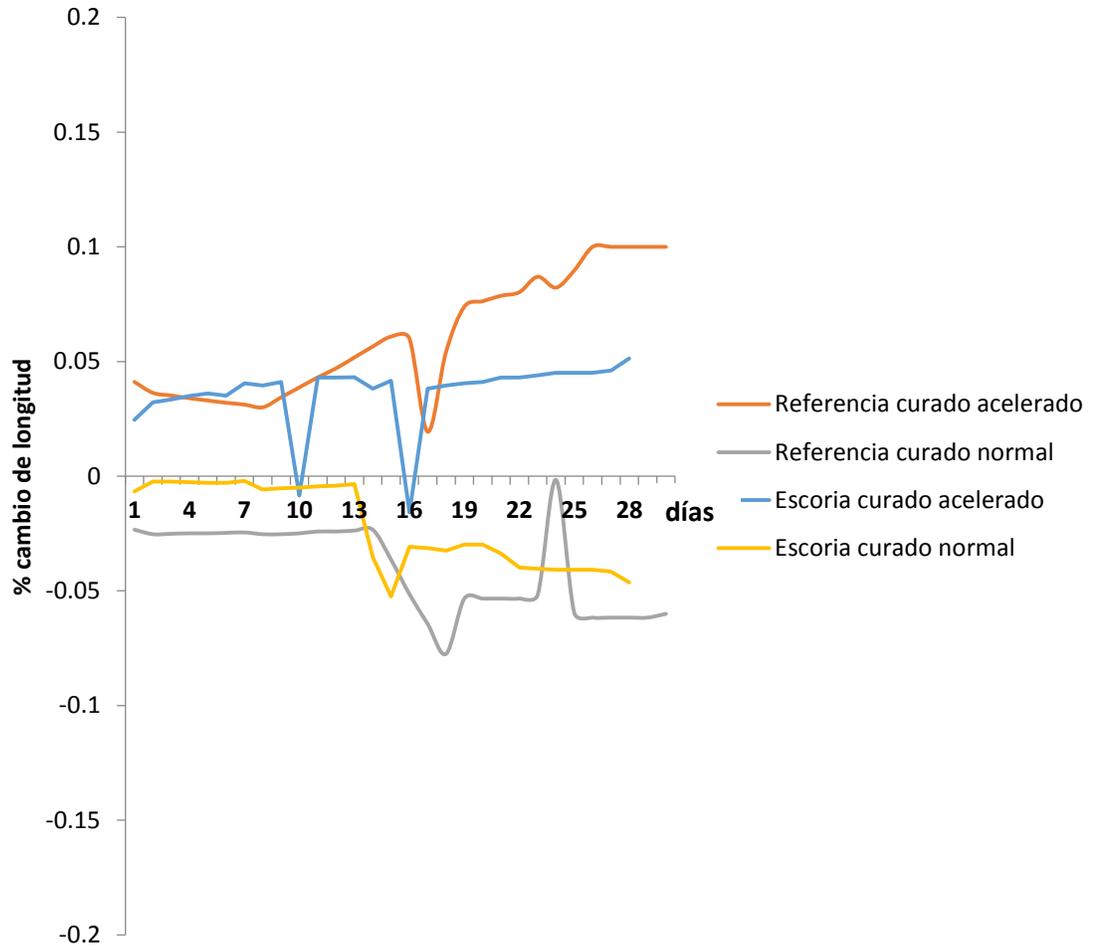


Figura 4.14 Porcentajes de cambios de longitud en probetas de referencia y con 30 % de escoria EAF contra tiempo.

Varias observaciones surgen de la Figura 4.14, una muy notoria corresponde a los picos a la baja de las diferentes series entre los días 15 y 18. Éstos se atribuyen a una anomalía que presentó el equipo de medición ese día; ya que es importante sugerir que cada serie de barras se amasó un día distinto; por lo tanto, el día que las probetas eran medidas, cada espécimen tenía diferente edad. Por otro lado, es básico recordar que para la obtención de esta gráfica se promedió el comportamiento de varias barras y por ejemplo, para el caso de la barra de referencia sometida a un curado normal se muestra al día 24 un pico hacia arriba. Esto se puede atribuir a que ese día una de las barras de esa serie perdió peso. Dicha pérdida pudo ser consecuencia del choque con otra barra al transportarlas o por fricción o golpe al momento de colocarlas en su sitio en la

cámara de curado. Para monitorear las pérdidas de masa, los especímenes se pesaban siempre después de medirlos.

Otra observación que puede realizarse de la Figura 4.14 es que los especímenes de la serie de referencia que fueron sometidos a curado acelerado fueron los que mostraron mayor cambio de longitud, mientras que las otras dos series (incluyendo la que contenía un 30% de escoria y expuesta a un curado acelerado) tuvieron fluctuaciones menores que no sobrepasaron el 0.1% de variación en la medición de longitud que establece la norma UNE 146508 EX hasta los 14 días o por la norma ASTM 1260 [83] hasta los 16 días. De lo anterior, se pudiera concluir que la escoria EAF en la matriz no es reactiva o inocua según la norma UNE 146508 EX y ASTM 1260, respectivamente.

Cavalcante-da Silva y col. [84] consideran más apropiado utilizar análisis petrográfico para evaluar la expansión en morteros. Martín y col. [85] reportan que es mejor utilizar el método de reactividad superficial para el mismo propósito que el de barras de mortero, ya que puede variar según las regulaciones de cada país o región en cuanto al tiempo de medición y los límites de expansión. Motz y col. [86] mencionan que tanto la estabilidad volumétrica como la capacidad de lixiviación son características de gran importancia que deben ser analizadas en cualquier material que se quiera adicionar como agregado o binder. Sin embargo, en la práctica el método de las barras de mortero es de gran aceptación. Por otra parte, cabe mencionar que el comportamiento de los especímenes de mortero con escoria EAF fue bastante regular, quedando como inocuo en todas las mediciones realizadas.

En la Figura 4.15 se muestran los especímenes de referencia y los que contienen escoria con un envejecimiento de 6 meses y en donde se pueden observar eflorescencias o acumulación de cristales de ciertas sales, como las mencionadas por Pellegrino y col. [87]. De izquierda a derecha, las dos primeras probetas son de referencia y estuvieron expuestas a calor y medio alcalino. Las siguientes tres probetas de la derecha tienen un 30% de escoria EAF y estuvieron expuestas a las mismas condiciones que las muestras de referencia.

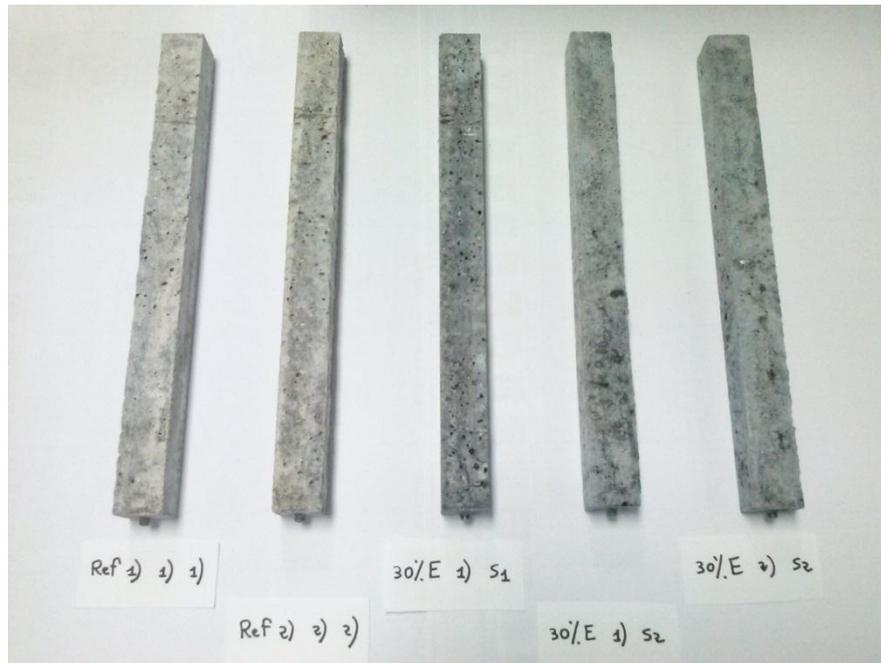


Figura 4.15 Especímenes de referencia y con 30% de escoria EAF mostrando eflorescencias sobre la superficie.

