



Tesis en Opción al Título de Master en Metalurgia

**Estudio fraccionario de las escorias
blancas de ACINOX Las Tunas
para su empleo como materiales
cementicios suplementarios**

AUTOR:

Ing. Angel Eduardo Espinosa Borges

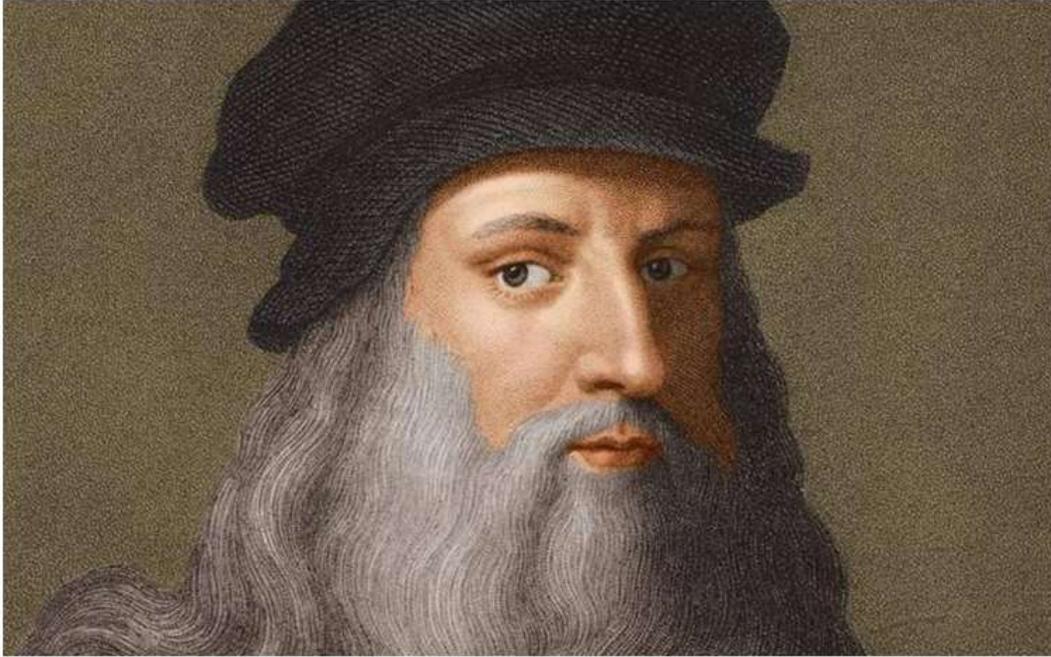
TUTORES:

Dr.C Roger Samuel Almenares Reyes

Dr.C Carlos Alberto Leyva Rodríguez

MSc. Liodilio Reynerio Alarcón Pérez

Frase:



El que se enamora de la práctica sin ciencia es como el marino que sube al navío sin timón ni brújula, sin saber con certeza hacia dónde va.

Leonardo da Vinci

Agradecimientos:

Este trabajo fue materializado gracias al apoyo incondicional y las horas dedicadas por mis tutores, sin los cuales hubiera sido imposible alcanzar estos resultados.

Gracias al claustro de metalurgia que siempre estuvieron abiertos a satisfacer mis preguntas sobre la interesante ciencia de la metalurgia.

A los profesores de la maestría por formarme como master y brindarme sus conocimientos desde cada una de sus especialidades.

A mis compañeros de la maestría donde pude tener amistades que serán para toda la vida.

A mis compañeros del departamento de geología por apoyarme y estar siempre al pendiente de mi superación.

A mi novia por siempre portarse comprensiva y darme su apoyo en los momentos más críticos.

Y a todas las personas sin las que este trabajo no hubiera sido lo que es.

Dedicatoria:

A mi familia sin la cual no estaría hoy alcanzando esta meta, por a ver estado siempre a mi lado apoyándome y dándome un consejo acertado en los momentos más críticos de mi vida.

Resumen:

El trabajo tuvo como objetivo estudiar las fracciones granulométricas de las escorias blancas de la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas (ACINOX Las Tunas) para su empleo como material cementicio suplementario (MCS). Este material fue separado en fracciones usando tamices normados, se determinó su composición química y mineralógica mediante técnicas de Difracción de Rayos X y Espectroscopía de Absorción Atómica respectivamente; y se cuantificó el contenido de partículas magnéticas mediante el uso de un imán permanente. Se calcularon los índices y módulos de hidraulicidad, y la basicidad, para evaluar las características hidráulicas del material. Se empleó el sistema ternario Ca-Al-Si para correlacionar la composición de las escorias con la de otros materiales cementicios suplementarios. Las escorias blancas del horno de cuchara de la acería eléctrica ACINOX Las Tunas están formadas principalmente por silicatos, estas son básicas y la granulometría es principalmente fina, predominando partículas inferiores a 0.044 mm. Estas escorias presentan una marcada diferenciación en su composición en sus diferentes fracciones granulométricas, con un aumento considerable de fases reactivas en las menores de 90 μm , por lo que es factible su tamizado para beneficiar sus propiedades cementantes. Este material presenta grandes perspectivas para su empleo como sustituto parcial del cemento o como base para el desarrollo de nuevos conglomerantes con adiciones puzolánicas.

Palabras claves: escorias blancas, horno de cuchara, material cementicio suplementario (MCS)

Abstract:

The objective of the work was to study the granulometric fractions of the white slag from the Las Tunas Stainless Steel Company (ACINOX Las Tunas) for its use as supplementary cementitious material (MCS). This material was separated into fractions using standardized sieves, its chemical and mineralogical composition will be separated by X-Ray Diffraction and Atomic Absorption Spectroscopy techniques respectively; and the content of magnetic particles was quantified by using a permanent magnet. The hydraulicity indices and modules, and the basicity, are calculated to evaluate the hydraulic characteristics of the material. The Ca-Al-Si ternary system was used to correlate the composition of the slag with that of other supplementary cementitious materials. The white slag from the ladle furnace of the ACINOX Las Tunas electric steel mill is formed mainly by silicates, these are basic and the granulometry is mainly fine, predominantly particles smaller than -0.044 mm. These slags present a marked differentiation in their composition in their different granulometric fractions, with a considerable increase in reactive phases in those smaller than $90 \mu\text{m}$, so it is feasible to screen them to benefit their cementing properties. This material presents great prospects for its use as a partial substitute for cement or as a base for the development of new binders with pozzolanic additions.

Keywords: white slag, ladle furnace, supplementary cementitious material (MCS)

Índice

Frase:	3
Agradecimientos:	4
Dedicatoria:	5
Resumen:	6
Abstract:	7
Índice.....	8
Glosario de términos y abreviaturas:	12
Introducción.....	13
Capítulo 1: Marco Teórico Conceptual	19
1.1. Generalidades	19
1.2. El cemento Portland	21
1.3. Los Materiales Cementicios Suplementarios	23
1.4. Las escorias siderúrgicas	26
1.4.1. Definición	26
1.4.2. Características de las escorias	27
1.4.3. Tipos de escorias.....	29
1.5. Escorias blancas	33
1.5.1. Definición	33
1.5.2. Características.....	34
1.5.3. Usos de las escorias blancas del horno de cuchara en la construcción	40
1.6. Antecedentes de la investigación de las escorias blancas de la empresa ACINOX Las Tunas	42
1.7. Conclusiones parciales	43
Capítulo 2. Materiales y métodos	45
2.1. Introducción.....	45
2.2. Trabajos de documentación y muestreo	46

2.3. Trabajos de laboratorio	46
Preparación	46
Separación granulométrica	47
Separación magnética.....	48
DRX.....	49
Espectrometría de Absorción Atómica	49
Capítulo 3: Análisis y discusión de los resultados	52
3.1. Introducción.....	52
3.2. Características macroscópicas de la escoria.....	52
3.3. Análisis granulométrico de la escoria blanca	52
3.4. Comportamiento magnético	55
3.5. Composición química por fracciones	56
3.6. Composición mineralógica por fracciones	60
3.7. Métodos de beneficio de las fracciones granulométricas presentes en las escorias para el desarrollo de aplicaciones como MCS	67
3.8. Conclusiones parciales	69
Conclusiones.....	70
Recomendaciones.....	71
Referencias	72
Anexos	87

Índice de Figuras

Figura 1: Proceso de fabricación del clínquer de cemento.....	23
Figura 2: Disponibilidad de MCSs a nivel mundial (Talero Morales et al. 2020).	24
Figura 3: variabilidad de MCSs a nivel mundial en función de su composición (Talero Morales et al. 2020)	26

Figura 4: Número de veces que se identificaron minerales primarios (Piatak, Parsons y Seal 2015)	29
Figura 5: Clasificación de las escorias siderúrgicas según su procedencia (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018)	30
Figura 6: Métodos para la fabricación del acero.....	32
Figura 7: Esquema de un horno de cuchara (Caballero Garrido, Montenegro Cooper y Ponce Abarca 2017; Leiva Vidal, Montenegro Cooper y Ponce Abarca 2017)	34
Figura 8: Transformación de las fases C_2S (Otegi Aldai et al. 2012)	37
Figura 9: Flujograma de la investigación	45
Figura 11: Materiales empleados	47
Figura 15: Tamíces normados empleados para estudiar la escoria	47
Figura 12: Imán empleado para separar la fracción magnética de la escoria ..	48
Figura 13: Contenido de material magnético por fracciones	49
Figura 14: A: Instrumentos para la preparación de las muestras para la DRX, B: Portamuestra para análisis de DRX, C: Difractómetro X'Pert ³ Powder.	49
Figura 16: Diagrama ternario C-S-A (Calleja 1982; Pérez-González et al. 2019; Pérez-González et al. 2020).....	51
Figura 17: Componentes macroscópicos de las escorias	52
Figura 18: Distribución granemométrica por fracciones	53
Figura 19: Comportamiento del material retenido y cernido durante el análisis granulométrico.....	54
Figura 20: Distribución del material magnético por fracciones	55
Figura 21: Comportamiento del material magnético retenido y cernido durante el análisis granulométrico.....	56
Figura 28: Sistema ternario Ca-Si-Al.....	59
Figura 22: Difractograma de la Difracción de Rayos X de las muestras EA.....	61
Figura 23: Cuantificación de los minerales identificados EA	62
Figura 24: Difractograma de la Difracción de Rayos X de las muestras CEA-163	
Figura 25: Cuantificación de los minerales identificados CEA-1	64
Figura 26: Difractograma de la Difracción de Rayos X de las muestras CEA-264	
Figura 27: Cuantificación de los minerales identificados CEA-2	65
Índice de Tablas	

Tabla 1: Materias primas principales del cemento (Tirado Chávez y Solar Jara 2018).....	22
Tabla 2: Tipos de escorias de alto horno BF (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015).....	30
Tabla 3: Residuos y cantidad generada por tonelada de acero producida (Zelada Muñoz y Rodríguez Castillo 2016).....	33
Tabla 4: Composición química y metales pesados de las escorias blancas (Losáñez, 2005, Geiseler 1995) (Pérez Fernández et al. 2015).....	36
Tabla 5: Composición mineralógica de las escorias blancas (Pérez Fernández et al. 2015).	39
Tabla 6: Granulometrías empleadas para el análisis granulométrico.....	47
Tabla 7: Fracciones empleadas para el estudio químico y mineralógico	48
Tabla 8: Composición química de la escoria.....	57
Tabla 9: Índice de hidraulicidad y basicidad de la escoria.....	58
Tabla 10: Composición mineralógica de la escoria	67

Glosario de términos y abreviaturas:

LF: Horno de cuchara

LSF: Escoria de horno cuchara

BF: Alto horno

BOF: Horno de oxígeno básico

DRX: Difracción de Rayos X

EGB: Escoria de alto horno sin moler

GGBS: Escoria granulada de alto horno

EAF: Horno de arco eléctrico

PC: Cemento Portland

OPC: Cemento Portland Ordinario

C3S2: Silicato tricálcico (Ca_3SiO_5)

C2S: Silicato dicálcico (Ca_2SiO_4)

CS: Meta silicato de calcio (CaSiO_3)

γ -C2S: Calcio-Olivino

C2MS2: Akermanita

C3MS2: Merwinita

C12A7: Mayenita

C4AF: Celita

FA: Cenizas volantes

SCM: Material Cementicio Suplementario

C: Óxido de Calcio (CaO)

S: Óxido de Silicio (SiO_2)

A: Óxido de Aluminio Al_2O_3

Introducción

El crecimiento de las producciones industriales se ha acelerado en las últimas décadas, para satisfacer el incremento constante de la demanda generada por la población mundial. El aumento de las producciones industriales ha traído consigo la generación de volúmenes considerables de residuos (Guevara Laureano 2013; Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017).

El reciclaje de los residuos industriales es una de las vías más prometedoras de enfrentar de manera racional agotamiento de los recursos naturales y mitigar sus afectaciones ambientales (Sosa Gutiérrez y Cuetara Ricardo 2019; Baalamurugan et al. 2023).

El sector de la construcción moviliza el 10% del total de la economía mundial (Guevara Laureano 2013). Esta industria está enfrentando el gran desafío de hacer que sus procesos sean más sustentables (Xargay et al. 2019). La industria del cemento es una de las más contaminantes, generando 0,85 t de dióxido de carbono por cada tonelada (Wang et al. 2022) y anualmente es responsable de entre el 5% al 9% de las emisiones globales de CO₂ anuales (Liu et al. 2022).

Se pueden utilizar los materiales cementicios suplementarios como adición o sustitución parcial del cemento portland (Xargay et al. 2019; Santamaria et al. 2019; Adediran et al. 2022). La incorporación de estos materiales mediante la disminución del contenido ordinario de clínker del cemento portland se presentan como la alternativa más viable hacia la sostenibilidad (Pillai, Gettu y Santhanam 2020), la disminución de las emisiones de CO₂ de la industria cementera (Valdés Uribe 2019; Liu et al. 2022) y mejorar o mantener la resistencia mecánica y la durabilidad del concreto (Pérez-González et al. 2019).

Según su origen se pueden distinguir dos categorías, los materiales de origen natural y los de origen artificial (Papadakis y Tsimas 2002; Martínez de la Cruz 2017; Almenares Reyes et al. 2017; Plusquellec et al. 2022). Las primeras están relacionadas con procesos geológicos dando origen a la formación de rocas vulcanógeno sedimentarias (Papadakis y Tsimas 2002) y algunas rocas sedimentarias (Almenares Reyes et al. 2017). La segunda categoría está representada por materiales, fundamentalmente, de composición silícea procedentes de procesos metalúrgicos (Papadakis y Tsimas 2002) y

subproductos de procesos industriales (Matias, Faria y Torres 2014; Ferrara et al. 2019; Zito, Irassar y Rahhal 2020; Kreiker et al. 2014; Xargay et al. 2019; Plusquellec et al. 2022).

El uso de materiales cementicios suplementarios asociados a materiales de desecho, como los residuos agro-industriales, las cenizas volantes, escoria de horno, ceniza de cascarilla de arroz, relaves de cobre, entre otros, gana cada vez más importancia en la producción de cemento y materiales de construcción (Shriraksha Javali et al. 2017; Valdés Uribe 2019; Xargay et al. 2019; Wang et al. 2022). Su implementación ayuda a preservar las fuentes de agregados naturales y consecuentemente a reducir el impacto ambiental asociado con su explotación y reduce la cantidad de escombros (Xargay et al. 2019).

La siderurgia es uno de los principales motores que mueven la economía global, siendo la fuente de las principales materias primas empleadas por la sociedad moderna (Zaragoza Valdés et al. 2001; Otegi Aldai et al. 2012; Zelada Muñoz y Rodríguez Castillo 2016; Caballero Garrido, Montenegro Cooper y Ponce Abarca 2017; (FMI) 2022).

Los volúmenes de producción anuales de metales son considerablemente elevados (León Aguilar y Almenares Reyes 2017; González Eyzaguirre, Garay y Cantallopts 2017; Mayor Hernandez et al. 2020) y asociado a estos se genera una gran cantidad de residuos no ferrosos representados principalmente por escorias (Pérez Fernández et al. 2015; Zulkarnin 2015; Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018).

Las pilas de escorias cubren grandes superficies de terreno, generando afectaciones considerables en el medio ambiente, la sociedad (Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017; Sosa Gutiérrez y Cuetara Ricardo 2019) y convirtiéndose en una carga económica para la industria siderúrgica (Cañas Gallart y Aguado De Cea 2012; Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015; Wang et al. 2022).

Las escorias son el principal residuo no ferroso de la producción de los metales (Otegi Aldai et al. 2012); la naturaleza de la ganga del mineral de hierro y de las cenizas del combustible determinan la basicidad y composición de la escoria (Calleja 1982; Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015).

Otro factor que condiciona las características finales de la escoria es el proceso de enfriado pudiendo generar escorias cristalinas, granuladas, peletizadas y expandidas (Calleja 1982; Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015).

Las escorias más utilizadas en el campo de la construcción son las que provienen de la fabricación del hierro y del acero (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018). Estas se clasifican en función del tipo de horno que se emplea para su producción en acería integral y de arco eléctrico (Amaral de Lima y Vazquez Ramonic 1999).

Los procesos de fabricación de acero, en horno de arco eléctrico, pueden utilizar varias etapas de escorificación, siendo el proceso más común el de doble escoria (negra y blanca) (García Avilés y Beyris Mazar 2014).

Actualmente apenas existen alternativas para el uso de la escoria blanca (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018), siendo la mayor parte destinada a vertederos (Santamaria et al. 2019).

Las aplicaciones más prometedoras están relacionadas con la fabricación de clínquer y por las propiedades hidráulicas que presentan son aptas para la fabricación de nuevos conglomerantes o como sustitución parcial del cemento en morteros y hormigones (Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017).

En la producción, del cemento adicionado con escoria, se espera una disminución de hasta un 40% de su costo, debido a la utilización de la escoria como sustituto del clínquer (Morán Menéndez, Parrales Cantos y Carvajal Rivadeneira 2021).

Las escorias blancas están compuestas principalmente de calcio, y en menor proporción de silicio y aluminio; se presentan como un material pulverulento debido, principalmente, a la transformación alotrópica del silicato de calcio beta en silicato de calcio gamma (Santamaria et al. 2019).

Los parámetros que influyen sobre el comportamiento hidráulico de la escoria son: el contenido en fase vítrea (Viček et al. 2009), la composición química, la finura y los métodos y/o sustancias de activación (Puertas 1993). Las

propiedades cementicias y la estabilidad volumétrica dependen de la composición de fases mineralógicas y de la estructura dentro de la escoria (Fang et al. 2022).

Los análisis granulométricos de la escoria blanca revelan una presencia más acusada de partículas inferiores a 0.063 mm (Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017) y las partículas menores a 2 mm representan alrededor del 40 al 70% (Montenegro-Cooper et al. 2019). Las partículas más finas de las escorias son las de constitución más próxima a la del clínquer Portland (Calleja 1982) y se considera que presentan propiedades organolépticas propias de un cemento o una cal (Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017).

Las fases vítreas de las escorias se ven concentradas en las fracciones más finas, estas tienen una mayor influencia que la composición química en la hidraulicidad del material resultante (Calleja 1982) y con el aumento de la finura aumenta significativamente la reactividad (Papayianni y Anastasiou 2006).

Cuba cuenta con más de 30 empresas productoras de la industria sideromecánica (Guerra-Castillo 2022), las principales plantas siderúrgicas están representadas por la Empresa Siderúrgica José Martí (Antillana de Acero), ubicada en la provincia de La Habana (Zaragoza Valdés et al. 2001; Pérez Zayas et al. 2017; Sosa Gutiérrez y Cuetara Ricardo 2019) y la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas (ACINOX Las Tunas), ubicada en la provincia de Las Tunas (Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017; Peña La Rosa y Pons Herrera 2018). En estas empresas se desarrolla la producción de aceros al carbono a partir de chatarra ferrosa, por el proceso dúplex (hornos de arco eléctrico y de cuchara), lo que propicia la generación de escorias blancas y negras.

Estas escorias constituyen una fuente de materias primas, que presentan buenas perspectivas para disminuir el consumo de materiales naturales y grandes ahorros energéticos, pero actualmente no son totalmente aprovechadas en la industria nacional (Soto Izquierdo, Soto Izquierdo y Díaz Brito 2000).

Con anterioridad las escorias blancas de la acería ACINOX han sido estudiadas como una fuente alternativa de materiales de la construcción (García Avilés y

Beyris Mazar 2014; Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017; León Aguilar y Almenares Reyes 2017). La aplicación más prometedora para aprovechar este material hasta el momento es su empleo en la sustitución parcial del cemento.

En la provincia de Las Tunas se desarrolla un fuerte programa de producción de materiales de la construcción, para lo que se necesitan fuentes alternativas para suplir la demanda de materiales. La empresa ACINOX genera diariamente 50 t de escoria, que se vierten en lugares de depósitos a caballo (Regueira Boza 2011). Según los planes de producción, la acumulación de material residual alcanzará valores de 19 000 t de escorias por año (Regueira Boza 2011). Estos volúmenes de residuos que se proyectan generar, junto a los que se acumulan en la empresa, pudieran aliviar la demanda de materiales para la construcción en la provincia de Las Tunas.

Hasta el momento se han investigado estas escorias en la producción de bloques (García Avilés y Beyris Mazar 2014; Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017), extensor del cemento (Regueira Boza 2011), la sustitución de cemento P-35 hasta un 15 % de escoria (García Avilés y Beyris Mazar 2014), en hormigones de 20,0 MPa como sustituto de árido fino (Fernández Pérez, Zúñiga Igarza y Urbina Reynaldo 2017), en la fabricación de tejas de fibrocemento (Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017) y en la producción de un aglomerante con resistencia similar a un cemento PP-25 mediante la sustitución de un 30 % de cemento P-35 (León Aguilar y Almenares Reyes 2017). Pero en todos los casos se ha investigado la escoria sin tener en cuenta la composición de este material por fracciones granulométricas, lo que se ha convertido en una tarea pendiente para el aprovechamiento integral de este material.

Este material presenta propiedades prometedoras en la sustitución parcial del cemento como material cementicio suplementario; pero carecen de un adecuado estudio del comportamiento de las características químicas y mineralógicas de las fracciones granulométricas que la componen. Se hace imprescindible el estudio de las fracciones granulométricas para evaluar las escorias blancas de la acería ACINOX de Las Tunas como materiales cementicios suplementarios.

Problema:

¿Qué características químicas y mineralógicas presentan las fracciones granulométricas de las escorias blancas del horno de cuchara de ACINOX Las Tunas, que puedan ser aprovechables para el uso óptimo de este material como material cementicio suplementario?

Hipótesis:

Si se establecen las características químicas y mineralógicas de las fracciones granulométricas presentes en las escorias blancas del horno de cuchara de ACINOX Las Tunas y se podrá evaluar como material cementicio suplementario.

Objetivo general:

- Caracterizar química y mineralógicamente las fracciones granulométricas presentes en las escorias blancas del horno de cuchara ACINOX Las Tunas para su uso como material cementicio suplementario.

Objetivos Específicos:

- Establecer el marco teórico conceptual sobre el origen, características y uso de las escorias siderúrgicas.
- Realizar análisis fraccional mineralo-químico de las escorias blancas del horno de cuchara de ACINOX Las Tunas.
- Proponer alternativas para mejorar las prestaciones de las escorias blancas del horno de cuchara de ACINOX Las Tunas como material cementicio suplementario.

Objeto:

- Las escorias blancas del horno de cuchara de ACINOX Las Tunas.

Campo de acción:

- Las características químicas, mineralógicas y granulométricas de las escorias blancas del horno de cuchara de ACINOX Las Tunas.

Capítulo 1: Marco Teórico Conceptual

En este capítulo se hace una revisión de los principales conceptos relacionados con la industria de la construcción a tener en cuenta durante la ejecución de la investigación. Se exponen las principales tendencias dentro de la producción global de cemento y se presentan los materiales cementicios suplementarios como la principal alternativa para una industria cementera más sostenible. Además, se exponen las principales características y tipos de escorias relacionadas con la producción del acero. También se exponen las características y principales usos de las escorias blancas generadas en la acería eléctrica. Por último, se hace una revisión de las principales investigaciones desarrolladas con las escorias blancas de la acería ACINOX de Las Tunas.

1.1. Generalidades

Adición: Material que, en una cantidad limitada, es molido simultáneamente o mezclado con el cemento hidráulico durante su fabricación (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2012).

Adición coadyuvante del proceso: Adición que ayuda o maneja el proceso del cemento hidráulico (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2012).

Adición funcional: Adición que se introduce para modificar una o varias propiedades del cemento hidráulico (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2012).

Cemento (aglomerante hidráulico): Material mineral finamente molido, que después de ser mezclado con agua forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, después de endurecer, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2014)

Cemento hidráulico: Cemento que fragua y endurece por la interacción química con el agua y que es capaz de hacerlo sumergido (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2012).

Cemento hidráulico mezclado: Cemento hidráulico compuesto por dos o más constituyentes inorgánicos (que al menos uno de los constituyente no es cemento Portland o clínquer de cemento Portland) que separadamente, o en

combinación, contribuye al aporte de otras propiedades al cemento con o sin los otros constituyentes (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2012)

Cemento Portland: Producido por la pulverización del clínquer, consistente esencialmente de silicatos cálcicos hidráulicos cristalinos (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2012).

Cemento Portland – puzolánico: Cemento hidráulico consistente de una mezcla íntima y uniforme de cemento Portland o cemento Portland con escorias de alto horno y puzolanas finas producidas mediante la molienda simultanea del clínquer de cemento Portland y puzolanas y mediante un mezclado de cemento Portland o cemento Portland con escorias de alto horno y puzolanas finamente divididas, o una combinación de la molienda simultanea y mezclado, en la cual la cantidad del constituyentes puzolánicos esté dentro de los límites especificados (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2012).

- a) Cemento Portland Puzolánico 25 (con un % adición activa natural entre 6% y 20%): Cemento PP – 25 (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2011).
- b) Cemento Portland Puzolánico 35 (con un % adición activa natural entre 6% y 20%): Cemento PP – 35 (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2011)

Cemento Puzolánico: El cemento puzolánico o cemento mezclado, es la mezcla de clínquer con puzolana (Lavandero Illera y Gonzalez 2011).

- a) Cemento Portland 25 (con un % de adición activa natural entre 21% y 35%):
Cemento PZ – 25 (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2011)

Cemento Portland de escorias: Cemento hidráulico consistente principalmente de una mezcla íntima y uniforme de una escoria de alto horno granulada molida con cemento Portland y/o cal hidratada (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2012).

Cemento Portland con escorias de alto horno: Cemento hidráulico que se elabora mediante la molienda fina de una mezcla de clínquer de cemento Portland con escoria de alto horno (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2012)

Escoria: Sustancia vítrea que sobrenada en el crisol de los hornos de fundir metales, y procede de la parte menos pura de estos, unida con las gangas y fundentes (Jiménez Guerra, Díaz Rodríguez y Fernández Arauzo 2021).

Escoria negra (EAF-C): Tipo de escoria siderúrgica o férrica de la metalurgia primera o fusión que se obtiene en la producción de acero al carbono (Jiménez Guerra, Díaz Rodríguez y Fernández Arauzo 2021).

Escoria blanca (LFS): Tipo de escoria siderúrgica o férrica de la metalurgia secundaria o afino que se obtiene en la producción de acero al carbono (Jiménez Guerra, Díaz Rodríguez y Fernández Arauzo 2021).

Fracción: Porción del árido expresada por el número que representan las aberturas nominales (o equivalentes) en mm de dos tamices normalizados, donde el mayor número, denominado límite nominal superior correspondiente al tamiz de mayor abertura por donde pasa prácticamente toda la porción de árido (90%-85% aproximadamente) y el segundo denominado límite inferior nominal correspondiente al tamiz de menor abertura donde queda retenida prácticamente su totalidad (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2013).

Material cementoso hidráulico: Material inorgánico, o una mezcla de ellos, que fragua y desarrolla su resistencia mediante la reacción química con el agua para la formación de hidratos, el cual es capaz de hacerlo sumergido (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2012)

Puzolanas: Material silíceo o silicio y aluminoso, el cual en sí mismo posee poco o ningún valor cementoso, pero en una forma finamente dividido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias formando hidratos poseedores de propiedades cementosas (Cuba: Oficina Nacional de Normalización 2012).

1.2. El cemento Portland

El Cemento Portland Ordinario (CPO) fue patentado como material cementante en el año 1824 por Joseph Aspdin, marcando uno de los acontecimientos más importantes en la historia de los materiales de construcción (Hernández Primero et al. 2016). Este material se emplea en todos los trabajos de construcción, por los bajos costos y los buenos resultados obtenidos en sus aplicaciones (Martirena Hernández 2003).

Según (Tobón y LÓPEZ 2007), “el cemento Portland es un producto finamente molido, altamente reactivo y compuesto de clínker, yeso y algunos materiales de adición”. Para la producción cemento se necesita que ocurran una serie de procesos físico químicos que dan origen a un producto intermedio extraordinariamente valioso llamado clínquer que representa las combinaciones estequiométricas de los óxidos fundamentales de las materias primas, a este proceso se le denomina proceso de clinquerización, proceso que solo tiene lugar en determinadas condiciones que están creadas previamente en el horno a temperaturas cercanas a los 1450°C (Alvarez Bravo, Cortés Cortés y Moreira Quiñones 2017; Álvarez Bravo, Cortés Cortés y Rodríguez Tamayo 2019).

El cemento se forma a partir de una mezcla de carbonato de calcio, aluminosilicatos u otros materiales de una composición global similar y con la reactividad suficiente, previamente molidos y homogeneizados en las cantidades necesarias (Castillo et al. 2010).

Tabla 1: Materias primas principales del cemento (Tirado Chávez y Solar Jara 2018)

%	COMPONENTE QUÍMICO	PROCEDENCIA	RANGO
		USUAL	APROXIMADO
5	Óxido de Calcio (CaO)	Rocas Calizas	58.2-65.6
	Óxido de Sílice (SiO ₂)	Areniscas	19.8-26.45
	Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	Arcillas	4.1-9.5
	Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	Arcillas	2.1-4.5
5	Óxidos de Magnesio, Sodio, Potasio, Titanio, Azufre, Fósforo y Manganeso	Minerales Varios	-

En el cemento Portland ordinario, el clínquer es el componente principal y mayoritario (≥90%), el cual se obtiene de una mezcla constituida fundamentalmente por dos componentes: rocas calcáreas (≈80%) y roca arcillosa (≈20%) (Pérez-González et al. 2019).

El clínquer se produce a partir de materias primas naturales, como la caliza y la arcilla, que se muelen, homogeneizan y se introducen en un horno rotatorio, donde se cuecen a una temperatura de 1.450°C, necesaria para formar el nuevo compuesto. Está formado por una mezcla de silicatos, aluminatos y

ferritoaluminatos de calcio y se fabrica a partir de la denominada harina de crudo. El proceso de fabricación del clínker de cemento comprende los dos primeros subprocesos que tienen lugar en una fábrica integral de cemento. En primer lugar, el proceso de preparación de las materias primas y, en segundo lugar, las reacciones de clínkerización realizadas en el conjunto torre de intercambio-horno (Jiménez Guerra, Díaz Rodríguez y Fernández Arauzo 2021).

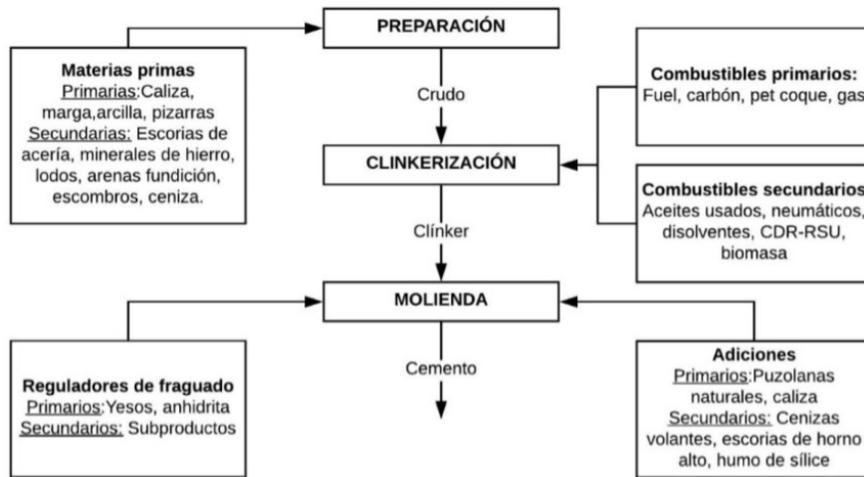


Figura 1: Proceso de fabricación del clínker de cemento

1.3. Los Materiales Cementicios Suplementarios

Los materiales cementicios suplementarios son aquellos que se emplean como sustitos del cemento y que a través de sus propiedades hidráulicas y/o puzolánicas contribuyen al logro de las propiedades mecánicas del concreto endurecido (Fantilli y Józwiak-Niedźwiedzka 2021; Xu et al. 2022).

La tendencia universal de los últimos años ha sido buscar alternativas con mayor impacto en la disminución de las emisiones de CO₂, la cual consiste en la adición entre el 20% y 30% de materiales cementicios suplementarios (MCS) al cemento (Mostafa y Brown 2005; Sánchez, Palacios y Puertas 2011; Polder 2012). El reemplazo de una porción de clínquer o cemento con MCS (Mangi et al. 2020) está reconocida como la manera más efectiva de mejorar o mantener la resistencia mecánica y la durabilidad del concreto, así como de optimizar el perfil integral de impacto al medio ambiente (Pérez-González et al. 2019).

Los MCS se clasifican en aglomerantes hidráulicos y materiales puzolánicos; estos últimos se pueden clasificar, además, en naturales y artificiales como

resultado de la actividad industrial. Los aglomerantes hidráulicos se caracterizan por reaccionar directamente con agua formando productos de hidratación que aportan propiedades cementantes (Hernández Primero et al. 2016). Los materiales cementicios suplementarios más comúnmente empleados son las cenizas volantes, las escorias granuladas, la micro-sílice, las puzolanas naturales y artificiales, el carbonato de calcio y otros (Hernández Primero et al. 2016; Owaid, Hamid y Taha 2012).

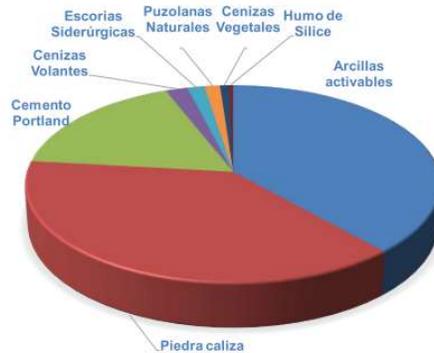


Figura 2: Disponibilidad de MCSs a nivel mundial (Talero Morales et al. 2020).

Las puzolanas son materiales silíceos o aluminosilíceos que, por sí mismos, poseen poca o ninguna actividad hidráulica, pero que, finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ o CH) a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes (Normalización 2007).

Las adiciones puzolánicas se utilizan como material cementicio suplementario, siempre que la puzolana sea reactiva. Las características que, actuando de manera combinada, determinan de forma directa la capacidad de reacción puzolánica de un material dado son la presencia de sílice y alúmina (criterio de composición química) y el contenido de fases con un alto grado de desorden estructural (criterio estructural), de forma tal que presenten una elevada superficie específica (criterio morfológico) (Castillo et al. 2010).

Las puzolanas naturales son principalmente algunos tipos de rocas volcánicas vítreas y rocas sedimentarias fósiles de naturaleza silícea, como las diatomeas y similares. Las puzolanas artificiales, en cambio, son principalmente determinados subproductos silíceos o silíceos y aluminosos, en función de sus

contenidos totales mayoritarios de SiO_2 y Al_2O_3 . A esta categoría pertenecen las cenizas volantes, el humo de sílice, la nanosílice, ciertas arcillas activadas térmicamente –metacaolín–, los esquistos calcinados, los inquemados de la incineración adecuada de la paja y de la cáscara del arroz o del bagazo de la caña de azúcar, algunas escorias metalúrgicas y similares (Herrero Vazquez 2015).

La actividad puzolánica se explica en base a la reacción entre los componentes ácidos de los materiales puzolánicos (sílice, alúmina) con los básicos (cal). La reacción entre éstos ocurre cuando las uniones en dichos materiales son metaestables o lábiles. Las reacciones puzolánicas, al igual que los procesos de hidratación del cemento, transcurren de acuerdo con las leyes cinéticas de las reacciones heterogéneas en estado sólido, con presencia de fenómenos difusivos y marcada influencia de factores de tipo interno y externo de las puzolanas (Aguiar Pérez y Seijo Pérez 2014).

La búsqueda de nuevas fuentes de materiales mediante la recuperación de los residuales sólidos industriales que puedan ser modificados para convertirse en materiales cementicios suplementarios (MCS) es una estrategia a tener en cuenta con el objetivo de sustituir materias primas, disminuir su impacto medioambiental y garantizar un futuro de producciones cada vez más económicas y limpias (Pérez-González et al. 2020). La introducción de materiales sustitutos del cemento Pórtland como las puzolanas, brinda la posibilidad de utilizar productivamente un material de desecho y hacer un uso racional de la disponibilidad de cemento (Martínez Fernández, Quintana Puchol y Martirena Hernández 2007).

Según recopilación recogida de diversos investigadores, se ha establecido que los subproductos pueden presentar propiedades superiores a las de los materiales tradicionales, o darles a estos un valor agregado como es el caso de las escorias de acerería (Leiva Vidal, Montenegro Cooper y Ponce Abarca 2017).

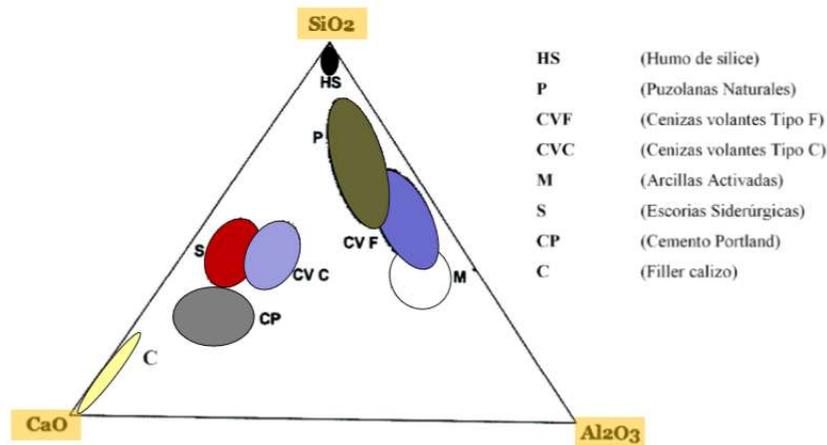


Figura 3: variabilidad de MCSs a nivel mundial en función de su composición (Talero Morales et al. 2020)

1.4. Las escorias siderúrgicas

1.4.1. Definición

Las escorias siderúrgicas son el subproducto de los procesos pirometalúrgicos (Agudelo L., Salazar B. y Parra G. 2004); se generan a partir del material fundido formado por las reacciones químicas entre la materia prima, los materiales añadidos al horno y las impurezas oxidadas durante el refinado del metal (García Avilés y Beyris Mazar 2014). La escoria se consigue mediante la adición de óxidos alcalinos y alcalinotérreos, silicatos, aluminatos, escorificantes, fluidificantes y fundentes en el proceso metalúrgico (Otegi Aldai et al. 2012).

La función metalúrgica de las escorias es la suma de su bajo punto de fusión, de su actividad química y de su baja densidad (Amaral de Lima y Vazquez Ramonic 1999). Estas pueden ser resultantes de un amplio abanico de procedencias como de la metalurgia del hierro, del acero, del níquel, de manganeso, del cromo, del cobre; entre otros (Pérez Fernández et al. 2015).

En estado líquido es una espuma que captura todas las impurezas presentes en el acero, favoreciendo las reacciones químicas en la fase de producción (Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017). La escoria es el residual que se genera en mayor volumen en los procesos siderúrgicos (Najarro-quintero et al. 2018), su procesamiento y uso posterior sería de gran utilidad desde el punto de vista ecológico y un paso importante en la conversión de las acerías en industrias limpias (Zaragoza Valdés et al. 2001).

1.4.2. Características de las escorias

Las escorias están formadas por compuestos más ligeros que el acero y flota sobre los caldos líquidos de las aleaciones férreas (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015), formando una capa de espesor variable (Zaragoza Valdés et al. 2001). La composición química de la escoria, depende fundamentalmente de la materia prima empleada para la producción de acero (Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017) y del proceso de fabricación donde se hayan producido (Otegi Aldai et al. 2012).

Es un material complejo, compuesto de varios materiales más sencillos (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015) en su mayoría óxidos, silicatos, sulfuros, aluminatos y fosfatos, los cuales se forman como consecuencia del proceso tecnológico de obtención de acero (Zaragoza Valdés et al. 2001).

La combinación de los óxidos ácidos y básicos, la formación de los constituyentes de las escorias tienen lugar por fusión a alta temperatura a unos 1600°C y enfriamiento del magma fluido a 1400°C hasta la temperatura ambiente (Calleja 1982). Los componentes ácidos sílice y alúmina ($\text{SiO}_2 = \text{S}$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$) se combinan con los componentes básicos cal y magnesia ($\text{CaO} = \text{C}$ y $\text{MgO} = \text{M}$), con diferentes relaciones S/A y C/M , así como $(\text{C} + \text{M}) / (\text{S} + \text{A})$, dependiendo de los materiales que utilice cada siderurgia (Calleja 1982). Se ve así que en la composición de las escorias entran los mismos óxidos que en la del clínker de cemento portland, aunque en proporciones diferentes (Calleja 1982).

Para caracterizar las propiedades de la escoria, dos relaciones cuantitativas son las más importantes: $\text{CaO} / \text{SiO}_2$ (módulo de basicidad) y $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ (módulo de actividad). Según el valor del primer módulo, se distinguen las escorias ácidas (es menor que uno), neutras (igual a uno o cercano a él) y básicas (> 1) (Batalin 2003). La gran alcalinidad de las escorias se considera la principal razón de la actividad hidráulica que posee (Fathy et al. 2016).