La presencia de óxido de calcio libre y de óxido de magnesio suelen ser la causa del fenómeno expansivo que es común en este tipo de escorias. Wang y col. [88] reportaron que la expansión se produce cuando el óxido de calcio, en contacto con el agua, se hidrata muy rápidamente, causando expansión volumétrica, mientras que el óxido de magnesio se hidrata más lentamente, lo que hace más largo el proceso de expansión. El aumento en volumen de los especímenes se debe a la aparición de geles (lisos o gruesos) calcoalcalinos producidos en el ataque con NaOH y alta temperatura.

Pellegrino y col. [87] reportaron que en los especímenes que sufren expansión volumétrica es común observar la presencia de eflorescencias blanquecinas sobre la superficie, cuya composición consiste de óxidos de calcio, silicio, magnesio y aluminio, lo cual puede deberse a la matriz cementante y no necesariamente al componente adicionado. Es importante señalar que en esa investigación no se encontró hierro en dichas eflorescencias.

4.4 Microestructura

Desde sus inicios, la microscopía electrónica de barrido ha sido una herramienta fundamental en la caracterización microestructural de materiales de construcción, como son los morteros [89].

En el análisis de la morfología y porosidad, tanto en los especímenes de referencia, como en los que contienen escoria, fue necesario utilizar la señal de electrones secundarios. En la Figura 4.16 se muestra una micrografía del mortero de referencia con un periodo de 90 días de envejecimiento y en donde se pueden observar defectos como un poro semiesférico de un diámetro aproximado a las 100 μm y una microgrieta muy notoria. Alrededor del poro se tiene una composición normal de pasta y agregado, y en su interior se conforma de silicato de calcio como se aprecia en la Tabla 4.5; sin embargo, la superficie de la muestra se carbonató, debido al tiempo y exposición al ambiente, lo que se refleja en el alto contenido de carbono de los EDS. La formación de este tipo de defectos, como lo son los poros y las grietas en el mortero pudieran atribuirse a que fue utilizada una alta relación agua/cemento de 0.5, lo que favorece la formación de este tipo de defectos superficiales e internos.

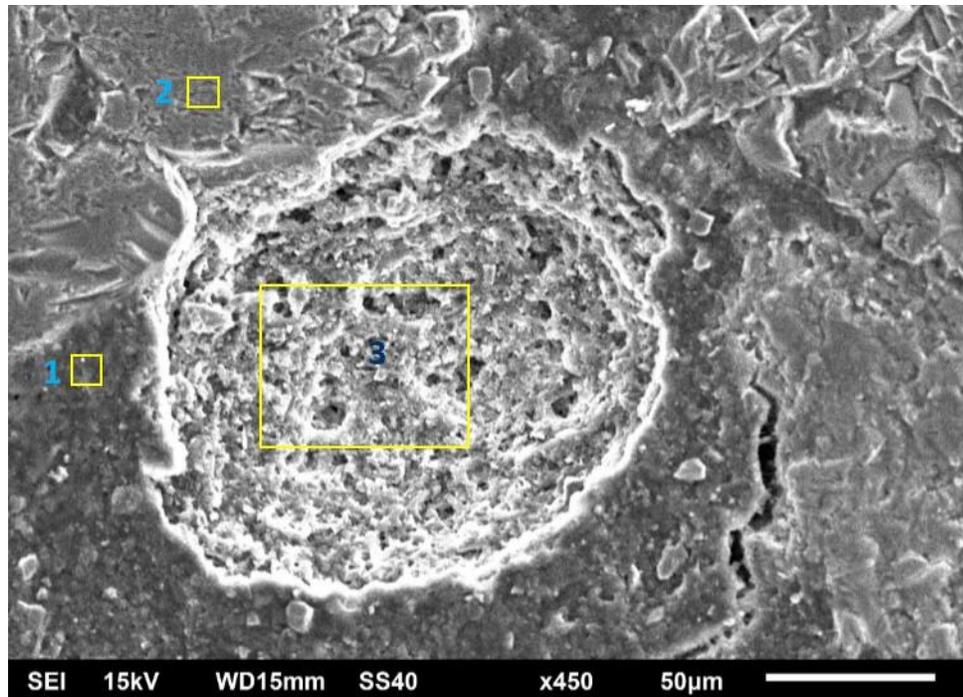


Figura 4.16 Mortero de referencia a 90 días.

Tabla 4.5 EDS de los puntos señalados en la Figura 4.16.

Elemento	Punto 1	Punto 2	Punto 3
C	69.45	44.84	62.56
O	20.95	36.38	23.39
Al	0	0.97	0
Si	8.02	13.7	11.81
Cl	1.57	1.26	2.24
Ca	0	2.85	0
Total	100	100	100

Para evitar la formación de poros y grietas es importante utilizar aditivos superplastificantes y una relación agua/cemento menor. En la Figura 4.17 se muestra una micrografía de un mortero, a una edad de 90 días, con 10 % en peso de escoria EAF y una relación agua/cemento de 0.41 y en donde se observa una microestructura más sólida y libre de poros.

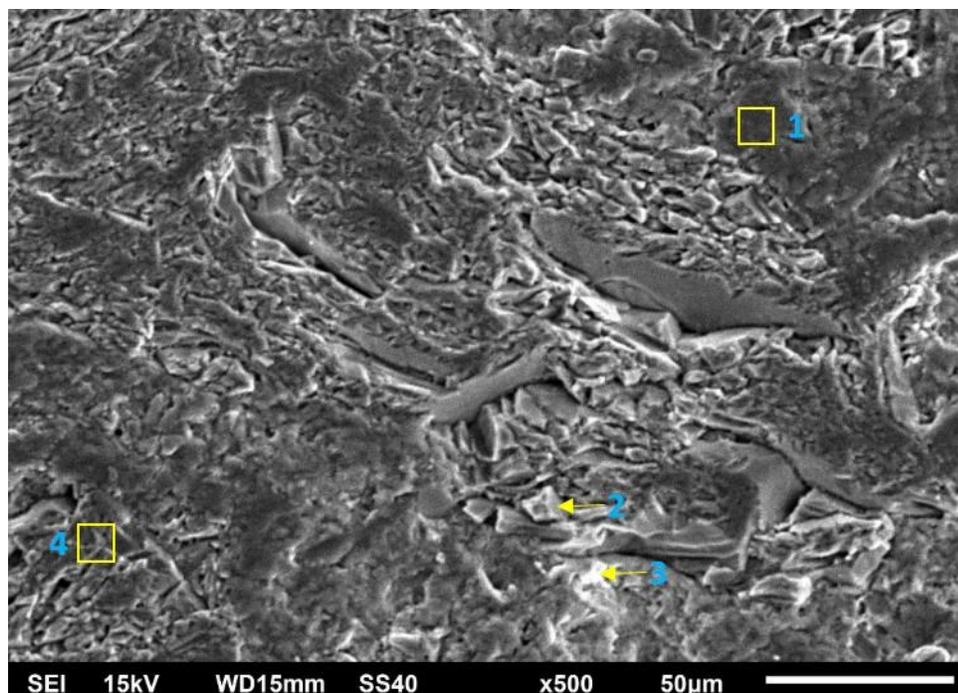


Figura 4.17 Mortero con 10% de escoria EAF y superplastificante 1 a 90 días.

Tabla 4.6 EDS de los puntos señalados en la Figura 4.17.

Elemento	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
C K	14.23	6.88	13.76	15.48
O K	46.95	59.26	50.22	48.18
Al K	1.73	0	1.87	0
Si K	5.36	33.86	7.43	36.34
K K	0.77	0	0	0
Ca K	30.97	0	26.72	0
Total	100	100	100	100

Es importante mencionar que los análisis EDX de tipo semicuantitativo de esta etapa experimental se hicieron sobre muestras pulidas y empleando electrones retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés), para un mejor contraste químico. La señal de BSE proporciona una imagen bidimensional y se pueden contrastar las diferentes fases sobre una matriz utilizando una escala de 250 tonos de grises, desde el blanco hasta el negro; pero es aparentemente, de menor resolución que la señal de electrones secundarios (SE, por sus siglas

en inglés). Por lo tanto, en la Tabla 4.6 se representan los porcentajes en masa de los elementos en los puntos marcados en la Figura 4.17, según lo cual, se observa una composición ordinaria de un mortero de cemento portland. Por los porcentajes, se puede deducir que el punto 1 corresponde a la fase Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), el punto 2 es un grano de arena, el punto 3 puede atribuirse a un silicoaluminato de calcio y el 4 a otro grano de arena; sin embargo este mortero contiene un 10% de escoria lo cual no se ve reflejado del todo en los EDS, puesto que se esperaría encontrar granos brillantes de este residuo con importante contenido de hierro, aunque ciertamente, un 10% de escoria es un porcentaje relativamente bajo para sobresalir en los análisis puntuales.

Scrivener y col. [90], además de Diamond y col. [91] reportaron que las fases de alta densidad electrónica presentan coeficientes de dispersión muy altos y son visualmente más brillantes. Como es sabido, la mayoría de los productos de hidratación son compuestos de menor densidad electrónica, por lo que en estas investigaciones se observaban como compuestos de poco brillo.

En la Figura 4.18 se muestra una micrografía de un espécimen de referencia, a una edad de 90 días y los análisis realizados en la microestructura fueron identificados con un número para una rápida localización y su respectivo EDS se muestra en la Tabla 4.7, para comparar los porcentajes en peso de los elementos presentes. En esta micrografía se pueden observar partículas opacas de arena de sílice identificadas con el número 1, 3 y 7, de morfología irregular con tamaño muy variable. El punto 2 forma parte de una fase de aluminato de calcio y es evidente por su brillantez; pero comparado con el Fe es menos brillante. El punto 4 es una zona que pertenece, mayormente al gel C-S-H, sin embargo, el alto contenido de Si pudiera significar que el haz electrónico tomó información del análisis correspondiente a una fracción de un grano de arena. Los puntos 5 y 6 son similares entre sí respecto a su composición química, ambos pertenecen a zonas de gel C-S-H. El análisis también mostró la particularidad de que el punto 6 presenta un brillo que se pudiera atribuir a un contenido bajo de Fe, y como éste es un mortero de referencia la presencia de Fe

se atribuye a la composición original del cemento que, en efecto, incluye a dicho elemento.

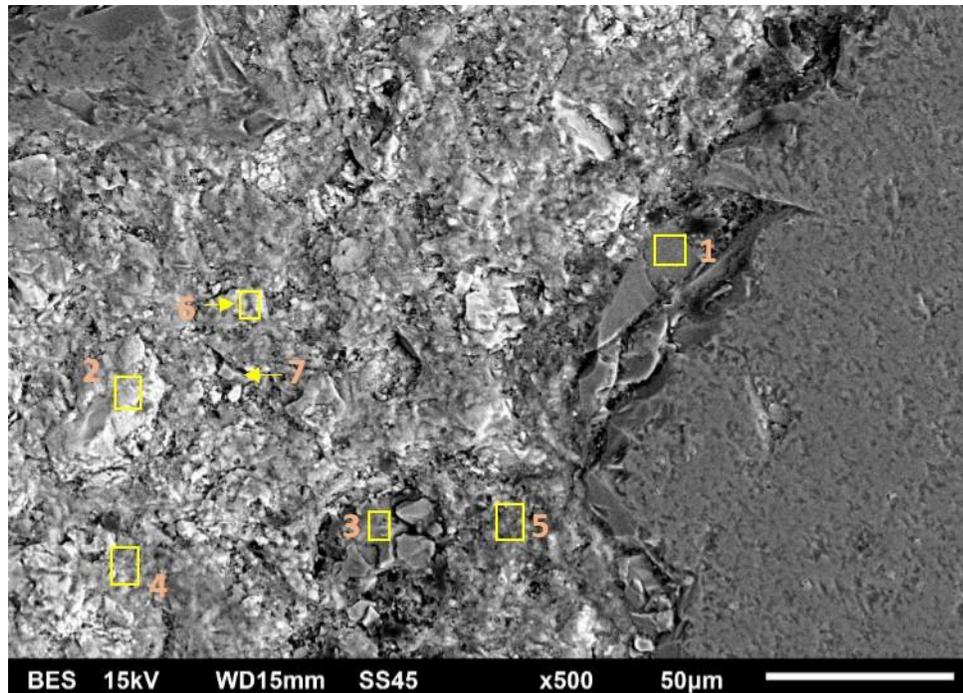


Figura 4.18 Mortero de referencia con 90 días de edad.

Tabla 4.7 EDS correspondiente a los puntos identificados en la Figura 4.18.

Elemento	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7
C	4.51	9	0	6.54	25.21	11.93	14.58
O	50.87	39.06	55.23	46.8	38.85	43.82	25.7
Al	0	12.51	0	0	1.65	2.5	0
Si	44.61	2.99	44.77	31.05	9.45	9.57	57.7
K	0	0.51	0	0	0.48	0	2.03
Ca	0	33.8	0	15.61	24.36	29.22	0
Fe	0	2.14	0	0	0	2.96	0
Total	100	100	100	100	100	100	100

En la Figura 4.19 se muestra la micrografía de un mortero con un 30 % de escoria EAF, a una edad de 7 días y en la Tabla 4.8 se presentan los EDS de los puntos analizados. Se pueden apreciar partículas de escoria EAF distribuidas

en la matriz, con tamaños variados; por ejemplo, el punto 1 es el grano de escoria más grande en esta microárea con un tamaño de alrededor de 20 micras de largo y localizadas debajo de él, pero sin marcar, se tienen otras partículas menores, lo que podría ser un indicio de que, en concentraciones mayores, la escoria tiende a aglomerarse. En esta misma figura, otros puntos de escoria EAF son 2, 3 y 5. El punto 5 es una partícula pequeña menor que 3 micras, pero que al igual que el punto 1, muestra una alta concentración de Fe. Por el contrario los puntos 2 y 3 pertenecen a granos de escoria que su concentración mayoritaria se compone de hierro y calcio. Esto sucede porque la composición química de la escoria EAF de esta investigación no es homogénea, como ya se discutió al inicio de este capítulo. Los puntos 4 y 6 pertenecen a la matriz de C-S-H, mientras que el punto 7 a un grano de arena. La identificación de las fases en los morteros de este trabajo de tesis estuvo basada principalmente en las relaciones Si/Ca, Al/Ca, como se muestra en la Figura 4.20 de la primera sección del trabajo de Famy y col. [92] y el contenido de Fe obtenidos por medio de SEM EDS.

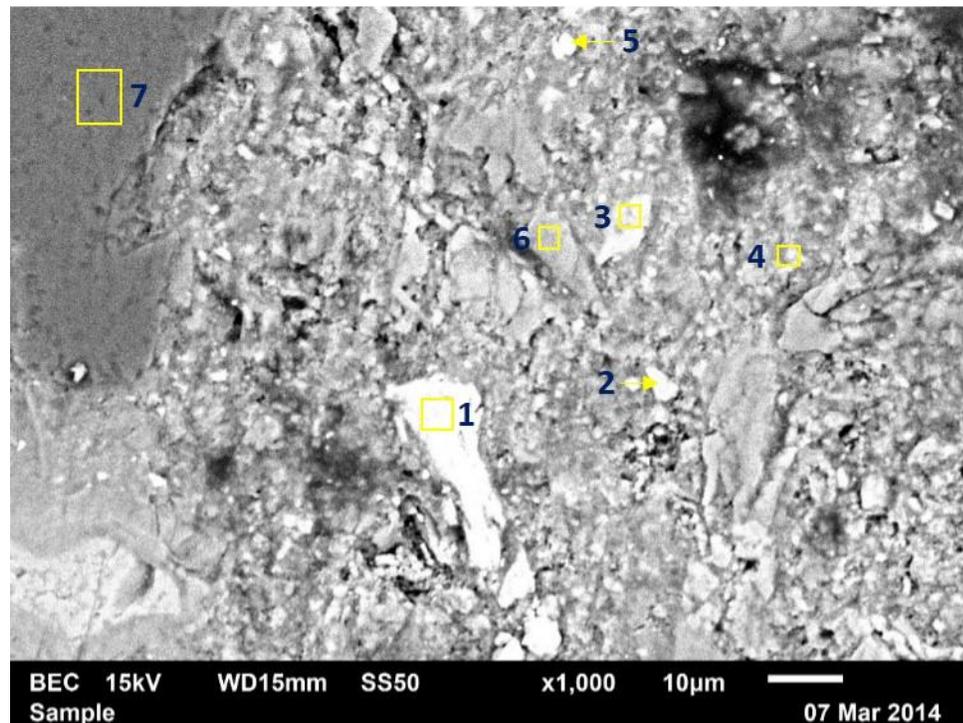


Figura 4.19 Micrografía de un mortero con 30% de escoria EAF con aditivo 2 y 90 días de edad.