Además de los óxidos, siempre contienen componentes, muchos de los cuales son muy valiosos (compuestos de titanio, vanadio, cromo y otros elementos químicos necesarios para la industria), y en cantidades a menudo no menores que en los minerales naturales (Batalin 2003).

Aparte de la composición química de la escoria y de su basicidad e hidraulicidad expresadas por los respectivos índices, ésta última depende decisivamente y de forma bien directa del contenido de fase vítrea, hasta el punto de que en las escorias como adición para el clínquer se exigen contenidos elevados, del orden del 95 % y superiores (Calleja 1982). Altos porcentajes de fase vítrea, se consiguen mediante enfriamiento rápido de la escoria fundida, por medio de aire o por templado con agua, de tal manera que los constituyentes de la escoria en equilibrio a la temperatura de fusión se mantengan como tales en estado vítreo a la temperatura ordinaria, por congelación brusca de dicho equilibrio (Calleja 1982).

Los análisis mineralógicos demuestran que las escorias de la producción de acero están compuestas, como regla, por distintos compuestos, formados por los óxidos, al combinarse de diversas maneras (Zaragoza Valdés et al. 2001). Las escorias metalúrgicas representan en sí, sistemas cerámicos, cuyas propiedades dependen en gran medida de las particularidades estructurales del SiO_2 (Zaragoza Valdés et al. 2001).

Las muestras de escoria de acero estarán compuestas principalmente de silicato de bicálcico (Ca_2SiO_4 , larnita), silicato de tricálcico (Ca_3SiO_5 , rankinita) y óxido de calcio (CaO , cal) si las escorias se dejan enfriar a una velocidad que se forman fases cristalinas; si se apaga, la escoria será un vidrio de silicato de Ca. La fase primaria más comúnmente reportada en los estudios de escoria de acero (es larnita; el silicato tricálcico y el óxido de calcio también se informaron en múltiples muestras. El aluminio, Fe y Mg son menos abundantes y generalmente están presentes en los silicatos de Ca que pueden acomodar estos elementos, por ejemplo, monticellita (CaMgSiO_4), melilita y merwinita. Además, las fases de óxido de Al, Fe y Mg, incluidas las espinelas y SiO_2 (cuarzo o cristobalita), son comunes en las escorias de acero. (Piatak, Parsons y Seal 2015).

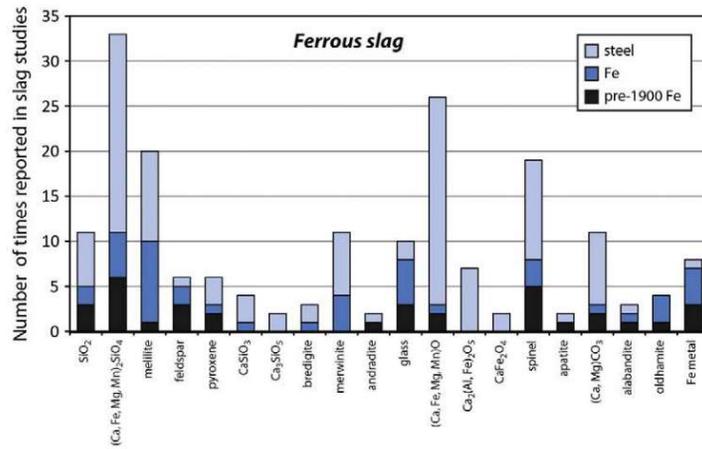


Figura 4: Número de veces que se identificaron minerales primarios (Piatak, Parsons y Seal 2015)

La composición mineralógica de las escorias puede sufrir grandes variaciones en función de la forma de enfriamiento a la que son sometidas, variando a su vez sus propiedades físicas (Loncnar et al. 2017).

1.4.3. Tipos de escorias

Las escorias siderúrgicas generalmente se clasifican en función de su procedencia. Las escorias más utilizadas en el campo de la construcción son las que provienen de la fabricación del hierro y del acero (Otegi Aldai et al. 2012; Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018). Diferentes tipos de métodos de producción de acero dieron como resultado diferentes tipos de escoria (Zulkarnin 2015), el nombre de las escorias se establece en función del tipo de horno en que se obtiene (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015).



Figura 5: Clasificación de las escorias siderúrgicas según su procedencia (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018)

Durante la fabricación del hierro o arrabio se lleva a cabo mediante la ruta integral del horno alto (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018), se combinan y calientan hasta su fundición minerales de hierro y carbono en el interior del horno, así como fundentes (cal y/o dolomita) (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015) y en la superficie de la colada se concentran las escorias. Estas escorias se clasifican en 4 tipos, dependiendo del método de enfriamiento utilizado: granuladas, expandidas, enfriadas al aire y peletizada (Calleja 1982; Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015).

Tabla 2: Tipos de escorias de alto horno BF (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015)

Tipos de escoria de alto horno BF			
		Elemento de enfriamiento	
		Aire	Agua
Tiempo de enfriamiento	Lento	Escoria BF cristalizada	Escoria BF expandida "foamy"
	Rápido		Escoria BF vitrificada granulada

Las escorias granuladas se obtienen por enfriamiento brusco de la escoria líquida, dejándola caer sobre un chorro de agua fría (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018). Este proceso se denomina granulación, porque la escoria se descompone en pequeñas partículas más o menos alveolares con aristas cortantes, obteniéndose un producto similar a una arena (Méndez Piña y Gómez García 2011). La escoria obtenida es un material vítreo con propiedades hidráulicas latentes (García Avilés y Beyris Mazar 2014; Pérez Fernández et al. 2015). Puede ser utilizada como árido fino (Amaral de Lima y Vazquez Ramonic 1999) y como adición activa en la fabricación de cemento Portland (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015).

Las escorias expandidas se obtienen al añadir una pequeña cantidad de agua (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018), aire o vapor de forma controlada a la escoria fundida a fin de someterla a un enfriamiento rápido (Pérez

Fernández et al. 2015). La solidificación acelerada aumenta la naturaleza vesicular de estas escorias produce un material ligero que tiene como principal característica una baja densidad (Amaral de Lima y Vazquez Ramonic 1999; Marrero Rodríguez y Acevedo Catá 2011).

Este material es triturado y clasificado por fracciones (García Avilés y Beyris Mazar 2014), logrando un árido de baja densidad que se emplea como árido de mampostería de hormigones ligeros (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018). Pueden ser utilizadas como base en la preparación de plataformas de carreteras (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015). Se puede utilizar como árido en bloques de hormigón ligero desarrollando una alta calidad en cuanto a resistencia y durabilidad, siendo resistentes principalmente al fuego (Marrero Rodríguez y Acevedo Catá 2011).

Cuando la escoria líquida se deja enfriar lentamente al aire libre se obtiene un material pétreo, con textura rugosa, abundantes poros tanto externos como internos (Méndez Piña y Gómez García 2011), de color gris oscuro y características similares a las rocas volcánicas que presenta (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018). Los óxidos componentes se cristalizan, pero no tiene lugar una cristalización total, resultando una mezcla de componentes cristalinos y vítreos (Amaral de Lima y Vazquez Ramonic 1999). Este material se emplea comúnmente como árido de construcción tras someterlo a cribado y trituración (García Avilés y Beyris Mazar 2014). Se utiliza en la preparación de bases y subbases de carreteras (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015).

La escoria peletizada se obtiene al dejar caer la escoria líquida sobre un tambor giratorio, regado con agua, que lanza la escoria al aire, formando una pila al caer al suelo (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015). Mediante los oportunos ajustes en los equipos de peletización (velocidad del tambor, relación agua/escoria, etc.) es posible controlar las proporciones producidas de los tamaños de partículas, así como su grado de vitrificación (Méndez Piña y Gómez García 2011). Este tipo de escoria es de baja porosidad y posee baja capacidad de absorción de agua (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018).

La fabricación del acero es posible llevarla a cabo mediante dos métodos: la ruta integral del horno alto y la ruta del horno eléctrico de arco.

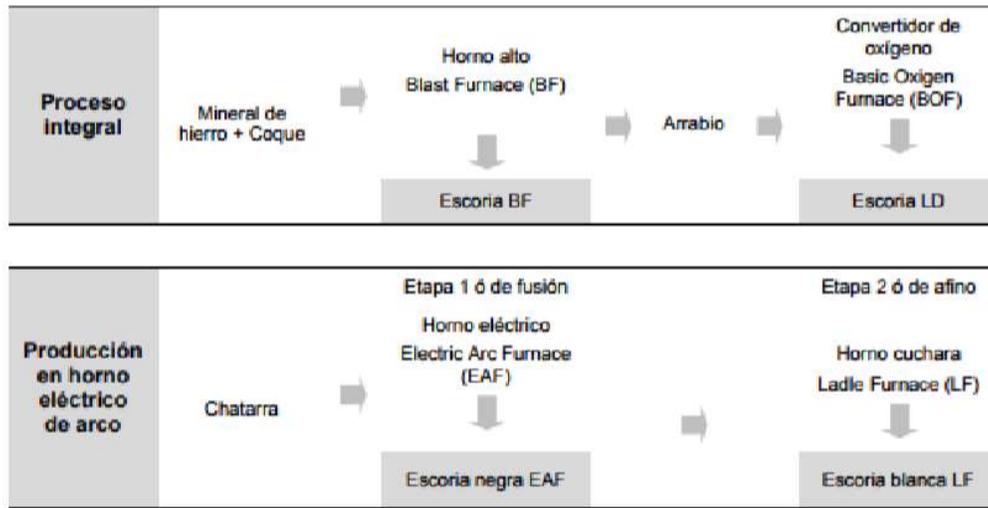


Figura 6: Métodos para la fabricación del acero

Como se puede observar, en cada tipo de horno se generan diferentes tipos de escorias con características fisicoquímicas distintas.

El arrabio producido en el horno alto, durante la ruta integral, tiene un alto contenido en carbono (3,5%), por lo que es un material frágil y quebradizo (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015). Para evitar este comportamiento, el arrabio en estado líquido se trata en el Convertidor de Oxígeno (BOF en inglés), obteniendo acero líquido con escoria LD líquida en la superficie (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018).

La fabricación del acero a través del horno eléctrico de arco se lleva a cabo en dos etapas. En la primera, denominada metalurgia primaria o proceso de fusión, se incluyen una serie de fases como la oxidación, dirigida a eliminar impurezas de manganeso, silicio y cromo, la defosforación y la formación de escoria espumante, en la que se acumulan todas las impurezas (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015). En esta etapa se funde la chatarra con los fundentes en el horno eléctrico (EAF - Horno de arco eléctrico) obteniendo el metal fundido con escorias líquidas de tipo EAFS (Escorias de horno de arco eléctrico o escorias negras) en la superficie.

En la segunda etapa, llamada metalurgia secundaria o proceso de afino, el baño fundido se traslada al Horno Cuchara (LF - Ladle Furnace). Una vez en el horno, se cubre inmediatamente con una escoria reductora y se agita continuamente con el soplado de gas inerte, normalmente argón (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015). En esta etapa se lleva a cabo la desoxidación, desulfuración, desgasificación y el ajuste de composición. Cuando la escoria se forma en esta segunda etapa, es conocida como escoria blanca (LFS – Ladle Furnace Slag) (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018).

Para la fabricación de aceros inoxidables de alta aleación, la segunda fase se lleva a cabo en Convertidores AOD, que soplan oxígeno y argón por su zona inferior (lo que permite obtener un acero más limpio), dando lugar a escorias de tipo AOD, las cuales apenas se utilizan debido al alto contenido de cromo y sus deficientes propiedades físicas (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018).

Tabla 3: Residuos y cantidad generada por tonelada de acero producida (Zelada Muñoz y Rodríguez Castillo 2016)

Residuo	Cantidad (kg/t acero)
Escoria de horno eléctrico	110-150
Escoria de horno cuchara	20-30
Polvo de acería	13-20
Laminilla	6-10
Refractarios	2-4
Electrodos	1-2

1.5. Escorias blancas

1.5.1. Definición

Las escorias blancas (LFS) de horno eléctrico de arco, o también llamadas escorias reductoras, son subproductos de la fabricación del acero (Najarroquintero et al. 2018), durante el proceso de afino (Regueira Boza 2011) y cuya materia prima principal es la chatarra (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018)

Los principales factores que influyen en la cantidad de escoria de horno de arco eléctrico producida son el contenido de óxido de hierro, la basicidad de la escoria,

el volumen de alimentación de oxígeno, el tipo de carbón utilizado y la eficiencia del arco eléctrico (León Aguilar y Almenares Reyes 2017).

1.5.2. Características

La escoria blanca es un material de coloración blanquecina a grisáceo, suave al tacto, pulverulento (León Aguilar y Almenares Reyes 2017), el blanco color indica que se encuentra totalmente reducida o desoxidada (Leiva Vidal, Montenegro Cooper y Ponce Abarca 2017). Tonalidades intermedias, representan grados de oxidación comprendidos entre el máximo de la escoria negra, y el mínimo de la blanca (Leiva Vidal, Montenegro Cooper y Ponce Abarca 2017). En el proceso del acero en el horno de cuchara se obtiene la escoria blanca con una proporción entre 40 y 70 kg por cada tonelada de acero producido (Pérez Fernández et al. 2015).

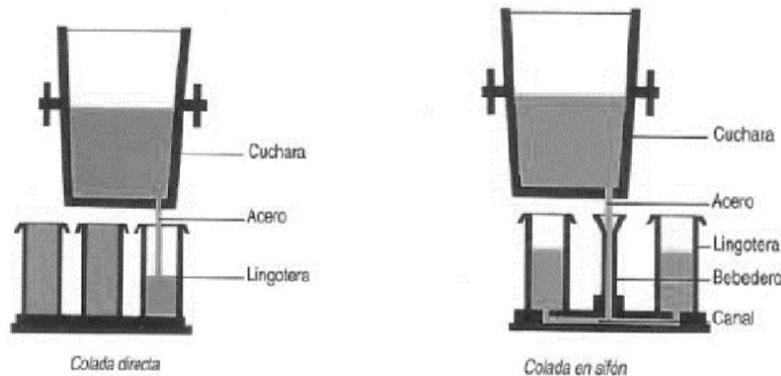


Figura 7: Esquema de un horno de cuchara (Caballero Garrido, Montenegro Cooper y Ponce Abarca 2017; Leiva Vidal, Montenegro Cooper y Ponce Abarca 2017)

Las escorias blancas poseen una gran cantidad de finos, lo que las dota de buenas propiedades cementicias (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018). Se podría caracterizar como un material cementante suplementario de baja resistencia inicial, que muestra algunas propiedades hidráulicas y puzolánicas latentes (Papayianni y Anastasiou 2012).

La escoria blanca y el cemento presentan una constitución física y una composición química muy parecida (Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017). En términos de tiempo de fraguado la tasa de hidratación es más lenta que la del cemento, lo que lleva a un tiempo de fraguado más prolongado (Liu et al. 2022).

La microscopía electrónica de barrido de la escoria ha mostrado que las características físicas de sus partículas de polvo tienen la forma de cristales poliédricos individuales y agregados irregulares formados por cristales poliédricos con contornos definidos que son porosos y huecos (Santamaria et al. 2019). Cuando los agregados que contienen cristales poliédricos entran en contacto con el agua, la acción capilar atrae el agua hacia adentro, llenando los espacios huecos (Santamaria et al. 2019).

La composición de las escorias depende principalmente del tipo de chatarra utilizada, así como del control de las variables de operación (Pérez Fernández et al. 2015; Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018). Sus características pueden verse afectadas por las condiciones ambientales en su almacenamiento (Jiménez Guerra, Díaz Rodríguez y Fernández Arauzo 2021)

Las escorias blancas están compuestas principalmente de calcio, y en menor proporción de silicio y aluminio (Pérez Fernández et al. 2015); en cambio, el contenido en hierro de estas escorias es bajo (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018). La SiO_2 reactiva se encuentra por encima del 25% lo que implica la posibilidad de mostrar propiedades hidráulicas y cementantes, por lo que, las escorias blancas mostrarían un considerable potencial cementicio (17-31% SiO_2) (Jiménez Guerra, Díaz Rodríguez y Fernández Arauzo 2021).

Si bien la escoria blanca manifiesta cierta hidraulicidad, ésta afecta a las resistencias mecánicas sólo a edades tempranas y para un grado de sustitución inferior al 20%, en sustituciones parciales en torno a un 10% de escoria blanca inducen procesos cementantes (Jiménez Guerra, Díaz Rodríguez y Fernández Arauzo 2021)

La cal libre (originalmente CaO , y tras envejecimiento Ca(OH)_2 y CaCO_3) (Ortega-López y MANSO VILLALAÍN 2011) y el magnesio libre también se pueden encontrar en las escorias blancas, estos compuestos pueden llevar a fenómenos de expansión, si éstas se hidratan (Santamaria et al. 2019).

Los óxidos de silicio, aluminio y los óxidos férricos representan menos del 40% del peso total; el ratio CaO/SiO_2 ronda alrededor de 2 (Otegi Aldai et al. 2012). Las escorias blancas tienen un índice de basicidad entre 3 y 4 (Pérez Fernández et al. 2015).

La basicidad puede ser reflejo del grado de reacción hidráulica, en muestras con valores mayores a 1,5 indica una alta reactividad al entrar en contacto con el agua (Caballero Garrido, Montenegro Cooper y Ponce Abarca 2017). Otros compuestos, incluidos los óxidos de manganeso y titanio, están presentes en cantidades menores (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018).

El resto de su masa se compone de compuestos de azufre, pequeñas cantidades de hierro metálico, separables por métodos magnéticos, y trazas de titanio, manganeso, sodio y potasio (Santamaria et al. 2019), que en conjunto representan menos del 40 % del peso total (Zulkarnin 2015). Al producirse en el proceso de afino, posterior al de fusión, puede contener impurezas de escoria negra que se hayan movilizado con el vertido del caldo de acero del HEA al horno cuchara (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018) y densidad aparente de $\sim 2,7 \text{ g/cm}^3$ y una densidad total de $\sim 1,4 \text{ g/cm}^3$ (Cañas Gallart y Aguado De Cea 2012)

Tabla 4: Composición química y metales pesados de las escorias blancas (Losáñez, 2005, Geiseler 1995) (Pérez Fernández et al. 2015)

Composición química	% en peso	Metales pesados	Mg/kg
CaO	30-52	As	<25
CaO libre	1-10	Cd	<0,5-2
SiO ₂	8-23	Cr total	100-5000
Al ₂ O ₃	3-20	Cu	5-100
MgO	6-12	Hg	<0,01
Fe total	0,5-2	Ni	5-100
Mn total	0,5-3	Pb	5-100
		Zn	5-100

La composición mineral de una escoria varía en función de su composición química (Caballero Garrido, Montenegro Cooper y Ponce Abarca 2017). En la composición mineralógica de las escorias blancas predominan los óxidos y los silicatos (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018). El 80% de la masa de la escoria blancas se compone de silicatos de calcio y aluminatos de calcio que también contienen magnesio y otros cationes (Santamaria et al. 2019).

Los silicatos de calcio son el componente mayoritario en la escoria fresca, estas fases mineralógica están representadas típicamente por el dióxido (MgCaSi₂O₆), merwinita (Ca₃Mg (SiO₄)₂), rankita (Ca₃Si₂O₇), wollastonita (CaSiO₃), larnita (β -Ca₂SiO₄), bredigita (Ca₇Mg (SiO₄)₄), ingesonita (γ -Ca₂SiO₄), y el olivino de calcio (Chiang y Pan 2017).

La fase mineral mayoritaria de las escorias blancas, es el silicato bicálcico (belita C₂S) (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018). Este es el componente que aporta la mayor actividad puzolánica (Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017) y presenta actividad cementicia latente (Fang et al. 2022).

El C₂S puede estar presente en la escoria blanca en diferentes fases: α, αH', α, β y γ (Otegi Aldai et al. 2012; Brand y Fanijo 2020; Kriskova et al. 2013; Chang, Fang y Shang 2016). La fase α-C₂S es estable a muy altas temperaturas, durante el enfriamiento de la escoria cambia a β-C₂S a 630°C (Otegi Aldai et al. 2012). Cuando la temperatura baja entre 450-500°C la fase β (larnita β -C₂S estable a altas temperaturas) del silicato bicálcico (belita C₂S) (Serjun, Mirtič y Mladenovič 2013), experimenta una transición de fase sólida alotrópica a la fase γ (ingesonita γ -C₂S estable a bajas temperaturas) (Chiang y Pan 2017).

La transformación de β a γ viene acompañada de un incremento de volumen del orden entre 10% y 12% (Cañas Gallart y Aguado De Cea 2012; Sahoo, Nayak y Ranjan 2021), y como resultado provoca la rotura de la matriz en polvo debido a la diferencia en la estructura cristalina y densidad (Pérez Fernández et al. 2015). La mayor parte de la larnita no desarrolla este cambio de fase y tiene una importante contribución a la resistencia del material (Marrero Rodríguez y Acevedo Catá 2011).

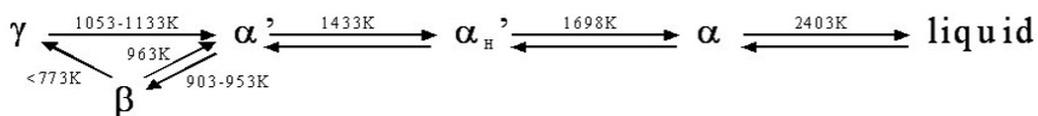


Figura 8: Transformación de las fases C₂S (Otegi Aldai et al. 2012) .

Las formas anhídridas de silicatos de calcio y aluminatos, son potencialmente reactivos con agua, incluso la cal, libre e hidratada, y la periclusa (MgO) pueden reaccionar con el agua y el dióxido de carbono (CO₂). Así, el silicato bicálcico puede desarrollar características hidráulicas bajo condiciones favorables de

temperatura, humedad y catálisis, donde las exigencias para la reacción son bajas y es de esperar que la larnita (β -C₂S), bredigita y la ingesonita reaccionen con agua de forma natural (Pérez Fernández et al. 2015).

Los aluminatos de calcio reaccionan con el agua en condiciones de temperatura ambiente dando lugar a aluminatos hidratados a poco tiempo de ser expuestos al agua (Otegi Aldai et al. 2012). Estos aportan una temprana actividad hidráulica is the main component that produces fast setting and fast hardening characteristics in set-controlling cement (Fang et al. 2022).

La hidratación de los diferentes aluminatos de calcio es muy rápida, sobre todo la de mayanita (C₁₂A₇), y se forman los hidratados tales como C₂AH₈, C₄AH₁₃, CAH₁₀ y C₃AH₆ (Adesanya et al. 2018). Entre los productos hidratados de los aluminatos de calcio, sólo C₃AH₆ es termodinámicamente estable, con lo que los demás hidratados se convierten a C₃AH₆. Los productos hidratados de aluminatos de calcio proveen a la escoria el desarrollo de resistencia mecánica, pudiendo ser esta baja o moderada. La conversión de los mismos al producto final hidratado C₃AH₆ afecta negativamente a la resistencia del material. El hecho de que la cantidad de los mismos es inferior al 40% en peso, hace que la característica cementante bajo condiciones normales de hidratación sea débil (Otegi Aldai et al. 2012).

Los componentes óxidos libres de calcio y magnesio (portlandita, periclasa) pueden tener lugar los procesos de hidratación y carbonatación (Otegi Aldai et al. 2012), estas son las principales fases minerales responsables de la expansión (Montenegro-Cooper et al. 2019). Así de la cal libre por hidratación primero se obtiene portlandita (Ca (OH)₂) y posteriormente por carbonatación se obtienen las formas calcita y vaterita (CaCO₃). La transformación de cal libre a portlandita supone incremento de volumen, sin embargo, la carbonatación no provoca grandes variaciones volumétricas. La hidratación lenta y carbonatación de MgO que ocasiona grandes cambios volumétricos (Otegi Aldai et al. 2012).

Por otro lado, la presencia de espinela (MgAl₂O₄) tiene como principal inconveniente la presencia de MgO, que puede presentar expansión a largo plazo (Pérez Fernández et al. 2015; Landaberea Lorenzo y San José Lombera

2018; Santamaria et al. 2019). El incremento de volumen en %, cuyos valores se sitúan entre el 5 – 25 % (Cañas Gallart y Aguado De Cea 2012).

El grado de envejecimiento de una escoria viene determinado principalmente por la hidratación y la carbonatación (Marrero Rodríguez y Acevedo Catá 2011)

Existen otros factores de influencia sobre la resistencia al hinchamiento, aunque son de menor importancia también se deben tener en cuenta como son la porosidad de la escoria, el tamaño de grano de la cal libre y el tamaño granulométrico de la escoria (Cañas Gallart y Aguado De Cea 2012).

Hay un factor que también se debe tener en cuenta desde el punto de vista mineralógico. Dependiendo del enfriamiento a que es sometido el material, puede ser más o menos expansivo. Los elementos que han sido identificados en la composición química pueden estar distribuidos en la matriz formando compuestos cristalinos o pueden estar formando compuestos amorfos (Amaral de Lima y Vazquez Ramonic 1999).

Se sabe que cuando se deja enfriar lentamente un material a altas temperaturas y en estado líquido, los elementos se agrupan ordenadamente formando estructuras cristalinas estables. Pero cuando la escoria se enfría bruscamente, los elementos no se agrupan de forma ordenada sino formando compuestos amorfos. La importancia de detectar el contenido de materia amorfa está en que tiende a reordenarse, lo que les confiere las propiedades de reactividad hidráulica (reacciona con el agua) y reactividad puzolánica (reacciona con el hidróxido cálcico) (Cañas Gallart y Aguado De Cea 2012).

Tabla 5: Composición mineralógica de las escorias blancas (Pérez Fernández et al. 2015).

Fase mineral	% en peso	Principales componentes, molar %
<i>Silicato bicálcico</i>	30-60	CaO (64), SiO ₂ (32), P ₂ O ₅ (1-3)
<i>Silicato tricálcico</i>	0-30	CaO (70-73), SiO ₂ (23-25)
<i>Cal libre</i>	0-10	CaO (75-90), Mn (25-30), CaO (10-20), SiO ₂ (0-10)
<i>Espinela</i>	5-20	Al ₂ O ₃ (50-55), MgO (25-30), CaO (10-20), SiO ₂ (0-10)

1.5.3. Usos de las escorias blancas del horno de cuchara en la construcción

Actualmente apenas existen alternativas para el uso de la escoria blanca, siendo la mayor parte destinada a vertederos (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018). Este material se utiliza principalmente en la industria de los materiales de la construcción (Pérez Fernández et al. 2015; Quevedo Gómez y San José Lombera 2018; Fernández Pérez, Zúñiga Igarza y Urbina Reynaldo 2017) donde han alcanzado determinadas aplicaciones (Zaragoza Valdés et al. 2001).

La única alternativa de valorización de las escorias blancas es su utilización en las fábricas de cemento en sustitución de la marga (Marrero Rodríguez y Acevedo Catá 2011) como materia prima para la fabricación de clínker (Serjun, Mirtič y Mladenovič 2013; Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018; Jiménez Guerra, Díaz Rodríguez y Fernández Arauzo 2021). Para esta alternativa no es necesario un pre tratamiento previo, siempre y cuando se tenga la precaución de no incluir elementos extraños, como trozos metálicos, y los tamaños de las partículas del material sean inferiores a 50 mm (Marrero Rodríguez y Acevedo Catá 2011). Debido al pobre contenido en hierro no se utilizar en cementera como aporte de hierro (Pérez Fernández et al. 2015). También se ha evaluado como materia prima en la producción de cemento belítico sulfoaluminoso (en un 10%). (Jiménez Guerra, Díaz Rodríguez y Fernández Arauzo 2021).

Estas escorias se pueden usar como materiales cementicios complementarios (León Aguilar y Almenares Reyes 2017) y reportan efectos similares en la liberación de calor de hidratación del cemento (Fang et al. 2022). Se puede sustituir parcialmente el clínquer, en la producción de Cemento Portland 350 (Zaragoza Valdés et al. 2001), hasta alrededor del 5% del volumen total a fin de evitar contenidos mayores del 2% en magnesio que ocasionen la inestabilidad volumétrica (Landaberea Lorenzo y San José Lombera 2018). Se observa la disminución de hasta un 40% de costo, debido a la utilización de la escoria como sustituto del clínquer (Morán Menéndez, Parrales Cantos y Carvajal Rivadeneira 2021).

Las principales aplicaciones de LFS en la sustitución del cemento es en morteros y hormigones (Dondi et al. 2021). Mejorando las prestaciones de los morteros de

revestimiento, colocación (Borges Marinho et al. 2017), buen comportamiento de la durabilidad (Santamaría Vicario, Rodríguez Sáiz y Calderón Carpintero 2015) y la trabajabilidad (Papayianni y Anastasiou 2006). Se recomienda que la cantidad de cemento de reemplazo de escoria no exceda el 20% en peso. (Chang et al. 2019).

Con la adición de la escoria en un 15% se ha reportado un aumento de la resistencia a la compresión y a la tracción (Fang et al. 2022) y una mejora en la trabajabilidad del hormigón (Naik et al. 2022).

En general se podría caracterizar como un material cementante suplementario de baja resistencia inicial (Papayianni y Anastasiou 2012). Los valores de resistencias alcanzados permiten pensar en su posible uso en morteros de albañilería y en otras aplicaciones de cementos de baja resistencia. (Jiménez Guerra, Díaz Rodríguez y Fernández Arauzo 2021). En el caso de los morteros en que la escoria ha sido utilizada como ligante, la resistencia adquirida es muy baja (Morán Menéndez, Parrales Cantos y Carvajal Rivadeneira 2021).

Estas escorias también presentan un gran interés para su activación alcalina y desarrollo de geopolímeros (Hui-Teng et al. 2022); y buenas cualidades de fabricación de productos (Viček et al. 2009), como morteros de escoria de cuchara activada con álcali (Najm, El-hassan y El-dieb 2022).

El LFS podría reemplazar con éxito una porción de FA para formar un mortero de geopolímero (Hui-Teng, Cheng-Yong y Yun-Ming 2021). La escoria del horno cuchara contribuyó como precursores y rellenos simultáneamente, mejorando la compacidad del geopolímero de ceniza volante/escoria fina la naturaleza rica en calcio de la escoria de horno cuchara facilitó la formación de geles CeSeH en la estructura del geopolímero, lo que resultó en un incremento de la resistencia a la flexión (Yong-Sing et al. 2021).

En las industrias del cemento y el hormigón, la escoria se puede utilizar como árido (Lim et al. 2016). Los morteros fabricados con escoria como árido fino poseen resistencia a compresión a 28 días 52% mayor que la resistencia adquirida por el mortero de referencia y resistencia a flexo-tracción 33% mayor que la resistencia del mortero de referencia. La utilización de la escoria como

árido en morteros aporta resistencia mejorando el comportamiento mecánico (Morán Menéndez, Parrales Cantos y Carvajal Rivadeneira 2021).

1.6. Antecedentes de la investigación de las escorias blancas de la empresa ACINOX Las Tunas

La empresa ACINOX de Las Tunas fue fundada en 1991 y casi desde su fundación comenzó a utilizar la escoria como solución a muchos de sus problemas internos. En 1993 iniciaron utilizándola como recubrimiento del horno de arco eléctrico– sustituyendo parte del cemento a utilizar como revestimiento del horno- para evitar que el hierro fundido entre en contacto con la chatarra (Regueira Boza 2011).

En la empresa ACINOX de Las Tunas, se han utilizado las escorias blancas generadas en su proceso productivo como extensor del cemento, para dar solución a muchos de sus problemas internos en la construcción de pisos, muros delimitadores y la cimentación de cercas en varias instalaciones de la acería. En el año 2006 otras empresas del territorio comenzaron a mostrar interés en la utilización de dicho residuo. A partir del 2010, basados en investigaciones y ensayos internos de la fábrica, fueron utilizadas para elaborar 5 000 bloques de hormigón y para la construcción de más de 3000 m² de aceras en el reparto médico del municipio Tunas (Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017).

En el año 2011 Maile Regueira Boza estableció que la escoria producida por la planta ACINOX de Las Tunas posee propiedades muy semejantes a las escorias que han sido investigadas en el ámbito internacional con la finalidad de ser usadas en la construcción y a partir del análisis económico realizado, tomando como base la empresa “Argelia Libre” del municipio Manatí así como las experiencias a nivel internacional, se deduce que, utilizando la escoria de la planta ACINOX de Las Tunas, se pudieran ahorrar aproximadamente 1 800 toneladas de cemento (Regueira Boza 2011).

En el 2012 Divo Durruthy estableció un sistema de gestión ambiental para una empresa siderúrgica en Cuba, tomando como objeto de estudio la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas. En este trabajo se confirmó que para el cierre de septiembre de 2012 se depositaron 8 694 T de escorias y que desde 2009 se

eliminó el vertimiento de un total de 31668 T de escoria ubicándolos correctamente en el relleno sanitario (Divo Durruthy 2012).

Emilio García Avilés en el 2014 (García Avilés y Beyris Mazar 2014) evalúa el empleo de las escorias blancas de acería de la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas, como alternativa para la obtención de materias primas que satisfagan la industria de materiales de la construcción, con la sustitución parcial del cemento. Se obtuvo que la sustitución de cemento P-35 hasta un 15% de escoria generan excelentes resultados a la compresión; en cambio las mejores prestaciones en morteros se obtienen con sustituciones de un 10%.

El estudio de la escoria de acería de horno de arco, se ha enmarcado en su uso en hormigones de 20.0 MPa. Se ha determinado que la aplicación de este material es variada, lo que permite catalogarlas como materia prima alternativa para la elaboración de hormigones masivos, usadas como áridos dentro de la mezcla (Fernández Pérez, Zúñiga Igarza y Urbina Reynaldo 2017)

En el año 2017 Maile Boza Requera (Boza Regueira, Estrada Cingualbres y Sánchez Soler 2017) evalúa la posibilidad de emplear las escorias blancas de acería de la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas, en la fabricación de tejas de fibrocemento mediante la sustitución de cemento, obteniendo resultados positivos, gracias a las características puzolánicas similares a la del cemento.

Isierys León Aguilar en el año 2017 (León Aguilar y Almenares Reyes 2017) evaluó las escorias blancas de acería de la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas como sustituto parcial de cemento Portland, determinando que este es un material puede considerar como cementicio suplementario con una capacidad de sustitución de un 30% de cemento P-35, para proporcionar un aglomerante con resistencia similar a un cemento PP-25.

1.7. Conclusiones parciales

- La industria cementera posee un peso considerable en el desarrollo de la sociedad moderna y a la vez lucha por su sostenibilidad por los grandes volúmenes energéticos y la gran incidencia que tienen en la generación de CO₂.
- El empleo de los MCS en la sustitución parcial del clínquer es la forma más viable de aumentar la sostenibilidad de las producciones de cemento

sin comprometer sus propiedades, permitiendo además el aprovechamiento de residuos industriales.

- Las características de las escorias producidas en la industria siderúrgica están condicionadas principalmente por la materia prima empleada y proceso de fabricación donde se hayan producido.
- Las principales escorias empleadas en la industria de la construcción son las escorias producidas en la producción del hierro y el acero.
- Dentro de la producción de acero por la tecnología de arco eléctrico las escorias blancas presentan elevadas perspectivas para su empleo como MCS por sus propiedades hidráulicas y cementantes.
- Las escorias blancas de la acería ACINOX de las Tunas ha sido estudiada en ocasiones anteriores para su uso varias aplicaciones para la sustitución parcial de cemento, pero no se ha valorado la influencia de la composición química y mineralógica en cada fracción granulométrica presente en la escoria como forma de mejorar las prestaciones de este material y eliminar impurezas perjudiciales durante su aplicación.

Capítulo 2. Materiales y métodos

2.1. Introducción

En el presente capítulo se enumeran los materiales y métodos utilizados para la realización de esta investigación, la misma estuvo dividida en cuatro etapas fundamentales. En la primera etapa se realiza una revisión bibliográfica de todos los materiales actualizados que guardan relación con la investigación, permitiendo desarrollar el marco teórico conceptual. La segunda etapa se dedica a los trabajos de documentación de las características de la pila de escoria y tomar de muestras para la investigación.

En la tercera etapa se desarrollaron los trabajos de laboratorio donde se realizó Difracción de Rayos X, Espectrometría de Absorción Atómica y la caracterización de la distribución granulométrica de las escorias. Además, se establecieron fracciones granulométricas que fueron caracterizadas por Difracción de Rayos X y Espectrometría de Absorción Atómica. Se establecieron el índice de basicidad y el índice de hidraulicidad de cada fracción granulométrica de escoria. Se determinó la influencia química y mineralógica de cada fracción su posible aplicación como materiales de construcción.



Figura 9: Flujograma de la investigación

2.2. Trabajos de documentación y muestreo

La planificación de los trabajos de muestreo estuvo sustentada en las características identificadas durante la revisión bibliográfica para depósitos a caballo. Se tomó 1 Kg de escoria de cada parte de la pila para garantizar la representatividad dentro del estudio. El método seleccionado para la toma de muestras fue el del surco para garantizar la representatividad del material. Se tomaron muestras puntuales y muestras compósitos para los estudios de laboratorio.

2.3. Trabajos de laboratorio

Preparación

El primer paso durante los trabajos de laboratorio fue la preparación de las muestras. Las muestras fueron sometidas a un proceso de selección y generación de muestras compósito. Para garantizar la homogeneidad de las muestras se realizó un proceso de cuarteo manual.

Estas muestras fueron sometidas a un proceso de secado para eliminar la humedad natural del material. El secado se efectuó en un horno, fijando la temperatura de secado de las muestras a 110°C por un período de tiempo de 1 h. Al concluir el ciclo de secado se extrajeron las muestras del horno con la ayuda de pinzas especiales. Inmediatamente se colocaron en una desecadora de vidrio con óxido de sílice, para eliminar posibles errores durante la investigación, por la hidratación del material con la humedad atmosférica. El enfriamiento del material se realizó dentro de la desecadora por un periodo de 30 min.



Figura 10: Materiales empleados

Separación granulométrica

La granulometría es la distribución de los tamaños del material, expresada como porcentaje en masa que pasa por los tamices. El tamaño del árido es expresado como una franja entre el tamiz más pequeño (d) y el mayor (D), expresados ambos en mm.



Figura 11: Tamices normados empleados para estudiar la escoria

La separación granulométrica se efectuó de manera manual con el empleo de 7 tamices estandarizados, representativos de la granulometría del material. Se tomaron 500 g de escoria, previamente homogenizada y cuarteada, como muestra representativa a estudiar. Se tamizaron las muestras con movimientos uniformes con un período de 1 h por tamiz. El material retenido en cada fracción fue pesado con la ayuda de una balanza analítica digital tipo Sartorius. Se logró un 96% de recuperación de material, un 4% de pérdidas de material generadas durante el proceso de tamizado.

Tabla 6: Granulometrías empleadas para el análisis granulométrico

Muestra	Tamiz (mm)	Tamiz (μ)
EA-1	1	1000
EA-2	0.5	500
EA-3	0.35	350
EA-4	0.25	250
EA-5	0.125	125
EA-6	0.088	88
EA-7	0.044	44

Por la representatividad de las fracciones retenidas se decidió tomar 3 muestras entre ellas 2 compósitos (CEA-1, CEA-2) de la mezcla de varias fracciones menos representativas del volumen total estudiado. Para la elaboración de las muestras compósito se empleó una suma ponderada para mantener la representación porcentual de cada fracción dentro del total de la muestra.

Tabla 7: Fracciones empleadas para el estudio químico y mineralógico

Muestra	Fracciones (mm)
EA-1	2-1
CEA-1	1-0.088
CEA-2	0.088-0

Separación magnética

Se efectuó una separación magnética manual por fracciones, empleando un imán permanente. Se procedió a pesar 10 g de material empleando la balanza analítica sobre un papel de filtro, anteriormente tarado. Posteriormente el material fue expuesto a la influencia de un campo magnético de 1 N procedente del imán. Esto posibilitó que las partículas magnéticas fuesen adheridas por el imán. Mediante el pesado del material no adherido al imán se efectuó la determinación del material no magnético y por diferencia del material magnético por fracciones. Estos resultados se porcentualizaron para establecer el comportamiento de la fracción magnética en la muestra total de escoria.



Figura 12: Imán empleado para separar la fracción magnética de la escoria

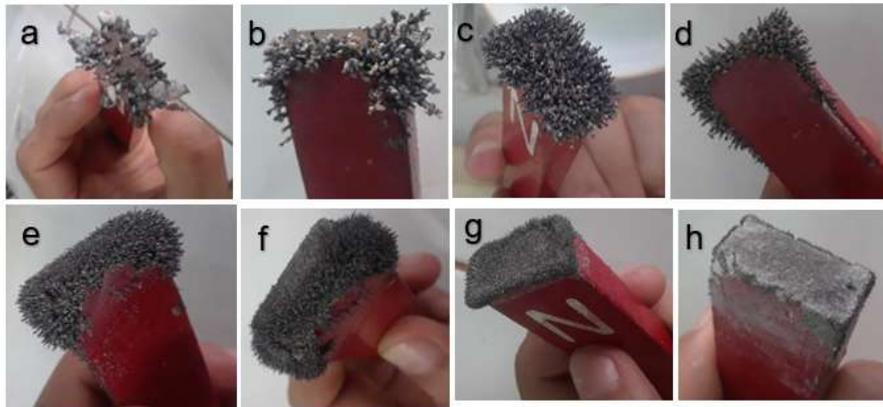


Figura 13: Contenido de material magnético por fracciones

DRX

Las mediciones se realizaron con un Difractómetro X'Pert³ Powder de Panalytical utilizando radiación CuK α y rejilla de divergencia de 0,5 °. Las muestras se analizaron entre 5 y 80 ° (2 θ), con paso angular desde 0,008 °, tiempo por paso de 30 segundos, y sin filtro de níquel Ni.