Tabla 4.8 EDS correspondiente a los puntos identificados en la Figura 4.19.

Elemento	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7
C	3.94	4.96	9	16.7	5.54	9.54	6.15
O	29.01	37.73	34.64	39.58	30.68	42.38	48.18
Mg	3.57	0.64	0	0	4	0.5	0
Al	0	8.6	2.39	2.93	0	1.26	0
Si	0	1.42	5.92	8.83	1.06	12.68	45.67
S	0	0	0	0.63	0	0.6	0
Cl	0	0	0	0.56	0	0.56	0
K	0	0	0.41	0.69	0	0	0
Ca	0.99	28.83	28.39	28.61	3.58	32.48	0
Fe	58.18	17.08	19.25	1.47	49.89	0	0
Mn	4.31	0.74	0	0	5.25	0	0
Total	100	100	100	100	100	100	100

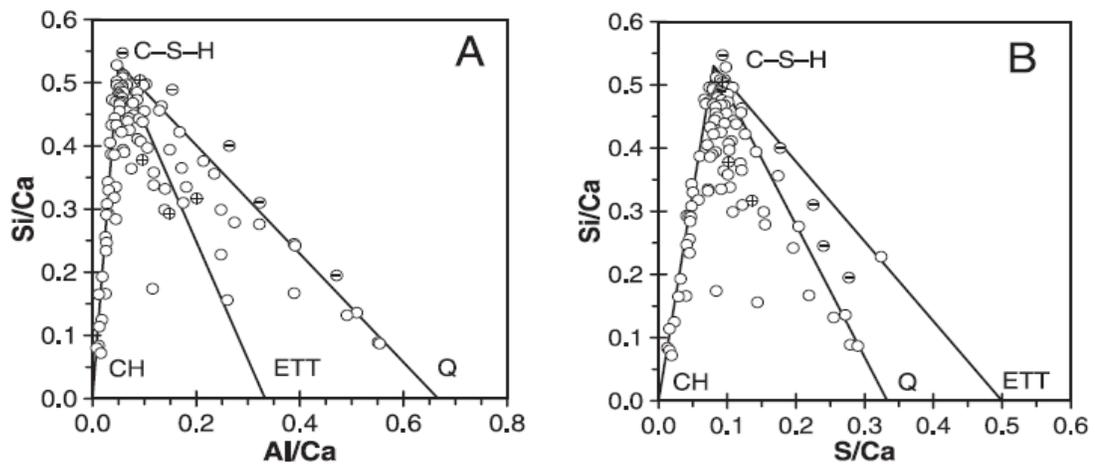
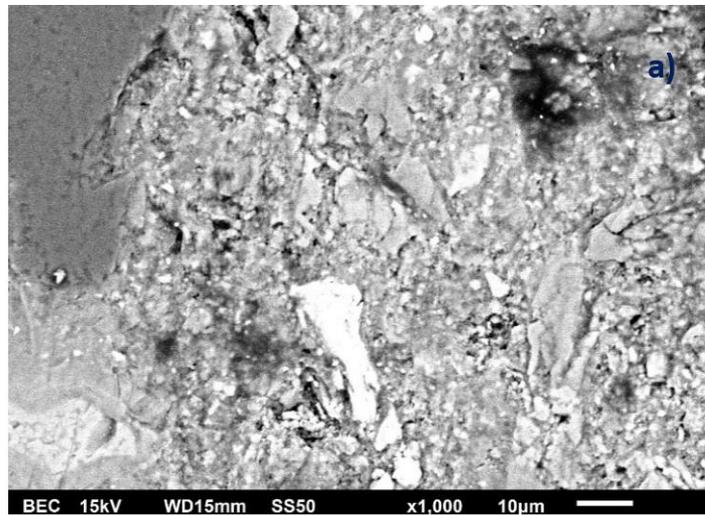


Figura 4.20 Gráficas de proporciones atómicas Si/Ca vs Al/Ca (A) y gel C-S-H vs S/Ca (B) [92].

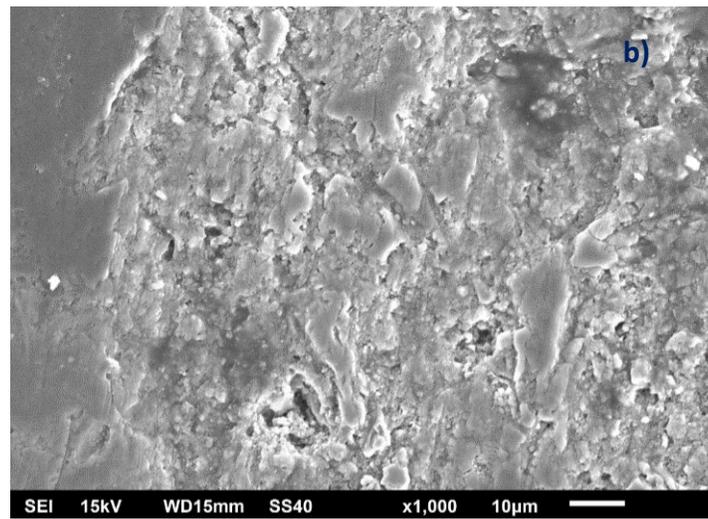
Las diferencias más notorias encontradas en la morfología se presentaron en algunas aglomeraciones de escoria EAF. Por medio de la señal de electrones retrodispersados (BSE), se detectó que la escoria EAF se encontraba, de manera general, bien distribuida en la matriz de las muestras de mortero. En la Figura

4.19, es importante señalar que las partículas de escoria, en general, parecen estar bien integradas a la pasta y no forman una zona de transición interfacial, al menos no fue muy notoria, como sí sucede con los agregados. Como un ejemplo de lo anterior, está el caso de un grano de arena grande y opaco que se encuentra en la esquina superior izquierda de la micrografía (punto 7).

Además, se muestra la Figura 4.21 para resaltar la importancia de emplear BSE: (a), debido a que ocurren contrastes composicionales de las diferentes densidades electrónicas, y por lo tanto, de la composición de los morteros, difícilmente se podrían haber percibido en SE (b) a excepción de pocos casos por motivo de la morfología. Se debe señalar que la modulación del contraste en el SEM fue una guía importante para la identificación de las fases presentes en la microestructura de los morteros.



a) Micrografía en señal de electrones retrodispersados.



b) Micrografía en señal de electrones secundarios.

Figura 4.21 Mortero con 30% de escoria EAF con aditivo 2 a una edad de 90 días en BSE (a) y en SE (b).

Por último, se muestra el mapeo de rayos-x de una muestra de un mortero con un 30% de escoria EAF, sin aditivo y con 90 días de edad en la Figura 4.22. Donde es posible observar una partícula de escoria en el centro de la imagen a) la cual resalta por su brillantez y por ser la zona predominante en la imagen, c) que corresponde al elemento hierro. Las imágenes b) y d) muestran los elementos calcio y silicio, respectivamente. Con estas dos últimas imágenes se conforma el gel C-S-H, es decir los silicatos de calcio hidratados y que en esta fase la escoria

está sólo inmersa, sin formar parte de ella. Esto podría explicar el por qué las proporciones correspondientes a la relación Si/Ca y Ca/Al de las Figuras 4.18 y 4.19 realmente no se aprecian alteradas.

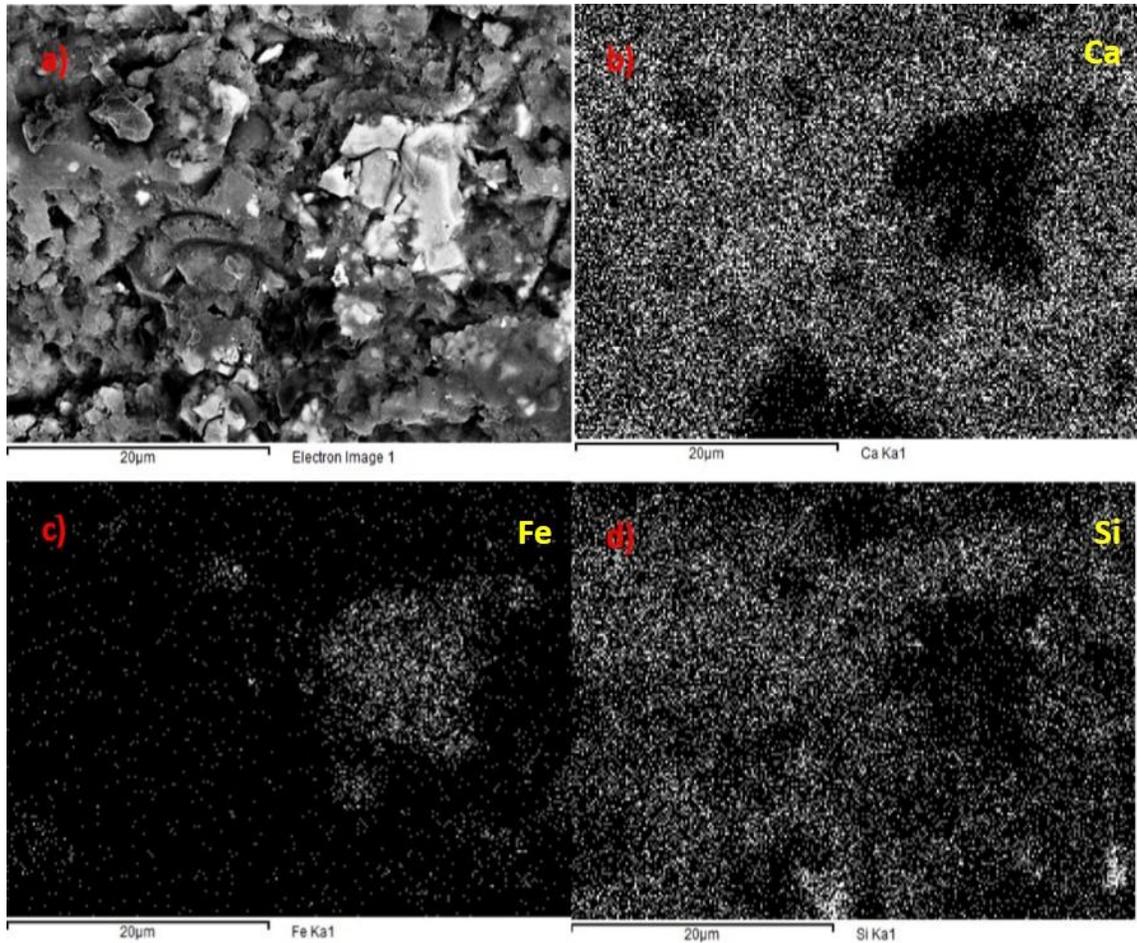


Figura 4.22 Mapeo de un mortero con 30 % de escoria EAF y 90 días de edad. Donde (a) es la imagen original, (b) mapeo del elemento calcio, (c) mapeo del elemento hierro y (d) mapeo del elemento silicio.

Diversas investigaciones se han realizado con el propósito de adicionar a la matriz cementante algunos subproductos de la industria; pero en muy pocas ocasiones se han reportado los cambios sucedidos a nivel microestructural. Yeong-Nain Sheen y col. [93] sugieren en su estudio que al reemplazar un 30% de la escoria de acero inoxidable se obtienen productos de hidratación muy similares a los de una reacción normal; es decir, con el gel C-S-H y cristales CAH

en las micrografías de sus especímenes. En este proyecto de tesis no se pudieron observar diferencias notorias entre los productos de hidratación formados en los morteros con y sin algún porcentaje de escoria, al menos no se observaron reflejadas en su morfología. Lo cual se atribuye a que la escoria EAF al ser no reactiva e inocua, al menos en las condiciones en que es adicionada en estos morteros, no interfiere con las reacciones ordinarias, y por lo tanto, los productos de hidratación que se generan no muestran alteraciones.

Conclusiones

Se especifica que las conclusiones que a continuación se presentan fueron obtenidas bajo las condiciones de los objetivos establecidos, con los materiales utilizados propuestos y el programa de experimentos que se describió para este trabajo de investigación:

1. Se encontró que los metales peligrosos analizados (Cr, As y Se) no se lixivian de la escoria en cantidades que superen lo estipulado por la norma NOM-053-SEMARNAT para toxicidad ambiental. A este respecto, sería seguro emplearla en un mortero de cemento portland.

2. La escoria EAF empleada en este proyecto está constituida, principalmente, de hierro. Sin embargo, debido a que la composición química no es totalmente homogénea, se encontraron partículas ricas en hierro y otras ricas en calcio.

3. La escoria contiene, principalmente, fases de óxidos de hierro como la Magnetita, Maghemita y Wustita, pero también hay presencia de fases distintas a esta familia de óxidos, como Mayenita y Larnita.

4. Por medio de técnicas de caracterización, como SEM EDS, se encontró que la escoria EAF, tratada bajo las condiciones propuestas en este trabajo, se presenta embebida dentro de la matriz del mortero de manera estable y sin reaccionar.

5. Se concluye también que la escoria EAF empleada tenía un efecto sinérgico frente a los dos superplastificantes usados en esta investigación; ya que, se mejoraba la fluidez del mortero fresco y consumían menos agua que los morteros sin escoria.

6. Al incrementar el porcentaje de adición de la escoria EAF y restarlo de la cantidad total de cemento, se pudo observar una tendencia a la baja en cuanto a las propiedades mecánicas evaluadas tales como la resistencia a la compresión. Sin embargo, los mejores resultados de resistencia a la compresión de la serie de morteros que no contenían aditivos, se obtuvieron con la incorporación del 5 y 10 % en peso de escoria EAF.

7. De acuerdo con la norma empleada para evaluar la reacción álcali – sílice, la escoria EAF de esta investigación no indujo expansión en el mortero, por lo que se considera no reactiva en la manera y concentración en que se utilizó en el mortero.

Recomendaciones

Con base en la experimentación, las observaciones y la revisión bibliográfica realizadas para el presente trabajo de investigación, se presentan las siguientes recomendaciones para trabajo futuro:

1. Realizar pruebas de lixiviación para cromo en polvo de mortero a edades tempranas y avanzadas con un 30 % de escoria adicionada al mortero.
2. Complementar los resultados presentados con ensayos de durabilidad para morteros con 5 y 10% de escoria adicionados en la matriz cementante.
3. Llevar a cabo monitoreos de la estabilidad volumétrica a edades avanzadas.
4. Hacer investigaciones para comprobar los costos ambientales y financieros de disponer la escoria EAF de manera tradicional y cumpliendo con lo establecido en la normativa Mexicana actual y comparar con el costo ambiental y financiero de reutilizar determinados porcentajes de escoria dentro de una matriz cementante.

Apéndice I

Valores de escurrimiento de los morteros

En la Tabla A-I.1 se presentan los valores diametrales alcanzados por cada mortero (la media de dos amasadas y dos medidas diametrales de cada mortero) ensayados en la mesa de sacudidas.

Tabla A-I.1 Valores de escurrimiento de los morteros de las series SA, 1A y 2A.

Mortero	Valor de escurrimiento (cm)
SA00%E	17.1
SA05%E	16.8
SA10%E	17.6
SA20%E	16.8
SA30%E	17
SA60%E	16.8
1A00%E	17
1A05%E	17.4
1A10%E	17.4
1A20%E	16.8
1A30%E	17
2A00%E	17
2A05%E	17.5
2A10%E	17.2
2A20%E	17.8
2A30%E	17.6

Estos valores fueron medidos en una mesa de sacudidas como la mostrada en la Figura A-I.1. La cual cumple las especificaciones establecidas en la norma UNE EN 1015-3 en su Anexo A (normativo).



Figura A-I.1 Prueba de consistencia de un mortero fresco realizada sobre la mesa de sacudidas.