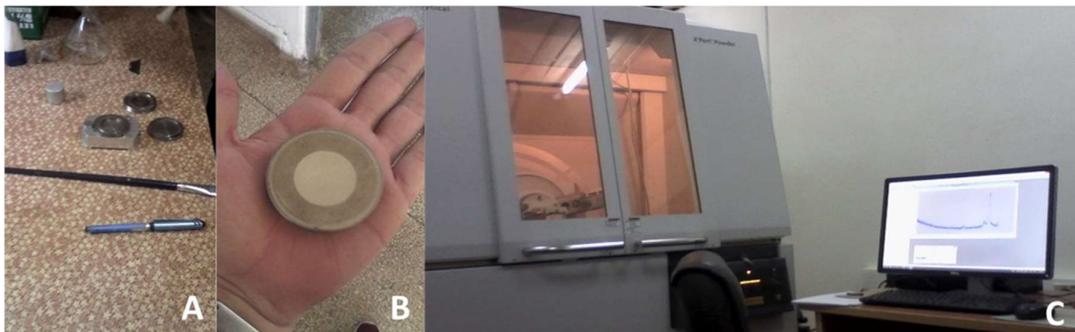


Figura 14: A: Instrumentos para la preparación de las muestras para la DRX, B: Portamuestra para análisis de DRX, C: Difractómetro X'Pert³ Powder.

Los difractogramas se procesaron con el software X Pert HighScore Plus (2011). Se aplicó un refinamiento por rietveld para desarrollar el análisis semicuantitativo de las fases presentes en las muestras.

Espectrometría de Absorción Atómica

La muestra se descompone mediante la fusión con un fundente (Bórax, Metaborato de litio o mezcla de Metaborato de litio con Tetraborato de litio 1:1).

El fundido se lixivia con ácido clorhídrico 15 % y gotas de peróxido de hidrógeno al 30 % y se lleva a un volumen final de 250 mL.

La medición se realiza en un Espectrómetro Absorción Atómica empleando soluciones de calibración con simulación de las matrices y una correcta dilución de la muestra.

Índice de Hidraulicidad

Para valorar la hidraulicidad de la escoria se calculó el índice de hidraulicidad (Ecuación 1) establecido por Vicat para clasificar los materiales conglomerantes y el módulo de hidraulicidad (Ecuación 2).

Índice de hidraulicidad - Es el cociente entre la suma de los porcentajes de las sustancias hidraulizantes, el dióxido de silicio (sílice), el dióxido de aluminio (alúmina), óxido de hierro (III) (óxido férrico) y la suma de los porcentajes de los óxidos de calcio, magnesio, sodio y potasio.

$$\text{Ecuación 1 } I_H = \frac{\sum \% SiO + \% Al_2O_3 + \% Fe_2O_3}{\sum \% CaO + \% MgO}$$

Si se desea expresar el inverso del índice de hidraulicidad, se puede hacer mediante la expresión del módulo de hidraulicidad.

Módulo de hidraulicidad.

$$\text{Ecuación 2 } M_H = \frac{1}{I_H}$$

Donde, M_H - módulo de hidraulicidad;

I_H - índice de hidraulicidad.

Índice de Basicidad

La principal característica de las escorias es su basicidad, que es la relación que existe entre la cantidad de óxidos básicos y ácidos que forman la escoria. Existen varias formas de calcular la basicidad, en esta investigación se tuvieron en

cuenta las relaciones entre CaO, MgO como óxidos básicos y SiO₂ y Al₂O₃ óxidos ácidos mediante diferentes expresiones.

Ecuación 3: $B-1 = (CaO/SiO_2)$

Ecuación 4: $B-2 = (CaO / (Al_2O_3 + SiO_2))$

Ecuación 5: $B-3 = ((CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3))$

Sistema ternario Ca-Si-Al

Los componentes principales de las escorias están representados por el contenido de CaO- SiO₂- Al₂O₃, por lo que se empleó el diagrama triangular (C-S-A) de RANKIN para valorarlas, según su composición, la relación con materiales para cemento, como MCS, las puzolanas, otras escorias y el cemento portland.

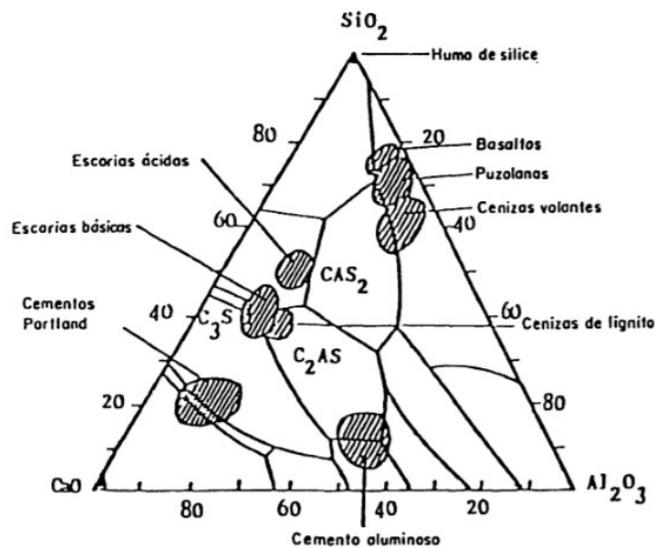


Figura 15: Diagrama ternario C-S-A (Calleja 1982; Pérez-González et al. 2019; Pérez-González et al. 2020)

Capítulo 3: Análisis y discusión de los resultados

3.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las características mineralógicas, químicas y magnéticas de las fracciones granulométricas de la escoria.

3.2. Características macroscópicas de la escoria

La escoria estudiada presenta una coloración clara, predominantemente blanca y algunas partículas de coloración oscura. Se observó una gran cantidad de partículas finas con una coloración blanca y fragmentos grandes de la propia escoria aglomerada.

En este material se aprecia una gran cantidad de fragmentos grandes de composición metálica con color negro y fragmentos más pequeños de composición pétreo probablemente asociados al refractario del horno. También se identificaron fragmentos de roca y astillas de madera asociadas a la contaminación de la escoria durante el período de deposición en los escoriales a cielo abierto.

Las escorias fueron rociadas con ácido clorhídrico al 1% no se observó efervescencia lo que indica que no han ocurrido procesos de carbonatación durante el envejecimiento de la escoria por la hidratación del óxido de calcio.

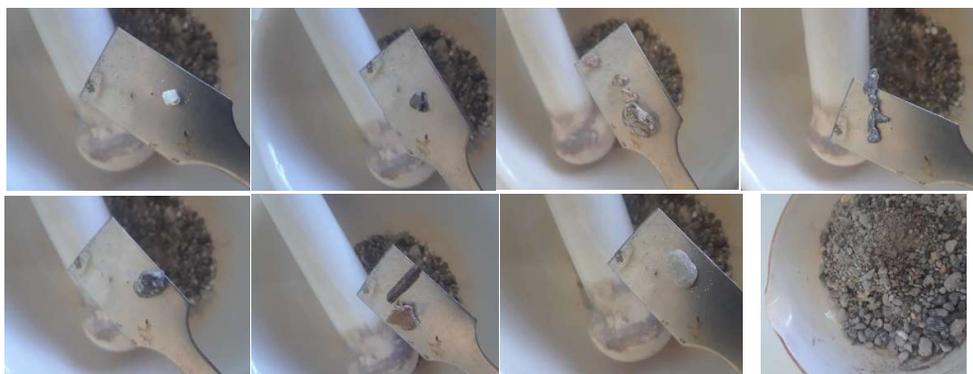


Figura 16: Componentes macroscópicos de las escorias

3.3. Análisis granulométrico de la escoria blanca

La separación granulométrica de la muestra de escoria se realizó en 8 clases granulométricas, que permitió establecer el comportamiento de la granulometría

dentro de la escoria, donde se constató un comportamiento bimodal con 2 máximos extremos importantes. Se observó que la clase con mayor cantidad de material dentro de la escoria es la más fina correspondiente a las partículas menores de -0.044 mm, con un 29.78% de material, le siguen las partículas mayores de 1 mm con un 26.12% de material dentro de la escoria. El volumen total de estas dos clases representa el 55.9% de la escoria siendo las de mayor peso dentro de la escoria.

El resto del material está distribuido en las 6 fracciones intermedias (-1 a +0.088), con una representación de un 29.35 % dentro del total. El contenido de la clase 1mm - 0.125 mm es mínimo (13.81%) mediante la suma de tres fracciones estudiadas en estas granulometrías, donde solo cobra importancia las partículas entre 1 mm y 0.5 mm común aporte de 7.97%. Sobresalen dentro de las fracciones intermedias las partículas con granulometría entre 0.088 mm y 0.044 mm que representan un 14.75% de la muestra de escoria y subordinadamente la fracción de 0.25 mm a 0.125 mm con un aporte de un 12.08%.

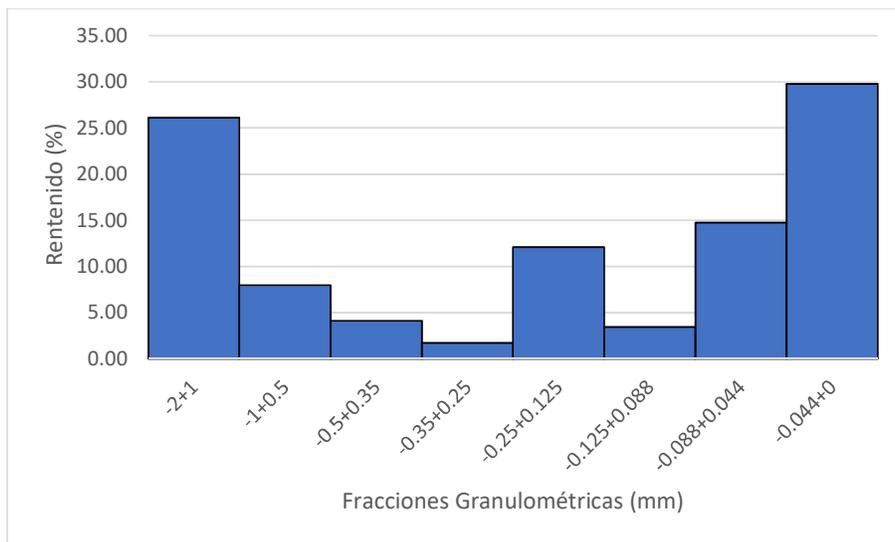


Figura 17: Distribución granemométrica por fracciones

Se realizó el estudio granulométrico de la escoria teniendo en cuenta la cantidad de material retenido y tamizado por fracciones. Mediante el método gráfico se estableció que el diámetro medio de las partículas de escoria corresponde al tamaño de 0.125 mm. La curva del comportamiento del material demostró un

comportamiento descendente con el aumento de la granulometría con una gran pendiente en las partículas entre 0 y 0.088 mm.

Luego de los 0.088 mm se aprecia un cambio considerable de la pendiente con un fuerte aplanamiento de la curva hasta las partículas de 1 mm, relacionado con una considerable disminución de la cantidad de material retenido. La curva presenta un aumento considerable de la pendiente luego de la granulometría de 1 mm relacionada con un aumento del por ciento de material retenido.

La escoria presentó una curva acumulativa del material retenido por fracciones con una fuerte pendiente en las partículas entre 0 y 0.088 mm correspondiente a una disminución del material tamizado. La curva presenta una fuerte inflexión en las partículas por encima de 0.088 mm acentuándose en 0.125 mm donde empieza a aplanarse, este comportamiento está relacionado con una disminución considerable del material tamizado. La curva presenta un aumento considerable de la pendiente luego de 1 mm relacionado con un aumento rápido de la cantidad de material tamizado llegando a un 100% de material tamizado a las partículas mayores a 2 mm.

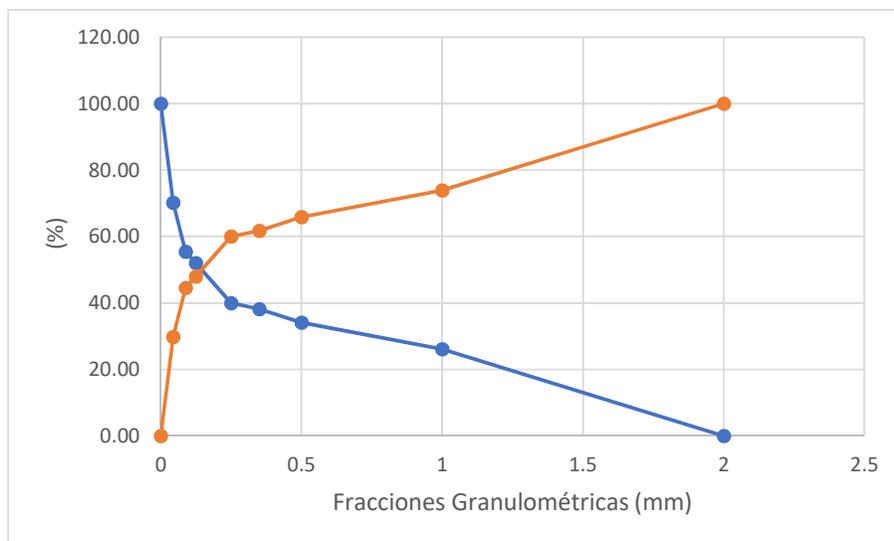


Figura 18: Comportamiento del material retenido y cernido durante el análisis granulométrico

Las escorias de acero con un tamaño de partícula fino (normalmente inferior a 125 μm) se pueden utilizar como materiales cementicios suplementarios (SCM) en cemento y hormigón (Chiang y Pan 2017). En las escorias estudiadas este

tipo de partículas representan más de un 40%, lo que resalta sus altas perspectivas como materiales cementicios suplementarios (SCM) y las posibilidades de emplear el tamizado para aumentar las prestaciones de este material.

El contenido de partículas inferiores a 0,044 mm es predominante en estas escorias lo que posibilita una mayor superficie específica, en otras investigaciones se han reportado 0.849 m²/g (Papayianni y Anastasiou 2012) y cuanto más fina es la escoria mejores son la propiedad cementosa (Shi y Hu 2003; Papayianni y Anastasiou 2010). Se pronostica una disminuyó gradual de la hidratación de C2S con el aumento del tamaño de partícula (Yi et al. 2022).

3.4. Comportamiento magnético

Mediante la separación magnética se pudo constatar la presencia de elementos magnético dentro de la escoria, estos representan un 5.56 % dentro del material, denotando el predominio de elementos no magnéticos. Mediante el análisis fraccionario se constató que existe un predominio de la fracción magnética dentro la clase de tamaño mayores a 1 mm con más de un 57 % del total.

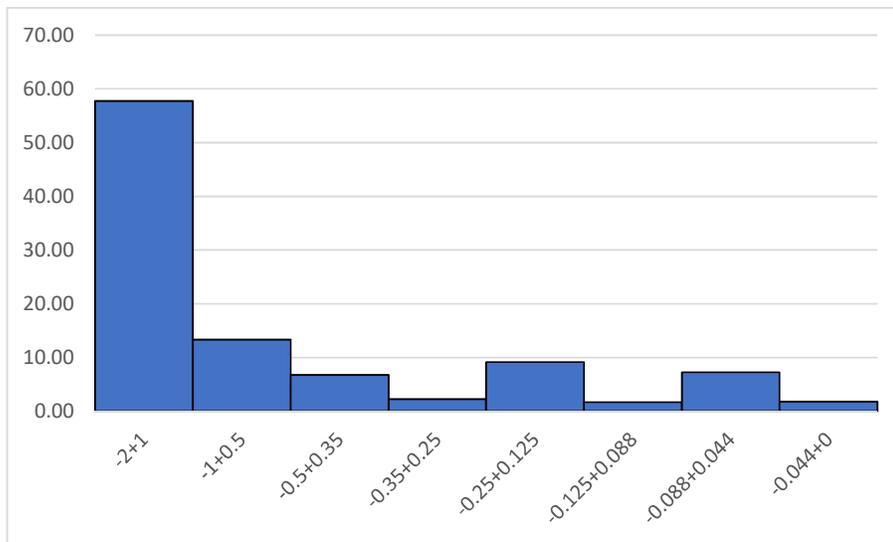


Figura 19: Distribución del material magnético por fracciones

Mediante el método gráfico se estableció que el tamaño medio de las partículas magnéticas dentro de la de escoria es de 1.42 mm. La curva del comportamiento del material demostró que con la disminución de la granulometría existe una

tendencia a la disminución del contenido magnético, presentándose las clases de -0.25 a 0.125 mm y -0.088 a 0.044 mm con comportamientos anómalos.

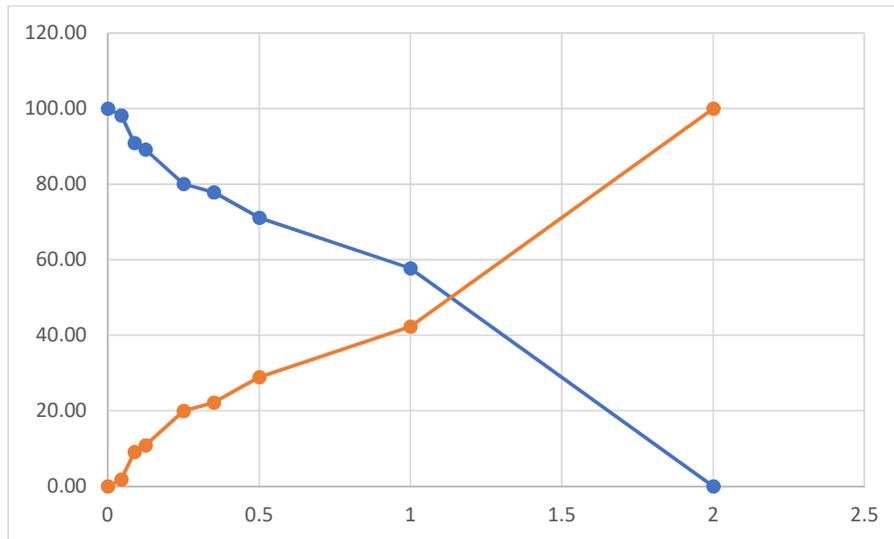


Figura 20: Comportamiento del material magnético retenido y cernido durante el análisis granulométrico.

Es con el tamizado de las escorias por debajo de 0.5 mm se puede disminuir en más de un 70 % la cantidad de material magnético y de esta manera concentrar fases reactivas para mejorar las prestaciones como MCS.

3.5. Composición química por fracciones

La composición química de las principales fracciones granulométricas presentes en la escoria blanca del horno de cuchara de ACINOX Las Tunas fue determinada mediante espectrometría de absorción atómica. Mediante esta técnica se constató que los macrocomponentes están representados por los óxidos de Ca, Si, Mg, Al y Fe. La composición química de las escorias estudiadas coinciden con la composiciones reportadas por otros autores (Borges Marinho et al. 2017; Sofilić et al. 2013; Serjun, Mirtiĉ y Mladenoviĉ 2013), con valores relativamente bajos de Ca, y según esta se pueden clasificar como escorias de baja alúmina (Borges Marinho et al. 2017).

Con la variación de la granulometría en las diferentes fracciones estudiadas se constató una relación constante en la concentración de Fe, Mg y Ca. Estos elementos reportan un comportamiento bimodal con dos máximos en las fracciones extremas de la granulometría (EA y CEA-2) y un mínimo de

concentración en la fracción intermedia (CEA-1). El comportamiento de las concentraciones de Al y Si es directo, y a la vez inverso a las fluctuaciones reportadas por el Fe, Mg y Ca, con una concentración en la fracción intermedia (CEA-1).

Los resultados químicos determinados en la fracción gruesa (EA), la fracción fina (CEA-2) y los valores promedios (EP) coinciden con los reportes internacionales de la composición total en este tipo de escoria (Sofilić et al. 2013; Viček et al. 2009). La fracción intermedia (CEA-1) presenta una anomalía negativa en la concentración del CaO (Sofilić et al. 2013). Estas escorias presentan un alto contenido de Mg probablemente relacionado por el uso de dolomita dentro de la colada como fundente (Rashad 2019).

Tabla 8: Composición química de la escoria

Código	NiO	Fe ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
EA	0.22	1.86	11.46	0.07	37.42	4.02	24.92
CEA-1	0.22	6.08	10.76	0.16	6.69	16.57	33.50
CEA-2	0.18	2.02	12.72	0.06	43.82	4.86	28.35
EP	0.20	3.17	11.82	0.09	31.25	8.08	28.97

En el estudio de las fracciones granulométricas de la escoria blanca de ACINOX Las Tunas se tuvo presente el índice de basicidad, se conoce que es un indicador directo de la actividad hidráulica del material (Fathy et al. 2016) y con el incremento de la basicidad aumentan las propiedades cementicias (Chiang y Pan 2017). También se tuvieron en cuenta el índice de hidraulicidad y el módulo de hidraulicidad establecido por Vicat para clasificar los elementos conglomerantes.

Según los resultados obtenidos del índice de basicidad (IB-2) las fracciones gruesa (EA) y fina (CEA-2) se pueden considerar básicas al presentar valores por encima de 1 en cambio los contenidos promedios y la fracción intermedias (CEA-1) no son básicas.