Apéndice II

Diseño de mezclas

La Tabla A-II.1 muestra las diferentes cantidades de materiales pesados, para cada amasada de los diferentes morteros pertenecientes a la serie 1, para ensayos de flexión y compresión. Las relaciones se expresan en porcentaje en masa.

Material/ Serie	SA00%E	SA05%E	SA10%E	SA20%E	SA30%E	SA60%E
Aditivo	No	No	No	No	No	No
Cemento	450g	427.5g	405g	360g	315g	180g
Arena	1350g	1350 g	1350g	1350 g	1350 g	1350g
Escoria	0g	22.5g	45g	90g	135g	270g
Agua	225g	225 g	225g	234g	234g	252g
Rel a/c	0.5	0.5	0.5	0.52	0.52	0.56

La Tabla A-II.2 muestra las diferentes cantidades de materiales pesados, para cada amasada de los diferentes morteros pertenecientes a la serie 2, para ensayos de flexión y compresión. Las relaciones se expresan en porcentaje en masa.

Material/ Serie	1A00%E	1A05%E	1A10%E	1A20%E	1A30%E
Aditivo	1	1	1	1	1
Cemento	450 g	427.5g	405g	360g	315g
Arena	1350 g	1350g	1350 g	1350g	1350 g
Escoria	0g	22.5g	45g	90g	135g
Agua	184.5 g	184.5 g	184.5 g	180 g	175.5g
Rel a/c	0.41	0.41	0.41	0.4	0.39

El superplastificante 1 fue adicionado al 1.2% en peso respecto al cemento y representa la dosis máxima sugerida por el fabricante en su ficha técnica.

Tabla A-II.3 muestra las diferentes cantidades de materiales pesados para cada amasada de los diferentes morteros pertenecientes a la serie 3, para ser ensayados a flexión y compresión. Las relaciones se expresan en porcentaje en masa.

Material/ Serie	2A00%E	2A05%E	2A10%E	2A20%E	2A30%E
Aditivo	2	2	2	2	2
Cemento	450 g	427.5g	405	360g	315g
Arena	1350 g				
Escoria	0g	22.5g	45	90g	135g
Agua	184.5 g	184.5 g	184.5 g	180 g	175.5g
Rel a/c	0.41	0.41	0.41	0.4	0.39

Para estas mezclas de mortero se agregaron 1.2 g de aditivo 2, por cada 100 g de cemento. El total del aditivo fue mezclado con la cantidad total de agua para el amasado, antes de iniciar el procedimiento, cuidando siempre que hubiera una correcta disolución. La ficha técnica para el aditivo 2 sugiere como dosis máxima 1.0% en peso respecto al cemento; sin embargo, con esta cantidad de aditivo la trabajabilidad no fue buena en algunos morteros. Además, También se intentó emplear cantidades de 1.3 y 1.4 % en peso del superplastificante respecto al cemento, sin embargo en algunos morteros se perdió la consistencia y la mezcla se disgregaba por lo que se decidió utilizar 1.2 % en peso dando como resultado una buena trabajabilidad, valores de escurrimiento dentro de rangos coherentes y la mezcla del mortero fresco se observó estable (sin que el agua se segregara de la pasta).

En la Figura A-II.1 se muestran algunas de las probetas antes de ser ensayadas a flexión, que posteriormente serían ensayados a resistencia a la compresión. Las probetas con un 30% de escoria son ligeramente más oscuras.



Figura A-II.1 Probetas prismáticas para ensayos a flexión.

La Tabla A-II.4 muestra las diferentes cantidades de materiales pesados para cada amasada de los morteros para las probetas que serían medidas en sus variaciones longitudinales para la determinación de la reactividad álcali –sílice.

Material/ Serie	Referencia	30% escoria
Aditivo	No	No
Cemento	585g	409.5g
Arena	1755g	1755g
Escoria	0g	175.5g
Agua	292g	304.2g
Rel a/c	0.5	0.52

Apéndice III

Valores de resistencia a la flexión y compresión

En las Tablas A-III.1, A-III.2 y A-III.3 se presentan los valores promedio de los ensayos a flexión y compresión realizados a todos los especímenes de las tres series de esta investigación.

Tabla A-III.1 Valores promedio de las resistencias mecánicas de la Serie SA (Sin superplastificante).

Mortero	Flexión en MPa				Compresión en MPa			
	2 d	7 d	28 d	90 d	2 d	7 d	28 d	90 d
SA00%E	5.11	6.38	7.38	7.73	31.35	39.95	48.28	56.42
SA05%E	4.48	5.56	5.98	7.26	28.95	38.58	48.46	57.39
SA10%E	4.42	5.55	6.47	6.54	27.78	37.55	45.50	48.16
SA20%E	3.22	4.30	4.78	6.44	25.39	31.21	39.10	47.37
SA30%E	3.22	5.34	5.23	5.23	21.10	28.75	35.70	42.58
SA60%E	0.89	0.59	2.25	2.46	6.88	9.14	13.20	19.07

Tabla A-III.2 Valores promedio de las resistencia mecánicas de la Serie 1A (Con superplastificante 1).

Mortero	Flexión en MPa				Compresión en MPa			
	2 d	7 d	28 d	90 d	2 d	7 d	28 d	90 d
1A00%E	6.09	6.66	8.02	8.41	46.02	57.42	65.70	69.78
1A05%E	5.13	6.34	7.13	6.70	36.29	50.79	60.17	65.39
1A10%E	5.10	6.32	7.56	8.25	36.28	51.10	64.02	65.09
1A20%E	4.30	5.72	7.03	7.95	38.54	44.87	55.16	60.42
1A30%E	4.63	4.64	6.20	6.69	35.71	39.11	48.07	54.14

Tabla A-III.3 Valores promedio de las resistencias mecánicas de la Serie 2A (Con superplastificante 2).

Mortero	Flexión en MPa				Compresión en MPa			
	2 d	7 d	28 d	90 d	2 d	7 d	28 d	90 d
2A00%E	5.28	6.71	8.11	8.67	42.35	55.25	65.33	77.18
2A05%E	5.17	6.78	7.67	8.52	42.53	48.42	60.98	69.74
2A10%E	5.21	5.79	7.50	8.23	42.69	50.97	63.50	70.52
2A20%E	4.69	5.10	6.87	7.31	32.05	42.17	55.03	64.36
2A30%E	4.30	4.46	5.91	6.42	28.64	38.44	45.07	53.27

Con base en las Tablas A-III.1 a A-III.3, se realizaron las gráficas de las Figuras 4.7 y 4.8, 4.10 – 4.13 del Capítulo 4 del presente trabajo, las cuales representan los valores promedio de las resistencias a la compresión y flexión de los morteros ensayados según lo indicado en las normas UNE correspondientes.

Referencias

- [1] Shi, C., Qiang, J., “High performance cementing materials from industrial slags - a review”. *Resources, Conservation and Recycling*, 29, 2000, pp. 195–207.
- [2] Huntzinger, D., & Eatmon, T., “A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies”. *Journal Cleaner Production*, 17, 2009, pp. 668-675.
- [3] Ren, Q., Wang, Y., “Technologies of steel slag and comprehensive utilization of resources”. *Iron Steel Research*, 1, 2012, pp. 54-7.
- [4] Shen, H., Forssberg, E., “An overview of recovery of metals from slags”. *Waste Management*, 23, 2013, pp. 933–949.
- [5] Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., Chen, H., “An overview of utilization of steel slag”. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 2012, pp. 791-801.
- [6] Geiseler, J., “Use of steelworks slag in Europe”. *Waste Management*, 16, 1996, pp. 59-63.
- [7] Frías Rojas, M., Sánchez de Rojas, M.I., Uría, A., “Estudio de la inestabilidad en escorias negras de horno de arco eléctrico”. *Materiales de construcción*, 267, 2002, pp. 79-83.
- [8] Wang, Q., “Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag”. *Construction and Building Materials*, 24, 2010, pp. 1134–1140.
- [9] Wang, Q., Yan, P., Feng, J., “A discussion on improving hydration activity of steel slag by altering its mineral composition”. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 2011, pp. 1070-1075.

- [10] Luxan, M.P., Sotolongo, R., Dorrego, F. Herrero, E., “Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace”. *Cement and Concrete Research*, 30, 2000, pp. 517-519.
- [11] Sofilić, T., Mladenović, A., “Defining of EAF steel slag application possibilities in asphalt mixture production”. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2, 2011, pp. 148-157.
- [12] Pasetto, M., Baldo, N., “Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags”. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 2010, pp. 938–948.
- [13] Pasetto, M., Baldo, N., “Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag”. *Construction and Building Materials*, 25, 2011, pp. 3458–3468.
- [14] Ameri, M., “Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag”. *Construction and Building Materials*, 49, 2013, pp. 611-617.
- [15] Tsakiridis, P.E., Papadimitriou G.D., Tsvilis, S., “Utilization of steel slag for Portland cement clinker production”. *Journal of Hazardous Materials*, 152, 2008, pp. 805–811.
- [16] Han Young Moon, Jung Hoon Yoo, Seong Soo Kim, “A Fundamental Study on the Steel Slag Aggregate for Concrete”. *Geosystem Engineering*, 2, 2002, pp. 38-45.
- [17] Manso, J.M., Polanco, J.A., “Durability of concrete made with EAF slag as aggregate”. *Cement & Concrete Composites*, 28, 2006, pp. 528-534.
- [18] Pellegrino, C., Gaddo, V., “Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate”. *Cement and Concrete Composites*, 9, 2009, pp. 663-671.
- [19] Chunlin, L., Zha, K., Depeng, C., “Possibility of Concrete Prepared with Steel Slag as Fine and Coarse Aggregates: A Preliminary Study”. *Procedia Engineering*, 24, 2011, pp. 412-416.

- [20] Samir I. Abu-Eishah, Amr S. El-Dieb, Mostafa S. Bedir, "Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region". *Construction and Building Materials*, 34, 2012, pp. 249–256.
- [21] Anastasiou, E. "Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag". *Construction and Building Materials*, 50, 2014, pp. 154-161.
- [22] Tchobanoglous, G., & Kreith, F., "Handbook of Solid Waste Management" McGraw-Hill Professional, 2nd ed, 2002.
- [23] SEMARNAT. (s.f.). Recuperado el 20 de Mayo de 2013, de Compendio Estadísticas Ambientales 2008:
http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008/00_intros/index.html
- [24] Gutiérrez Martínez del Campo, Federico. "La gestión ambiental en México y la justicia". Biblioteca Jurídica Virtual del Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM.
<http://biblio.juridicas.unam.mx/libros/6/2547/14.pdf>
- [25] Naciones Unidas. Recuperado el 22 de Febrero de 2014, de http://www.un.org/depts/dhl/spanish/resguids/specenvsp.htm#top_of_page
- [26] *Basel Convention*. 2011. Recuperado el 16 de Julio de 2013, de <http://www.basel.int/Home/tabid/2202/mctl/ViewDetails/EventModID/8295/EventID/443/xmid/8052/Default.aspx>
- [27] *Cámara de diputados*. 2006. Recuperado el 20 de mayo de 2013, de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgpgir.htm>
- [28] *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2013. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. México.

- [29] Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
- [30] CANACERO. Octubre de 2013. Boletín 9 Acero en Cifras.
- [31] Secretaría de Energía. Julio de 2012. SEMARNAT. Recuperado el 19 de Marzo de 2013, de <http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Pages/sniarn.aspx>
- [32] SEMARNAT, DGEIA. 2010. SEMARNAT. Recuperado el 18 de Marzo de 2013, de http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlete1ce.html
- [33] Manual de minimización, tratamiento y disposición. Concepto de manejo de residuos peligrosos e industriales para el giro de la fundición. Comisión Ambiental Metropolitana, 1996.
- [34] Enríquez, J. L., Tremps, E., Fernández, D., "Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte I Acería Eléctrica". Madrid, 2009.
- [35] ASTM C-219 Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement; 2007.
- [36] Ibrahim, H.H., "Assessment of Pollution Potentialities of some Portland Cement". *Nigerian Journal of Basic and Applied Science*, 20, 2012, pp. 182-184.
- [37] Norma Oficial Mexicana NOM-040-SEMARNAT-2002 Protección ambiental. Fabricación de cemento hidráulico. Niveles máximos de emisión a la atmosfera.
- [38] NMX-C-414-ONNCCE-2004 Industria de la construcción – Cementos hidráulicos. Especificaciones y métodos de prueba.
- [39] RC-97 Instrucción para recepción de cementos, 1997.

- [40] UNE-EN 197-1:2000 Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes
- [41] Callister, W. *An introduction: Material Science and Engineering* (7th ed.). John Wiley, Inc.
- [42] Skoog, H. N. (2001). *Principios de análisis instrumental* (5 ed.). Mc Graw Hill.
- [43] Renau-Piqueras, J., & Faura, M. (s.f.). Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido. Centro de Investigación. Hospital "La Fé", Sección de microscopía electrónica, Valencia, España.
- [44] Annual Book of ASTM Standards, "Standards Methods of preparation of metallographic specimens", Section 3, Vol. 03.01, 1992, pp 82-86.
- [45] Muñoz, G. Microscopía electrónica de transmisión y difracción de electrones de polímeros. *Butll. Soc. Cat. Cien.*, 11, 1991.
- [46] Walligora, J., Bulteel, D., Degrugilliers, P., Damidot, D., Potdevin, J., & Measson, M., "Chemical and mineralogical characterization of LD converter steel slags: A multi-analytical techniques approach". *Materials Characterization*, 61, 2010, pp. 18-39.
- [47] NOM-053-SEMARNAT-2003, "Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente".
- [48] EPA. NEN 5763. Determinación del contenido de cromo en suelo por espectrometría de absorción atómica (técnica de llama) tras digestión con ácido nítrico y sulfúrico. Test Methods for Evaluating Solid Waste.
- [49] UNE 80101. Métodos de ensayo de cementos. Determinación de la resistencia mecánica, AENOR, 1988.
- [50] BASF Construction Chemicals, España, S.L. 16 de Septiembre de 2010. Ficha Técnica GLENIUM SKY 549.

- [51] BASF Construction Chemicals España, S.L. 16 de Septiembre de 2010. Ficha técnica GLENIUM SKY 604.
- [52] UNE 1015-2 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros de ensayo. AENOR., 1999.
- [53] UNE 1015-3 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). AENOR, 1999.
- [54] UNE 1015-11 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. AENOR, 2007.
- [55] UNE 146508 EX. Ensayo de áridos. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-silicato de los áridos. Método acelerado en probetas de mortero. AENOR, 1999.
- [56] UNE-EN 196-1. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. AENOR, 2005.
- [57] Bye, G., “Portland Cement: Composition, Production and Properties”. *Thomas Telford Publishing*, 1999.
- [58] Elke Knapena, O. C., “Effect of free water removal from early-age hydrated cement pastes on thermal analysis”. *Construction and Building Materials*, 11, 2009, pp. 3431–3438.
- [59] Iacobescu, R.I., Koumpouri, D., “Valorisation of electric arc furnace steel slag as raw material for low energy belite cement”. *Journal of Hazardous Materials*, 196, 2013, pp. 287– 294.
- [60] M. Frias Rojas, M. I. Sánchez. “Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds”. *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, pp. 1881–1888.

- [61] Wonbaek Kim, Chang-Yul Suh, Sung-Wook Cho, “A new method for the identification and quantification of magnetite–maghemite mixture using conventional X-ray diffraction technique”. *Talanta*, 94, 2012, pp. 348–352.
- [61] Castaño, J., Arroyave, C., “La funcionalidad de los óxidos de hierro”. *Revista de Metalurgia CSIC*, 34, 1998, pp. 274-280.
- [62] Setién, J., & Díez-Aja, J. A., “Aproximación histórica y metalúrgica a los primeros hornos altos españoles: Las fábricas de artillería de Liérganes y la Cavada”. *Revista de Metalurgia CSIC*, 44, 2008, pp. 299-309.
- [63] NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
- [64] Loredana Di Sante, “EAF Slag: A Product No Longer a Problem. EAF Slag: A Product No Longer a Problem” , 2013, pp. 257. AIST.org.
- [65] Engström, F., Adolfsson, D., “A study of the solubility of pure slag minerals”. *Minerals Engineering*, 41, 2013, pp. 46-52.
- [66] Gelfi, M., Cornacchia, G., “Investigations on leaching behavior of EAF steel slags”. *Università degli Studi di Brescia: Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale*, pp. 1-13.
- [67] Ahumada, H. T., “Condiciones de salud de la población vecina a una planta recicladora de residuos en México”. *Revista Panamericana Salud Publica* 3, 1998, pp. 15-19.
- [68] Havlik, T., Turzakova, M., “Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid”. *Hydrometallurgy*, 77, 2005, pp. 41–50.
- [69] Quijorna, N., de Pedro, M., “Characterisation of the sintering behaviour of Waelz slag from electric arc furnace (EAF) dust recycling for use in the clay ceramics industry”. *Journal of Environmental Management*, 132, 2014, pp. 278-286.