En todas las muestras estudiadas este índice reporto valores por debajo de 2 sobresaliendo la fracción gruesa (EA) y la fracción fina (CEA-2), superando los valores de basicidad del contenido promedio de casi un 0.5, siendo estas la de

mayor potencial hidráulico. Los valores determinados de basicidad (IB-1) en la fracción gruesa (EA) y la fracción fina (CEA-2), sugieran la posibilidad del desarrollo de una baja actividad hidráulica (Fathy et al. 2016). Según las normativas establecidas en Japón el índice de basicidad (IB-1) debe de ser superior a 1.6 para el uso en la fabricación de cemento (Sasaki 2015), la fracción fina (CEA-2) se encuentra ligeramente por debajo de este requerimiento.

Los resultados del índice de hidraulicidad reflejan en la fracción gruesa (EA) y fina (CEA-2), propiedades hidráulicas que posibilitan un fraguado lento con un 0.63 y 0.62 en cada uno respectivamente y se clasifican como cales de alta hidraulicidad (Borges Marinho et al. 2017). En cambio, la fracción intermedia (CEA-1) presenta un IH de 3.22 lo que indica ausencia de propiedades hidráulicas y pronostica un comportamiento puzolánico. Todos los valores determinados del módulo de hidraulicidad fueron bajos, los más prometedores están relacionados a la fracción gruesa y fina respectivamente, asociados a los cuales se pueden esperar resistencias mecánicas débiles.

El comportamiento de la basicidad indica un ligero aumento de la actividad hidráulica con el control de la granulometría, lo que puede ser beneficioso para mejorar las prestaciones de la escoria en obras hidráulicas.

Tabla 9: Índice de hidraulicidad y basicidad de la escoria

Código	IH	MI	IB-1	IB-2	IB-3
EA	0.63	1.59	1.50	1.29	1.69
CEA-1	3.22	0.31	0.20	0.13	0.35
CEA-2	0.62	1.62	1.55	1.32	1.70
EP	0.93	1.08	1.08	0.84	1.16

Según las concentraciones de Ca-Si-Al en función del diagrama triangular para la clasificación química de los MCS se constató que la fracción gruesa (EA), fina (CEA-2) y los valores promedios (EP), presentan una composición semejante a las escorias básicas. En cambio, la fracción intermedia (CEA-1) presenta una composición más semejante a las cenizas volantes.

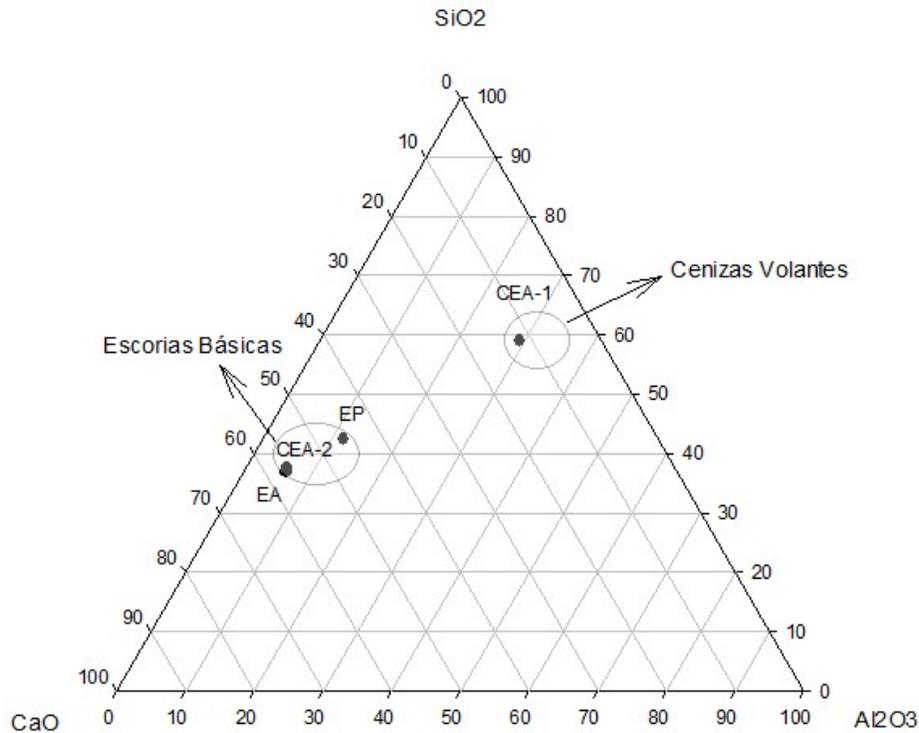


Figura 21: Sistema ternario Ca-Si-Al

El contenido de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ en la fracción gruesa (EA), la fracción fina (CEA-2) y los valores promedios (EP) del contenido en masa no cumplen con los requerimientos químicos de la norma cubana TS 528: 2013 (NC TS 528:2013 2013) para ser considerados aditivos al cemento. La fracción intermedia (CEA-1) presenta un 56.86% de contenido de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃, cumpliendo con los requerimientos químicos de la norma cubana TS 528: 2013 (NC TS 528:2013 2013), según la cual se puede considerar un Aditivo Clase C. Las cenizas volantes producidas del lignito o carbón bituminoso poseen composiciones semejantes a los Aditivo Clase C y además de la propiedad puzolánica, tiene también alguna propiedad cementante (NC TS 528:2013 2013).

La fracción gruesa (EA), la fracción fina (CEA-2) y los valores promedios (EP) del contenido en masa presentan composiciones químicas que indican una posible actividad puzolánica ínfima. Las mejores prestaciones como puzolana se identificaron en la fracción intermedia (CEA-1) con posibilidades de desarrollar una baja actividad puzolánica.

Los contenidos de magnesio se presentan elevados en todas las fracciones en comparación con los requerimientos establecidos en Japón para su uso para la producción de cemento, donde se establece que no debe de superar un 10% (Sasaki 2015), la fracción intermedia (CEA-1) es la más cercana a este requerimiento.

La relación $Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$ se presenta más elevadas en la fracción intermedia (CEA-1) con más de un 56% por lo que se puede considerar según la literatura (Awoyera y Adesina 2019) como un material precursor de altas perspectivas para ser usados en la activación alcalina con un silicato de sólido e NaOH como activadores. La composición promedio de la escoria también presenta una relación $Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$ prometedora para ser usados en la activación alcalina, recomendándose en la literatura el uso de silicato de sodio como activador. La fracción gruesa (EA) y fina (CEA-2) de la escoria presentan una relación de $Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$ relativamente baja lo que limita su uso como material precursor para ser usados en la activación alcalina.

3.6. Composición mineralógica por fracciones

Mediante los análisis de DRX se determinaron las fases minerales presentes en cada fracción granulométrica de la escoria estudiada. Se constató en todas las fracciones estudiadas que este material tiene una composición compleja formada por varias fases minerales.

El análisis de la fracción gruesa (EA-1) permitió establecer la presencia de fases minerales del grupo de los silicatos con picos específicos para calcio-olivino (γ -C2S) a los 2.72 y 3.00 Å; 2.86 y 3.07 para la akermanita (C2MS2); 2.78 y 2.66 para la merwinita (C3MS2); 2.86 y 3.07 para la alita (C3S2); 2.72 y 2.90 para la rankinita (C3S2) y 3.34 y 1.82 para el cuarzo (SiO_2). También se reportaron aluminatos de cálcico representados por la mayenita (C12A7) con picos específicos a los 4.88 y 2.67 Å. Por último, picos específicos a los 2.10 y 1.49 Å relacionados con la periclasa (MgO).

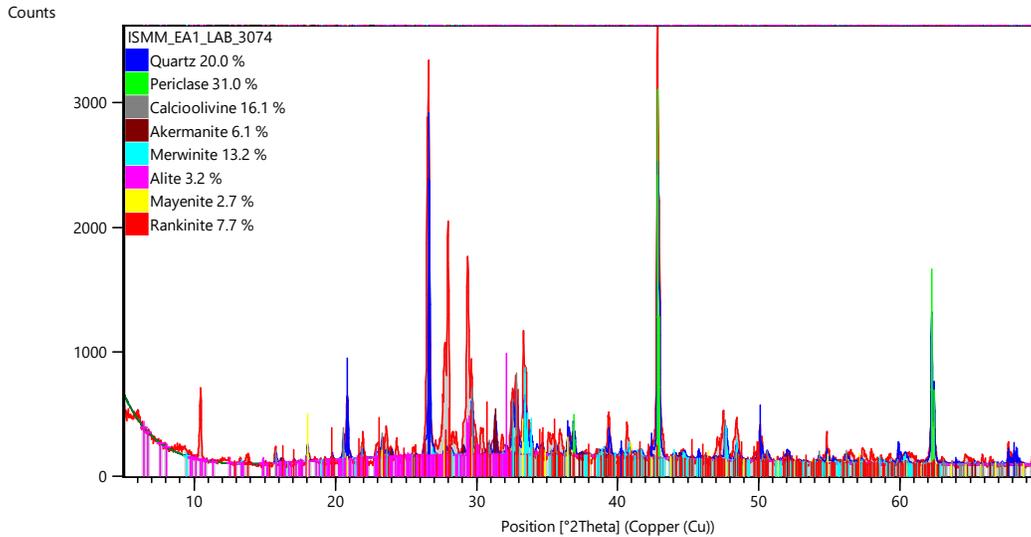


Figura 22: Difractograma de la Difracción de Rayos X de las muestras EA

Mediante el análisis semicuantitativo de las fases presentes en la fracción gruesa (EA-1) de la escoria se determinó que está constituida principalmente por silicatos, representando un 66.3 % de la muestra. Del grupo de los silicatos la fase más representativa es el cuarzo (SiO_2) con un 20 % dentro de la escoria, este es un mineral muy estable que no le aporta reactividad al material. El cuarzo pueden haberse introducido en la escoria durante el proceso de almacenamiento en el sitio de deposición (arena, ladrillos refractarios) (Herbelin et al. 2020).

En segundo lugar, por su representatividad dentro de este grupo se encuentra el calcioolivino ($\gamma\text{-C}_2\text{S}$) con un 16.1 %, este es un polimorfo no reactivo de la belita (C_2S) generado por la transformación de la larnita ($\beta\text{-C}_2\text{S}$) a baja temperatura (Mladenovic et al. 2016).

En cambio la merwinita (C_3MS_2) presenta un 13.2 % y la akermanita (C_2MS_2) en un 6.1 % respectivamente, asociado a estos mineralales se generan actividades hidráulicas bajas (Viček et al. 2016). En menor media aparecen los polimorfos del silicato tricálcico (C_3S_2), se identificaron la rankinita con 7.7 %, y la alita con un 3.2 % que son estos son los minerales con mayor potencial hidráulico y propiedades cementicias (Viček et al. 2016).

La fase mayoritaria dentro de la fracción gruesa (EA-1) es la periclasa (MgO) con un 31 %, este mineral tienen una actividad cementante insignificante (Fathy et al. 2016). Los altos contenidos de este mineral pueden ocasionar grandes problemas en los elementos estructurales asociados a fenómenos de expansión retardada (Mladenovic et al. 2016; Montenegro-Cooper et al. 2019). La mayenita (C12A7) es la fase minoritaria con un 2.7 %, este es un mineral altamente hidráulico y reacciona rápidamente ((Viček et al. 2016); Adesanya et al. 2018).

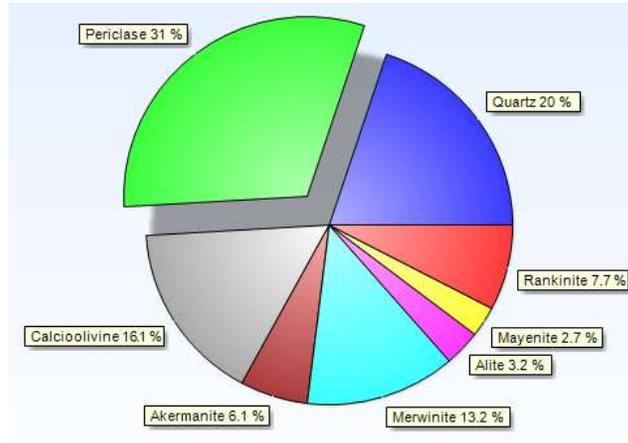


Figura 23: Cuantificación de los minerales identificados EA

El análisis de la fracción media (CEA-1) de la escoria permitió establecer una gran variedad de fases minerales del grupo de los silicatos, se determinaron picos específicos para calcio-olivino (γ -C2S) a los 2.72 y 3.00 Å; 2.86 y 3.07 Å para la akermanita (C2MS2); 2.45 y 1.98 Å para la pseudowollastonita-4^a (CaSiO₃); 2.78 y 3.02 Å para la alita (C3S2); 2.72 y 2.90 Å para la rankinita (C3S2) y 2.82 y 2.67 Å para la zoisita (Ca₂Al₃(SiO₄)₃(OH)). También se reportaron aluminatos de cálcico representados por la mayenita (C12A7) con picos específicos a los 4.88 y 2.67 Å, calcio cyclo-hexaaluminato (CA6) con picos específicos a los 2.70 y 1.55 Å.

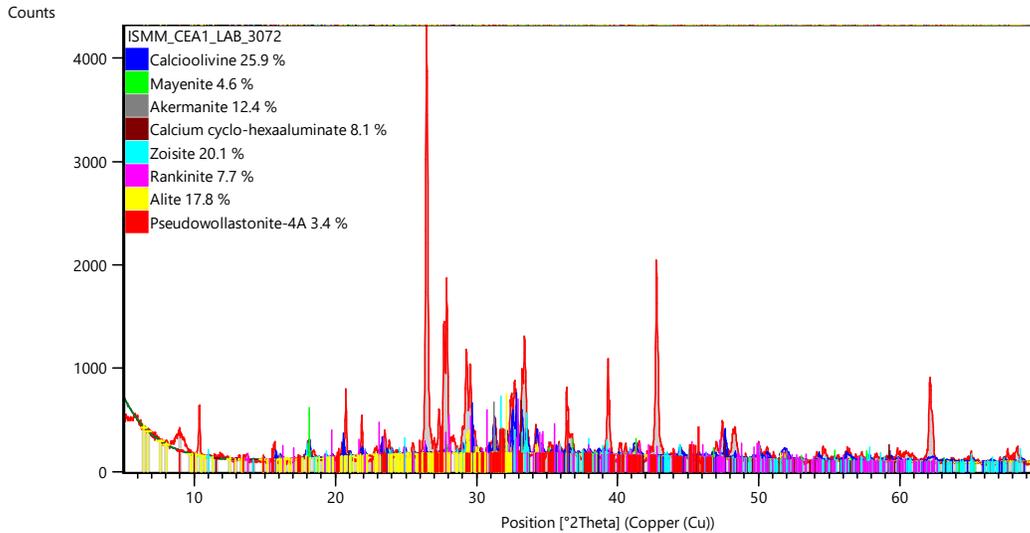


Figura 24: Difractograma de la Difracción de Rayos X de las muestras CEA-1

Mediante el análisis semicuantitativo de las fases presentes en la fracción media (CEA-1) de la escoria se determinó que está constituida principalmente por silicatos, representando un 87.3 % de la muestra. Del grupo de los silicatos la fase más representativa es el calcio-olivino (γ -C2S) con un 25.9 %, este es un polimorfo no reactivo de la belita (C2S) generado por la transformación de la larnita (β -C2S) a baja temperatura (Mladenovic et al. 2016). En segundo lugar, por su representatividad dentro de este grupo se encuentra la zoisita ($\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$) con un 20.1 %.

Además, se identificaron polimorfos del silicato tricálcico (C3S2), representados por la rankinita con 7.7 %, y la alita con un 17.8 % que son estos son los minerales con mayor potencial hidráulico y propiedades cementosas (Viček et al. 2016). En menor media aparecen la akermanita (C2MS2) en un 12.4 % respectivamente, asociado a estos mineralales se generan actividades hidráulicas bajas (Viček et al. 2016) y la pseudowollastonita-4^a (CaSiO_3) presenta un 3.4 % que no es hidráulica (Šmigelskytė 2019).

Los aluminatos de cálcico se encuentran en un 8 %, con un 4.6 % de mayenita (C12A7) y un 3.4 % calcio cyclo-hexaaluminato (CA6) respectivamente, estos son fases minerales de alta reactividad hidráulica y con reacciones muy rápidas (Viček et al. 2016); Adesanya et al. 2018).

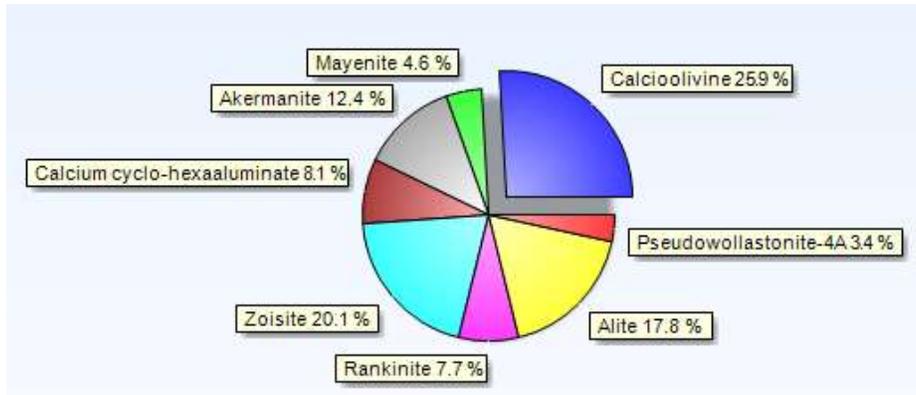


Figura 25: Cuantificación de los minerales identificados CEA-1

El análisis de la fracción fina (CEA-2) de la escoria permitió establecer la presencia de fases minerales del grupo de los silicatos se determinaron picos específicos para calcio-olivino (γ -C2S) a los 2.72 y 3.00 Å; 2.86 y 3.07 Å para la akermanita (C2MS2); 2.82 y 2.67 para la zoisita ($\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$); 2.86 y 3.07 Å para la alita (C3S2); 2.72 y 2.90 Å para la rankinita (C3S2). También se reportaron aluminatos de cálcico representados por la mayenita con picos específicos a los 4.88 y 2.67 Å; calcio cyclo-hexaaluminato (CA6) con picos específicos a los 2.70 y 1.55 Å. Por último, óxidos e hidroxidos, con picos específicos a los 2.21 y 4.29 Å relacionados con la brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) y a los 2.49 y 2.87 Å relacionados con cal (CaO).

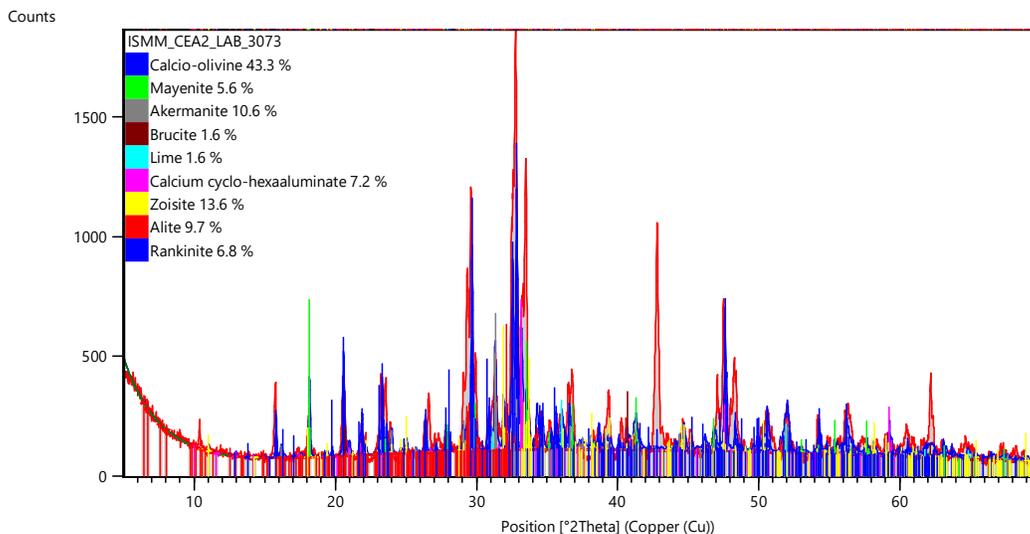


Figura 26: Difractograma de la Difracción de Rayos X de las muestras CEA-2

Mediante el análisis semicuantitativo de las fases presentes en la fracción fina (CEA-2) de la escoria se determinó que está constituida principalmente por silicatos, representando un 84 % de la muestra. Del grupo de los silicatos la fase más representativa es el calciolivino (γ -C2S) con un 43.3 %, este es un polimorfo no reactivo de la belita (C2S) generado por la transformación de la larnita (β -C2S) a baja temperatura (Mladenovic et al. 2016).

En segundo lugar, por su representatividad dentro de este grupo se encuentra la zoisita ($\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$) con un 13.6 %. Además, aparece la akermanita (C2MS2) en un 10.6 %, asociado a este mineral se generan actividades hidráulicas bajas (Viček et al. 2016). En menor medida se identificaron polimorfos del silicato tricálcico (C3S2), representados por la rankinita con 6.8 %, y la alita con un 9.7 %, estos son los minerales con mayor potencial hidráulico y propiedades cementosas (Viček et al. 2016) dentro de la escoria.

Los aluminatos de cálcico se encuentran en un 8 %, con un 5.6 % de mayenita (C12A7) y un 7.2 % calcio cyclo-hexaaluminato (CA6) respectivamente, estos son fases minerales con reactividad hidráulica y con reacciones muy rápidas (Viček et al. 2016; Adesanya et al. 2018). Se identificó un 1.6 % de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), lo que indica procesos de hidratación de la escoria. Por último, se reportó un 1.6 % cal (CaO). La presencia de cal en las escoria puede ocasionar problemas en los elementos estructurales acodados por fenómenos de expansión retardada (Mladenovic et al. 2016), aunque la presencia de CaO puede acelerar la hidratación del C2S (Shi y Hu 2003).

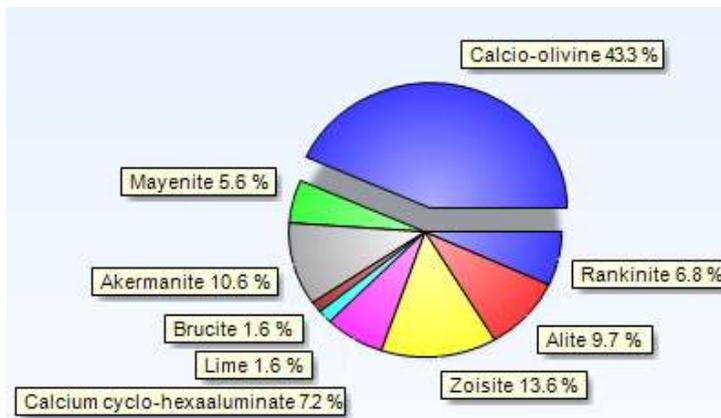


Figura 27: Cuantificación de los minerales identificados CEA-2

La difracción de rayos X expuso que estas escorias están constituidas principalmente por minerales del grupo de los silicatos representados por una gran variedad de fases. En menor medida están presentes fases del grupo de los aluminatos de calcio y del grupo de los óxidos e hidróxidos.

Durante la transición de fase sólida alotrópica de la belita a bajas temperaturas (Chiang y Pan 2017), viene acompañada de un fuerte incremento de volumen (Cañas Gallart y Aguado De Cea 2012; Sahoo, Nayak y Ranjan 2021), que provoca la rotura de la matriz en polvo debido a la diferencia en la estructura cristalina y densidad (Pérez Fernández et al. 2015), esto pudo provocar la concentración del calcio-olivino (γ -C2S) en la fracción fina (CEA-2) de la escoria. A pesar de las bajas propiedades hidráulicas del calcio-olivino (γ -C2S) este puede reaccionar con el CO_2 , formando CaCO_3 , rellenando los poros de la matriz y contribuye a mejorar la resistencia a la compresión (Tran et al. 2021). Esto podría constituir una de las alternativas a tener en cuenta durante el curado para mejorar las prestaciones del material.

Se aprecia una concentración de las fases poco reactivas y fases con alto potencial expansivo en la fracción gruesa, se espera un muy lento proceso de hidratación expansiva de la periclasa (MgO) (Laffarga Osteret 1957; Calleja y Del Olmo 1971), lo que propicia aumentos considerables de volumen de manera retardada (Mladenovic et al. 2016; Montenegro-Cooper et al. 2019). En cambio, estas fases pueden considerarse nocivas para el uso de la escoria como MCS y son prácticamente imperceptibles en las fracciones más finas.

Esta investigación mostró que la fracción media (CEA-1) de la escoria estudiada es un material reactivo cristalino que contiene alrededor del 22.4 % en peso de fases hidráulicas representadas por C_3S_2 (alita) y C_{12}A_7 (mayenita), esto significa que la escoria tiene propiedades aglutinantes. Sobresalen algunas fases típicas del cemento (C_3S_2) con más de un 25 % en forma de rankinita y alita (Lavagna y Nisticò 2023).

La rankinita es un material hidráulicamente inactivo (Smigelskyte et al. 2020), pero ha demostrado elevados valores de resistencia a la compresión mediante curado por carbonatación (Wang, Ren y Yang 2018; Šmigelskytė 2019) y

presenta grandes perspectivas para la obtención de clínquer de rankinita (Hou et al. 2020).

Por la presencia de fases con propiedades cementicias que pueden aportar reactividad con el cemento se pueden considerar estas escorias como adición de Tipo II según la BS EN 206-1:2000 (STANDARD 2005).

Tabla 10: Composición mineralógica de la escoria

Minerales	Notación Química	EA	CEA-1	CEA-2
Calcio-Olivino	γ -C2S	16.1	25.9	43.3
Akermanita	C2MS2	6.1	12.4	10.6
Merwinita	C3MS2	13.2	-	-
Alita	C3S2	3.2	17.8	9.7
Mayenita	C12A7	-	4.6	5.6
Periclasa	MgO	31	-	-
Cuarzo	SiO ₂	20	-	-
Calcio Cyclo-Hexaaluminato	CA6	-	3.4	7.2
Zoisita	Ca ₂ Al ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)	-	20.1	13.6
Rankinita	C3S2	7.7	7.7	6.8
Pseudowollastonita-4a	CaSiO ₃	-	3.4	-
Brucita	Mg (OH) ₂	-	-	1.6
Cal	CaO	-	-	1.6

3.7. Alternativas para mejorar las prestaciones de las escorias blancas del horno de cuchara de ACINOX Las Tunas como material cementicio suplementario

Existen experiencias del empleo de las escorias blancas, del horno de cuchara de ACINOX Las Tunas, en la construcción como MCS, pero en todos los casos se han valorado como un todo sin dividir las por fracciones granulométricas. Sin embargo, asociadas a estas escorias aparecen elementos no deseados como la periclasa (MgO), que genera fenómenos de expansión, a edades avanzadas del curado, limitando así el uso de este material. Se hace necesario proponer alternativas, para mejorar las prestaciones de este material y lograr un uso seguro dentro de la industria de la construcción como MCS.

1. La primera alternativa consiste en someter el material, como un todo, a un proceso de molienda para aumentar la superficie específica y reducir el

tamaño de partículas. Este método se ha aplicado con anterioridad, logrando mejorar la reactividad del material por una mayor superficie de contacto y aprovechando toda la escoria sin dejar residuos. La mayor dificultad de este método de beneficio es que no se logra eliminar los elementos nocivos que se encuentran dentro de la escoria y pueden ocurrir problemas en la durabilidad del material.

Una variante a esta alternativa consiste en el aprovechamiento del material como un todo luego de ser sometido a una separación magnética de las fases magnéticas que pueden presentar considerables dificultades para la durabilidad del material. Luego someter al material resultante a un proceso de molienda para aumentar la superficie específica y reducir el tamaño de partículas

2. La segunda alternativa consiste en una operación de clasificación de tamaño de partículas por debajo de 1 mm, con lo que se ha reportado en este estudio que se podrían concentrar las fases hidráulicas, y molienda del material resultante. Además, se lograría eliminar las principales fases nocivas presentes en la escoria para su uso como MCS. La principal limitación de este método es que una parte del material no se utilizaría, pero pudiera ser aprovechado como elemento de recargue en el horno para la recuperación de metales.
3. La tercera alternativa consiste en la separación granulométrica de la fracción +1 en un primer proceso de beneficio. En un segundo proceso separar las partículas menores a 0.088 mm y el material resultante correspondiente a la clase -1mm a +0.088 someterla a proceso de molienda para reducir su granulometría. Por último, mezclar el material resultante con el acumulado en la clase -0.088 mm para su uso como MCS. Con este método se logra una mejor eficiencia energética durante el proceso de molienda, pero presenta la mayor complejidad de las propuestas presentadas.

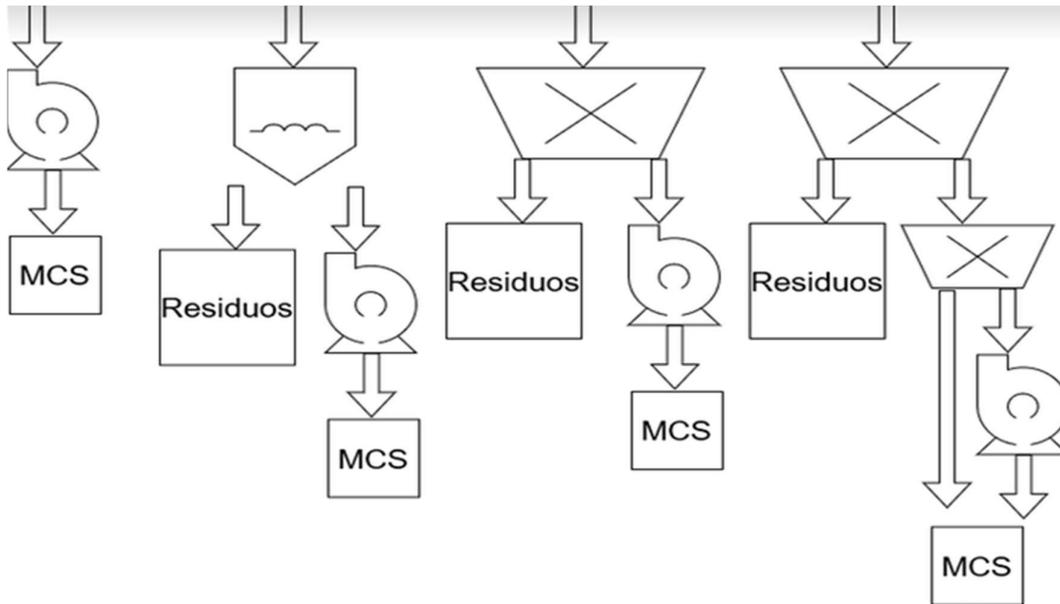


Figura 28: Esquema del flujo tecnológico

3.8. Conclusiones parciales

En la fracción gruesa (EA) se concentra el 57.76 % de los elementos magnéticos representados relacionados con residuos metálicos de la colada, por lo que su eliminación favorecerá directamente disminuir considerablemente la densidad del material.

La relación $Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$ se presenta más elevadas en la fracción intermedia (CEA-1) con más de un 56% por lo que se puede considerar según la literatura (Awoyera y Adesina 2019) como un material precursor de altas perspectivas para ser usados en la activación alcalina con un silicato de solido e NaOH como activadores.

Por el gran contenido de materiales finos (-0.088 mm) con escaso nivel de reactividad hidráulica es favorable para su adición en matrices cementosas como filler.

Conclusiones

En el desarrollo de este trabajo se caracterizaron química y mineralógicamente las fracciones granulométricas presentes en las escorias blancas del horno de cuchara ACINOX Las Tunas para su uso como material cementicio suplementario, especificándose lo siguiente:

1. Las escorias blancas de la acería ACINOX de las Tunas han sido estudiadas en ocasiones anteriores, para su uso varias aplicaciones como sustituto parcial de cemento, pero no se ha valorado la influencia de la composición química y mineralógica en cada fracción granulométrica presente en la escoria como forma de mejorar las prestaciones de este material y eliminar impurezas perjudiciales durante su aplicación.
2. Las escorias blancas del horno de cuchara de la acería eléctrica ACINOX Las Tunas presentan un predominio de las partículas correspondientes a la clase -0.088 mm (CEA-2) con un 44.53 %. En segundo lugar, la clase -1 mm a $+0.088$ mm con un 29.35 % y, por último, la clase mayor de 1 mm con un 26.12 %.
3. Las fases mineralógicas predominantes en las escorias son las relacionadas al grupo de los silicatos, con una concentración de las fases con alta reactividad hidráulica, C3S2 (alita) y C12 A7 (mayenita), en la fracción intermedia (CEA-1) y presentando una relación directa con el índice de hidraulicidad (IH).
4. Se proponen 4 alternativas para concentrar las fases con mayor reactividad hidráulica y lograr mejorar las prestaciones de las escorias blancas del horno de cuchara de ACINOX Las Tunas como material cementicio suplementario.

Recomendaciones

Evaluar la reactividad de las diferentes fracciones estudiadas mediante análisis físicos en morteros normalizados de la resistencia a la compresión generada.

Evaluar las alternativas tecnológicas propuestas.

Evaluar los productos obtenidos mediante cada alternativa tecnológica propuesta.

Evaluar el comportamiento de mezclas escoria-puzolana para el desarrollo de nuevos conglomerantes.

Evaluar la durabilidad de los materiales obtenidos en las diferentes alternativas tecnológicas.

Referencias

- (FMI), F.M.I., 2022. *Perspectivas de la economía mundial: La guerra retrasa la recuperación mundial*. . Washington, DC:
- ADEDIRAN, A., YLINIEMI, J., LEMOUGNA, P.N., PERUMAL, P. y ILLIKAINEN, M., 2022. Recycling high volume Fe-rich fayalite slag in blended alkali-activated materials : Effect of ladle and blast furnace slags on the fresh and hardened state properties. *Journal of Building Engineering* [en línea], vol. 63, no. PA. ISSN 2352-7102. DOI 10.1016/j.jobbe.2022.105436. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105436>.
- ADESANYA, E., SREENIVASAN, H., KANTOLA, A.M., TELKKI, V.V., OHENOJA, K., KINNUNEN, P. y ILLIKAINEN, M., 2018. Ladle slag cement – Characterization of hydration and conversion. *Construction and Building Materials*, vol. 193, pp. 128-134. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.179.
- AGUDELO L., J.H., SALAZAR B., J.H. y PARRA G., J.C., 2004. Escorias de acería como correctoras de acidez en suelos. *CINTEX*, vol. 1.
- AGUIAR PÉREZ, A. y SEIJO PÉREZ, P., 2014. *Evaluación de las propiedades físico - mecánicas de morteros de albañilería y prefabricados de pequeño formato a base de Cemento de Bajo Carbono* [en línea]. S.I.: UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biochi.2015.03.025><http://dx.doi.org/10.1038/nature10402><http://dx.doi.org/10.1038/nature21059><http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127><http://dx.doi.org/10.1038/nrmicro2577>
- ALMENARES REYES, R.S., ALUJAS DÍAZ, A., BETANCOURT RODRÍGUEZ, S., LEYVA RODRÍGUEZ, C.A. y MARTIRENA HERNÁNDEZ, J.F., 2017. *Potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas para la obtención de materiales cementicios suplementarios*. S.I.: UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS.
- ALVAREZ BRAVO, C.A., CORTÉS CORTÉS, M.E. y MOREIRA QUIÑONES, M., 2017. Método para determinar las fases minerales del clínker y su influencia en reducir los daños al medio ambiente. *Universidad y Sociedad*, vol. 9, no. 2218-3620, pp. 293-300.

- ÁLVAREZ BRAVO, C.A., CORTÉS CORTÉS, M.E. y RODRÍGUEZ TAMAYO, Y., 2019. Ecuaciones para predecir los porcentajes de cao, SiO₂ , Al₂O₃ , Fe₂O₃ Y SO₃ en el clinker. *Universidad y Sociedad*, vol. 11, no. 2218-3620, pp. 147-153.
- AMARAL DE LIMA, L. y VAZQUEZ RAMONIC, E., 1999. *Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridospropiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*. S.I.: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- AWOYERA, P. y ADESINA, A., 2019. Case Studies in Construction Materials A critical review on application of alkali activated slag as a sustainable composite binder. *Case Studies in Construction Materials* [en línea], vol. 11. ISSN 2214-5095. DOI 10.1016/j.cscm.2019.e00268. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00268>.
- BAALAMURUGAN, J., GANESH KUMAR, V., PADMAPRIYA, R. y BUPESH RAJA, V.K., 2023. *Recent applications of steel slag in construction industry* [en línea]. S.I.: Springer Netherlands. ISBN 0123456789. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02894-3>.
- BATALIN, B.S., 2003. Vred y polza slakovij otvalov (Daños y beneficios de los vertederos de escoria). *Prirodafile*, vol. 1.
- BORGES MARINHO, A.L., MOL SANTOS, C.M., CARVALHO, J.M.F. de, MENDES, J.C., BRIGOLINI, G.J. y FIOROTTI PEIXOTO, R.A., 2017. Ladle Furnace Slag as Binder for Cement-Based Composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 11. ISSN 0899-1561. DOI 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002061.
- BOZA REGUEIRA, M.H., ESTRADA CINGUALBRES, R. y SÁNCHEZ SOLER, E., 2017. Tejas onduladas de fibrocemento con escorias de acería. *8VA CONFERENCIA CIENTÍFICA INTERNACIONAL DE LA UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN*. S.I.: s.n., pp. 1-9.
- BRAND, A.S. y FANIJO, E.O., 2020. A Review of the Influence of Steel Furnace Slag Type on the Properties of Cementitious Composites. *Appl.ied Sciences*, vol. 10, no. 8210. DOI doi:10.3390/app10228210.
- CABALLERO GARRIDO, A.A., MONTENEGRO COOPER, J.M. y PONCE ABARCA, R.A., 2017. *Caracterización de la escoria blanca proveniente de la siderurgia integral*. S.I.: UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA

CONCEPCION.

- CALLEJA, J., 1982. Escorias y cementos siderúrgicos. <http://materconstrucc.revistas.csic.es> [en línea], vol. 186. Disponible en: <http://materconstrucc.revistas.csic.es>.
- CALLEJA, J. y DEL OLMO, C., 1971. Local libre de los cementos y la expansión en autoclave. *Materiales de Construcción*, vol. 21, no. 143, pp. 25-33. ISSN 19883226. DOI 10.3989/mc.1971.v21.i143.1500.
- CAÑAS GALLART, J. y AGUADO DE CEA, A., 2012. *Estudio del comportamiento de hormigones con áridos siderúrgicos de horno eléctrico*. S.I.: Universitat Plitécnica de Catalunya.
- CASTILLO, R., FERNÁNDEZ, R., ANTONI, M., SCRIVENER, K., ALUJAS, A. y MARTIRENA, J.F., 2010. Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas Activation of low grade clays at high temperatures. *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 25, no. 3, pp. 329-352.
- CHANG, J., FANG, Y. y SHANG, X., 2016. The role of β -C2S and γ -C2S in carbon capture and strength development. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 49, no. 10, pp. 4417-4424. ISSN 13595997. DOI 10.1617/s11527-016-0797-5.
- CHANG, S.Y., CHEN, C.S., TU, C.H. y TSENG, Y.W., 2019. Ladle furnace slag as a sustainable binder for masonry mortars. *Key Engineering Materials*, vol. 801 KEM, no. September, pp. 385-390. ISSN 16629795. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.801.385.
- CHIANG, P.-C. y PAN, S.-Y., 2017. Iron and Steel Slags. *Carbon Dioxide Mineralization and Utilization*. S.I.: s.n., pp. 233-252. ISBN 9789811032684.
- CUBA: OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2011. *Nc 96: 2011 CEMENTO CON ADICIÓN ACTIVA — ESPECIFICACIONES*. 2011. La Habana, Cuba: s.n.
- CUBA: OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2012. *Nc 526: 2012 CEMENTO HIDRÁULICO — TÉRMINOS Y DEFINICIONES*. 2012. La Habana, Cuba: s.n.
- CUBA: OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2013. *Nc 991: 2013 Áridos- Términos y Definiciones*. 2013. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización.