- [70] Sofilić, T., Rastovčan-Mioć, A., “Characterization of steel mill electric-arc furnace dust”. *Journal of Hazardous Materials*, B109, 2004, pp. 59-70.
- [71] Bucio-Jurado, W., “Intoxicación por arsina”. *Rev Med IMSS*, 43, 2005, pp. 57-60.
- [72] Armienta, M.A., Rodriguez, R., “Estudio de caso: contaminación por arsénico en el agua subterránea de Zimapán, Hidalgo; problemática ambiental y enfoque metodológico”. *El agua en Mexico vista desde la academia, Academia Mexicana de Ciencias*, 2004, pp. 79 – 98.
- [73] Panda, C.R., Mishra, K.K., “Environmental and technical assessment of ferrochrome slag as concrete aggregate material”. *Construction and Building Materials*, 49, 2013, pp. 262–271.
- [74] Hekal, E.E., Abo-El-Enein, S.A., “Hydration characteristics of Portland cement – Electric arc furnace slag blends”. *Housing and Building National Research Center*, 9, 2013, pp. 118–124.
- [75] Wang, Q., Yang, J., Yan, P., “Cementitious properties of super-fine steel slag”. *Powder Technology*, 245, 2013, pp. 35–39.
- [76] Spiratos, N., Pagé, M., Mailvaganam, N., Malhotra, V., Jolicoeur, C., “Superplasticizers for concrete fundamentals, technology and practice”. *Handy Chemicals, Canada*. 2006.
- [77] Golaszewski, J., Szwabowski, J., “Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars”. *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, pp. 235–248.
- [78] Uchikawa, H., Hanehara, S., Sawaki, D., “The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture”. *Cement and Concrete Research*, 27(1), 1996, pp. 37-50.
- [79] Flatt, R., Houst, Y., “A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers”. *Cement and Concrete Research*, 31, 2001, pp. 1169 – 1176.

- [80] Palacios, M., Puertas, F., Bowen, P., “Effect of PCs superplasticizers on the rheological properties and hydration process of slag-blended cement pastes”. *Journal of Material Science*, 44, 2009, pp. 2714–2723.
- [81] Manso, J., González, J., Polanco, J., “Electric arc furnace slag in concrete”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31, 2009, pp. 663–671.
- [82] Juckes, L., “The volume stability of modern steelmaking slags”. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 112, 2003, pp. 177–197.
- [83] ASTM 1260. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity off Aggregates (Mortar Bar Method).
- [84] Cavalcante-da Silva, C., Barreto-Monteiro, E., Duarte-Gusmão, A., “Análisis de métodos de prevención de la reacción álcali-agregado: Análisis petrográfico y método acelerado para barras de mortero”. *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 15, 2011, pp. 9-17.
- [85] Martín, A., Gadea, J., Campos, P., Calderón, V., García Calleja, M., & Rodríguez, A., “Evaluación de la reactividad árido-álcali en diversos áridos silicatados. Alternativas para minimizar esta reacción”. *Estudios Geológicos*, 66, 2010, pp. 99-103.
- [86] Motz, H., Geiseler, J., “Products of steel slags an opportunity to save natural resources”. *Waste Management*, 21, 2001, pp. 285-293.
- [87] Pellegrino, C., Cavagnis, P., Faleschini, F., & Brunelli, K. “Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate”. *Cement & Concrete Composites*, 37, 2013, pp. 232–240.
- [88] Wang, G., Wang, Y., & Gao, Z., “Use of steel slag as a granular material: volume expansion prediction and usability criteria”. *Journal of Hazardous Materials*, 184, 2010, pp. 555–560.
- [89] Elsen, J., “Microscopy of historic mortars—a review”. *Cement and Concrete Research*, 36, 2006, pp. 1416–1424.

- [90] Scrivener, K., “Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification”. *Cement and Concrete Composites*, 26, 2004, pp. 935-945.
- [91] Diamond, S., Bonen, D., “Microstructure of hardened cement paste—a new interpretation”. *Journal of the American Ceramic Society*, 73, 1993, pp. 2993-2999.
- [92] Famy, C., Brough, A., Taylor, H., “The C-S-H gel of Portland cement mortars: Part I. The interpretation of energy-dispersive X-ray microanalyses from scanning electron microscopy, with some observations on C-S-H, AFm and AFt phase compositions”. *Cement and Concrete Research*, 33, 2003, pp. 1389-1398.
- [93] Yeong-Nain Sheen, Her-Yung Wang, Te-Ho Sun., “A study of engineering properties of cement mortar with stainless steel oxidizing slag and reducing slag resource materials”. *Construction and Building Materials*, 40, 2013, pp. 239–245.

Curriculum Vitae

Lucero Marisol Serrato Arias

luceromarisol7@gmail.com

Formación académica

Químico Farmacéutico Biólogo orientación en medio ambiente

- Egresada en diciembre de 2009 de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas

Experiencia laboral

Technology Conservation Group, S.A. de C.V.
Avenida Mundial #181 Parque Multipark, Apodaca, N.L. | 52 (81) 8214-0296 al 99

Junio 2010 – Junio 2012

- Auxiliar y, posteriormente, administrador en el departamento de Medio Ambiente, Seguridad e Higiene en esta empresa de giro recicladora.
- Manejo de las certificaciones ISO 14001 y R2RIOS.

Qualtia Alimentos

Conductores No. 600 Col. Lagrange, Monterrey, N.L.

Abril – Junio 2010

- Auxiliar en el Laboratorio de Aseguramiento de Calidad de materia prima y producto terminado.

Laboratorio de Agua y Drenaje Monterrey

Matamoros 1717 Pte. Col. Obispado, Monterrey, N.L.

Agosto 2009 – Febrero 2010

- Servicio social.

Cualificaciones

- Taller de Liderazgo Ambiental impartido por PROFEPA (Diciembre 2011).
- Taller de Bioética y Educación Ambiental.

Productos de investigación generados

Artículos

Zaldívar-Cadena, A.A., Díaz-Peña I., González-López, J.R., Vázquez-Acosta F., Cruz-López A., Vázquez-Cuchillo O., Vázquez-Rodríguez F., Serrato-Arias L.M. "Effect of milling time on mechanical properties of fly ash incorporated cement mortars", *Advanced Materials Research*, 787, 2013, pp 286-290, ISSN:1662-8985. <http://www.scientific.net/AMR.787.286>

Se encuentra en proceso otro artículo.

Congresos

L.M. Serrato-Arias, A.A. Zaldívar-Cadena, J.R. González-López, M.A. Aguilar-González, A. Ponce-Pedraza, R. Borja-Urby, F. Vázquez-Acosta, R.X. Magallanes-Rivera, A. Cruz-López, "A multi-analytical techniques approach for chemical and microstructural characterization of EAF steel slag", XXII International Materials Research Congress, 11-15 Agosto del 2013 en Cancún México.

Antonio Alberto Zaldívar-Cadena, Lucero Marisol Serrato-Arias, Javier Rodrigo González-López, Miguel Ángel Aguilar-González, Arturo Ponce-Pedraza, Raúl Borja-Urby, Francisco Vázquez-Acosta, Arquímedes Cruz-López, "Chemical and microstructural characterization of EAF steel slag for application in the concrete industry", 12th Inter-American Microscopy Congress CIASEM 2013, 24-28 Septiembre del 2013 en Cartagena de Indias, Colombia.

Miguel Ángel Aguilar González, Cristobal Noé Aguilar González, Antonio Alberto Zaldívar Cadena, Lucero Marisol Serrato Arias, "Potassium polytitanates application for dye sensitized" XXIII International Materials Research Congress, 17-21 Agosto del 2014 en Cancún México.