- CUBA: OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2014. *Nc 120: 2014 HORMIGON HIDRÁULICO — ESPECIFICACIONES*. 2014. La Habana, Cuba: s.n.
- DIVO DURRUTHY, M., 2012. Sistema de gestión ambiental para una empresa siderúrgica en Cuba. *Gestiopolis* [en línea]. Disponible en: <https://www.gestiopolis.com/sistema-gestion-ambiental-empresa-siderurgica-en-cuba/>.
- DONDI, G., MAZZOTTA, F., LANTIERI, C., CUPPI, F., VIGNALI, V. y SANGIOVANNI, C., 2021. Use of steel slag as an alternative to aggregate and filler in road pavements. *Materials*, vol. 14, no. 2, pp. 1-13. ISSN 19961944. DOI 10.3390/ma14020345.
- ESPINOSA BORGES, A.E., PÉREZ GARCÍA, L.A., LEYVA RODRÍGUEZ, C.A., ALMENARES REYES, R.S. y ALUJAS DÍAZ, A., 2019. *Evaluación de las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos para la producción de cemento de bajo carbono*. S.l.: Universidad de Moa Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ.
- FANG, K., ZHAO, J., WANG, D., WANG, H. y DONG, Z., 2022. Use of ladle furnace slag as supplementary cementitious material before and after modification by rapid air cooling: A comparative study of influence on the properties of blended cement paste. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 314. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.125434. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125434>.
- FANTILLI, A.P. y JÓŹWIAK-NIEDŹWIEDZKA, D., 2021. *Supplementary Cementitious Materials in Concrete* [en línea]. MDPI. MDPI • Basel • Beijing • Wuhan • Barcelona • Belgrade • Manchester • Tokyo • Cluj • Tianj: Materials. ISBN 9783036514826. Disponible en: www.mdpi.com/journal/materials.
- FATHY, S., LIPING, G., CHUNPING, G. y WEI, S., 2016. Chemistry, mineralogy and morphology of steel slag and stainless steel slag: a comparative study. *Proceedings of Academics World International Conference Cairo*. S.l.: s.n., pp. 8-15. ISBN 9789386083340.
- FERNÁNDEZ PÉREZ, A., ZÚÑIGA IGARZA, L.M. y URBINA REYNALDO, M.O., 2017. Evaluación de escoria de acería de horno de arco en hormigones de

20.0 MPa. ,

- FERRARA, L., DEEGAN, P., PATTARINI, A., SONEBI, M. y TAYLOR, S., 2019. Recycling ceramic waste powder: effects its grain-size distribution on fresh and hardened properties of cement pastes/mortars formulated from SCC mixes. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* [en línea], vol. 8, no. 3, pp. 145-160. ISSN 21650381. DOI 10.1080/21650373.2018.1564396. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1564396>.
- GARCÍA AVILÉS, E. y BEYRIS MAZAR, P.E., 2014. *Escorias blancas de acería como material de construcción*. S.I.: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
- GONZÁLEZ EYZAGUIRRE, A., GARAY, V. y CANTALLOPTS, J., 2017. Mercado Internacional Del Hierro Y Acero. . Chile:
- GUERRA-CASTILLO, S., 2022. Determinantes de productividad en la industria sideromecánica cubana. *Anuario Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales*, vol. 13, no. 2218-3639, pp. 72-83.
- GUEVARA LAUREANO, M.S., 2013. *Desarrollo de nuevos materiales cementantes utilizando residuos vítreos, mediante activación mecano-química*. S.I.: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.
- HERBELIN, M., BASCOU, J., LAVASTRE, V., GUILLAUME, D., BENBAKKAR, M., PEUBLE, S. y BARON, J.P., 2020. Steel slag characterisation—benefit of coupling chemical, mineralogical and magnetic techniques. *Minerals*, vol. 10, no. 8, pp. 1-19. ISSN 2075163X. DOI 10.3390/min10080705.
- HERNÁNDEZ PRIMERO, Y., LEYVA RODRÍGUEZ, C.A., GUERRA GONZÁLEZ, Y., ALMENARES REYES, R.S., SILEGA MARTÍNEZ, D. y JIMÉNEZ MEJÍAS, D., 2016. *Potencialidades de las tobas zeolitizadas del yacimiento San Andrés y los productos de su calcinación para la obtención de aglomerantes ternarios*. S.I.: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez.
- HERRERO VAZQUEZ, T., 2015. *Estudio del efecto de la hidratación de la escoria blanca de acería de hea: aplicación en pastas y morteros de cemento*. S.I.: Universidad del País Vasco.
- HOU, G., CHEN, J., LU, B., CHEN, S., CUI, E., NAGUIB, H.M., GUO, M.Z. y ZHANG, Q., 2020. Composition design and pilot study of an advanced

- energy-saving and low-carbon rankinite clinker. *Cement and Concrete Research* [en línea], vol. 127, no. October 2019, pp. 105926. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2019.105926. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105926>.
- HUI-TENG, N., CHENG-YONG, H. y YUN-MING, L., 2021. Formulation , mechanical properties and phase analysis of fly ash geopolymer with ladle furnace slag replacement. *Journal of Materials Research and Technology* [en línea], vol. 12, pp. 1212-1226. ISSN 2238-7854. DOI 10.1016/j.jmrt.2021.03.065. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.065>.
- HUI-TENG, N., CHENG-YONG, H., YUN-MING, L., AL BAKRI ABDULLAH, M.M., ROJVIRIYA, C., MD RAZI, H., GARUS, S., NABIAŁEK, M., SOCHACKI, W., ZAINAL ABIDIN, I.M., YONG-SING, N., SLIWA, A. y SANDU, A.V., 2022. Preparation of Fly Ash-Ladle Furnace Slag Blended Polyoxyethylene Alkyether Sulphate Incorporation. *Materials*, vol. 15.
- JIMÉNEZ GUERRA, C., DÍAZ RODRÍGUEZ, A. y FERNÁNDEZ ARAUZO, E., 2021. Análisis de la aplicación del concepto de fin de condición de residuo de las escorias de fundición de horno de arco eléctrico -acero al carbono, cobre y silicomanganeso- para su uso como árido (en aplicaciones ligadas y no ligadas) y otros usos: como mate. . Madrid:
- KREIKER, J., CARRIZO, J.C., CEPPI, S. y MUTAL, R., 2014. Caracterización de desechos industriales inorgánicos para ser usados como material suplementario en morteros cementicios. *XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, vol. 1, no. November 2014, pp. 2512-2521. DOI 10.17012/entac2014.318.
- KRISKOVA, L., PONTIKES, Y., PANDELAERS, L., CIZER, Ö., JONES, P.T., VAN BALEN, K. y BLANPAIN, B., 2013. Effect of high cooling rates on the mineralogy and hydraulic properties of stainless steel slags. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol. 44, no. 5, pp. 1173-1184. ISSN 10735615. DOI 10.1007/s11663-013-9894-9.
- LAFFARGA OSTERET, J., 1957. Inestabilidad de volumen en el cemento portland. *Materiales de Construcción*, vol. 7.

- LANDABEREA LORENZO, A. y SAN JOSÉ LOMBERA, J.T., 2018. *Estado del conocimiento sobre la viabilidad del uso de escorias de acería eléctrica en hormigones compactados a rodillo*. S.I.: Universidd del País Vasco.
- LAVAGNA, L. y NISTICÒ, R., 2023. An Insight into the Chemistry of Cement—A Review. *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 1, pp. 1-20. ISSN 20763417. DOI 10.3390/app13010203.
- LAVANDERO ILLERA, R.M. y GONZALEZ, E.M., 2011. Propuesta de fabricación en cuba de materiales de construcción no tradicionales, con énfasis en la producción de cementos especiales. *IX Congreso Cubano de Geología* [en línea], pp. 1-10. Disponible en: https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/25927/1/506717___FORERO.pdf.
- LEIVA VIDAL, D., MONTENEGRO COOPER, J. y PONCE ABARCA, R., 2017. Caracterización de un suelo arcilloso y su mezcla con escoria blanca proveniente de la siderurgia integral. *Simposio de Habilitación Profesional Departamento de Ingeniería Civi*, pp. 1-22.
- LEÓN AGUILAR, I. y ALMENARES REYES, R.S., 2017. *Evaluación de escorias blancas de acería como sustituto parcial de cemento Portland*. S.I.: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
- LIM, J.W., CHEW, L.H., CHOONG, T.S.Y., TEZARA, C. y YAZDI, M.H., 2016. Overview of Steel Slag Application and Utilization. *MATEC Web of Conferences*, vol. 74, pp. 3-7. ISSN 2261236X. DOI 10.1051/matecconf/20167400026.
- LIU, Y., SU, Y., XU, G., CHEN, Y. y YOU, G., 2022. Research Progress on Controlled Low-Strength Materials: Metallurgical Waste Slag as Cementitious Materials. *Materials*, vol. 15, no. 727, pp. 1-35. DOI <https://doi.org/10.3390/ma15030727>.
- LONCNAR, M., MLADENOVIČ, A., ZUPANČIČ, M. y BUKOVEC, P., 2017. Comparison of the mineralogy and microstructure of eaf stainless Steel slags with reference to the cooling treatment. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, vol. 53, no. 1, pp. 19-29. DOI 10.2298/JMMB150910018L.

- MANGI, S.A., MEMON, Z.A., KHAHRO, S.H., MEMON, R.A. y MEMON, A.H., 2020. Potentiality of industrial waste as supplementary cementitious material in concrete production. *International Review of Civil Engineering*, vol. 11, no. 5, pp. 214-221. ISSN 2533168X. DOI 10.15866/irece.v11i5.18779.
- MARRERO RODRÍGUEZ, M.S. y ACEVEDO CATÁ, J., 2011. *Empleo de la escoria de acería como árido para fabricar morteros*. S.l.: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE).
- MARTÍNEZ DE LA CRUZ, E., 2017. *Evaluación de las arcillas rojas de Centeno para su utilización como material cementicio suplementario*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".
- MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, L., QUINTANA PUCHOL, R. y MARTIRENA HERNÁNDEZ, J.F., 2007. Aglomerante puzolánico formado por cal y ceniza de paja de caña de azúcar: la influencia granulométrica de sus componentes en la actividad aglomerante. *Ingeniería de Construcción*, vol. 22, no. 1993, pp. 113-122.
- MARTIRENA HERNÁNDEZ, J.F., 2003. *Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa*. S.l.: s.n.
- MATIAS, G., FARIA, P. y TORRES, I., 2014. Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review. *Construction and Building Materials*, vol. 73, no. April 2018, pp. 125-136. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.028.
- MAYOR HERNANDEZ, N., VALDERRAMA SÁNCHEZ, J.A., ROJAS MANZANO, M.A., BENAVIDES GARCÍA, H.M. y PRADO, D., 2020. Uso de la escoria de horno de arco eléctrico (ehae) como agregado fino para la producción de mortero estructural. *eiei*, no. October.
- MÉNDEZ PIÑA, A. y GÓMEZ GARCÍA, M.J., 2011. *Proyecto sobre residuos: utilización de escorias como sustitutos de áridos*. S.l.: s.n.
- MLADENOVIC, A., MIRTIC, B., MEDEN, A. y ZALAR SERJUN, V., 2016. Calcium aluminate rich secondary stainless steel slag as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, vol. 116, pp. 216-225. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.141.

- MONTENEGRO-COOPER, J.M., CELEMÍN-MATACHANA, M., CAÑIZAL, J. y GONZÁLEZ, J.J., 2019. Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 203, pp. 201-209. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.040. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.040>.
- MONTENEGRO, J.M., CELEMÍN-MATACHANA, M., CAÑIZAL, J. y SETIÉN, J., 2013. Ladle Furnace Slag in the Construction of Embankments: Expansive Behavior. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 8, pp. 972-979. ISSN 0899-1561. DOI 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000642.
- MORÁN MENÉNDEZ, A.M., PARRALES CANTOS, G.N. y CARVAJAL RIVADENEIRA, D.D., 2021. Revisión bibliográfica sobre la escoria de acería como complemento del cemento hidráulico Holcim Fuerte. *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas* [en línea], vol. 14, no. 2306-2495, pp. 219-232. Disponible en: <http://publicaciones.uci.cu>.
- NAIK, B., CHAUBEY, A.K., MUSTAKIM, S.M., PAUL, S., BARUA, A. y JEET, S., 2022. Synthesis and characterization of ladle furnace slag on the mechanical properties of self-compacting concrete. *Materials Today: Proceedings* [en línea], no. xxxx. ISSN 22147853. DOI 10.1016/j.matpr.2022.10.265. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.265>.
- NAJARRO-QUINTERO, R., CRUZ-CRESPO, A., PERDOMO-GONZALEZ, L., RAMIREZ-TÓRREZ, J. y ORBEA-JIMÉNEZ, M., 2018. Empleo de escorias de horno cuchara y de cenizas de paja de arroz como componentes de un fundente para recargue por soldadura. *Minería y Geología*, vol. 34, no. 1993 8012 ARTÍCULO, pp. 331-344.
- NAJM, O., EL-HASSAN, H. y EL-DIEB, A., 2022. Design of Alkali-Activated Ladle Slag Mortar Using Taguchi Method Design of Alkali-Activated Ladle Slag Mortar Using Taguchi Method. *Proceedings of the 7th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'22)*. S.l.: s.n., DOI 10.11159/icsect22.141.
- NC 566: 2007, 2007. *MORTEROS DE CAL — ESPECIFICACIONES, PREPARACIÓN Y APLICACIÓN*. 2007. La Habana, Cuba: s.n.
- NC TS 528:2013, 2013. *Cemento hidráulico - Puzolanas- Especificaciones*. . La

Habana, Cuba.

NORMALIZACIÓN, N.N. 22Cement. C.T. de, 2007. NC-TS 528: 2007 Cemento hidráulico-puzolana-especificaciones. , pp. 10.

ORTEGA-LÓPEZ, V. y MANSO VILLALÁIN, J.M., 2011. *Aprovechamiento de escorias blancas (LFS) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales* [en línea]. S.I.: UNIVERSIDAD DE BURGOS ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DEPARTAMENTO. Disponible en: <http://dspace.ubu.es:8080/tesis/handle/10259/176>.

OTEGI ALDAI, K., VÁZQUEZ, E., BARRA, M. y APONTE, D., 2012. *Estudio del impacto ambiental por lixiviación de la escoria de acería en capas granulares no ligadas 706-TFM-314*. S.I.: Universidad Politécnica de Cataluña Departamento.

OWAID, H.M., HAMID, R.B. y TAHA, M.R., 2012. A review of sustainable supplementary cementitious materials as an alternative to all-portland cement mortar and concrete. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 6, no. 9, pp. 287-303. ISSN 19918178.

PAPADAKIS, V.G. y TSIMAS, S., 2002. Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design. *CEMENT AND CONCRETE RESEARCH*, vol. 32, pp. 1525-1532.

PAPAYIANNI, I. y ANASTASIOU, E., 2006. Optimization of ladle furnace slag for use as a supplementary cementing material. *Monitoring and Modeling Concrete Properties*, pp. 411-417.

PAPAYIANNI, I. y ANASTASIOU, E., 2010. Utilization of Electric Arc Furnace Steel Slags in Concrete Products. *6th European Slag Conference*, no. October, pp. 20-22.

PAPAYIANNI, I. y ANASTASIOU, E., 2012. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. *Cement and Concrete Composites* [en línea], vol. 34, no. 3, pp. 400-407. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.015. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.015>.

PEÑA LA ROSA, L.F. y PONS HERRERA, J.A., 2018. *Termodinámica del uso del polvo de horno de arco eléctrico como oxidante*. S.I.: NSTITUTO

SUPERIOR MINERO METALÚRGICO “Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD.

- PÉREZ-GONZÁLEZ, L.L., QUINTANA-PUCHOL, R., ALUJAS-DÍAZ, A. y DANIELLYS ALEJO-SÁNCHEZ, 2020. Valoración química, física y calorimétrica de un material puzolánico obtenido mediante aluminotermia asistida por arco eléctrico utilizando escoria de cubilote. *Minería y Geología*, vol. 36 n.2, no. 1993 8012, pp. 234-252.
- PÉREZ-GONZÁLEZ, L.L., QUINTANA-PUCHOL, R., PERDOMO- GONZÁLEZ, L. y ALUJAS-DÍAZ, A., 2019. Potencialidad de la mezcla escoria de cubilote-cascarilla de laminación-viruta de aluminio para obtener un material puzolánico mediante aluminotermia. *Minería y Geología*, vol. 35 n.4, no. 1993 8012, pp. 464-479.
- PÉREZ FERNÁNDEZ, Y., DE LA FUENTE ANTEQUERA, A., PIALARISSI CAVALARO, S.H. y GONZÁLEZ ORTEGA, M.A., 2015. *Estudio de durabilidad del hormigón con áridos siderúrgicos de horno de arco eléctrico*. S.I.: Escola de Camins Escola Técnica Superiors d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports UPC Barcelonatech.
- PÉREZ ZAYAS, Y., LEÓN BENAVIDES, Y.A., PUIG MARTÍNEZ, R. y DÍAZ BRITO, N.E., 2017. Propiedades físicas de hormigones elaborados con dos tipos de residuos de procesos industriales. *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. VIII, no. 3, pp. 17-26.
- PIATAK, N.M., PARSONS, M.B. y SEAL, R.R., 2015. *Applied Geochemistry Characteristics and environmental aspects of slag : A review* [en línea]. S.I.: Elsevier Ltd. ISBN 7036486252. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.04.009>.
- PILLAI, R.G., GETTU, R. y SANTHANAM, M., 2020. Uso de materiales cementicios suplementarios (SCM) en sistemas de concreto armado- Beneficios y limitaciones. [en línea], ISSN 2007-6835. DOI 10.21041/ra.v10i2.477. Disponible en: www.revistaalconpat.org.
- PLUSQUELLEC, G., L'HOPITAL, E., BABAAHMADI, A. y MUELLER, U., 2022. Biomass ash as supplementary cementitious materials: Characterization, application, and re-conditioning. . S.I.:
- PUERTAS, F., 1993. Escorias de alto horno: composición y comportamiento

- hidráulico. *Materiales de Construcción*, vol. 43.
- QUEVEDO GÓMEZ, S.G. y SAN JOSÉ LOMBERA, J.T., 2018. *Escorias blancas de acería (LFS) en mezclas hidráulicas. Su valoración y discusión como materia prima*. S.I.: Universidad del País Vasco.
- RASHAD, A.M., 2019. A synopsis manual about recycling steel slag as a cementitious material. *Journal of Materials Research and Technology* [en línea], vol. 8, no. 5, pp. 4940-4955. ISSN 22387854. DOI 10.1016/j.jmrt.2019.06.038. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.038>.
- REGUEIRA BOZA, M., 2011. Utilización de las escorias de acería como material de construcción. *Ciencia & Futuro*, vol. 1, no. 4, pp. 31-40. ISSN 2306-823X.
- SAHOO, P.P., NAYAK, P. y RANJAN, R., 2021. Prevention of Ladle Furnace Slag Disintegration Through Different Slag Additives. *Journal of Sustainable Metallurgy* [en línea], vol. 7, no. 1, pp. 115-125. ISSN 21993831. DOI 10.1007/s40831-020-00324-0. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00324-0>.
- SANTAMARIA, A., ORTEGA-LOPEZ, V., SKAF, M., GARCÍA, V., GAITERO, J.J., SAN-JOSE, J.T. y GONZÁLEZ, J.J., 2019. Ladle furnace slag as cement replacement in mortar mixes. *Sustainable Construction Materials and Technologies*, vol. 1. ISSN 25153056. DOI 10.18552/2019/idscomt5048.
- SANTAMARÍA VICARIO, I., RODRÍGUEZ SÁIZ, Á. y CALDERÓN CARPINTERO, V., 2015. *Fabricación de morteros de albañilería con escoria negra de horno eléctrico de arco EAF y escoria blanca de horno cuchara LF*. S.I.: Universidad de Burgos ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR.
- SASAKI, T., 2015. Standardization of Iron and Steel Slag Products. *NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL TECHNICAL REPORT*, no. 109.
- SERJUN, V.Z., MIRTIC, B. y MLADENOVIC, A., 2013. Evaluation of ladle slag as a potential material for building and civil engineeringSerjun,. *Materiali in Tehnologije*, vol. 47, no. 5, pp. 543-550. ISSN 15802949.
- SHI, C. y HU, S., 2003. Cementitious properties of ladle slag fines under autoclave curing conditions. *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 11, pp. 1851-1856. ISSN 00088846. DOI 10.1016/S0008-8846(03)00211-4.
- SHRIRAKSHA JAVALI, A.R., CHANDRASHEKAR, S., RAGHAVENDRA

- NAGANNA, D.S., MANU, P., HIREMATH, H.G., PREETHI, N. y VINOD KUMAR, 2017. Eco-concrete for sustainability: utilizing aluminium dross and iron slag as partial replacement materials. *NAVER*, vol. 19, no. 9, pp. 2291-2304. ISSN 16189558. DOI 10.1007/S10098-017-1419-9.
- ŠMIGELSKYTĚ, A., 2019. *SYNTHESIS, PROPERTIES, AND APPLICATION OF RANKINITE IN THE PRODUCTION OF CO2 CURED CONCRETE*. S.I.: KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AGNĚ.
- SMIGELSKYTE, A., SIAUCIUNAS, R., HILBIG, H., DECKER, M., URBONAS, L. y SKRIPKIUNAS, G., 2020. Carbonated rankinite binder: effect of curing parameters on microstructure, strength development and durability performance. *Scientific Reports* [en línea], vol. 10, no. 1, pp. 1-14. ISSN 20452322. DOI 10.1038/s41598-020-71270-w. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71270-w>.
- SOFILIĆ, T., MLADENVIĆ, A., OREŠČANIN, V. y BARIŠIĆ, D., 2013. Characterization of ladle furnace slag from the carbon steel production. *13th International Foundrymen Conference Innovative Foundry Processes and Materials*. S.I.: s.n., pp. 354-369.
- SOSA GUTIÉRREZ, A. y CUETARA RICARDO, J.R., 2019. Evaluación de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados mixtos y escoria blanca en reemplazo del hidróxido de calcio. *Ciencia & Futuro*, vol. 9, no. 2306-823X, pp. 81-97.
- SOTO IZQUIERDO, O., SOTO IZQUIERDO, I. y DÍAZ BRITO, N., 2000. Evaluación de escoria de acería de horno eléctrico para su empleo como material de construcción. *Minerva*, vol. 6, no. 3, pp. 313-320.
- STANDARD, B., 2005. *BS EN 206-1:2000 Concrete — Part 1: Specification, performance, production and conformity*. 2005. S.I.: s.n.
- TALERO MORALES, R., ARAMBURO VARELA, C.H., NIETO-MÁRQUEZ, C.P. y PINHO, L.F., 2020. Las arcillas activadas térmicamente y su potencial en la industria del cemento. *CONAMA 2020 Congreso Nacional de Medio Ambiente*,
- TIRADO CHÁVEZ, J.G. y SOLAR JARA, M., 2018. *Resistencia de un concreto con agregado grueso sustituido en un 45% y 48% por escoria de horno de arco eléctrico*. S.I.: LOBATÓN, L., 2018. Universidad San Pedro. S.I.: s.n.

- TOBÓN, J.I. y LÓPEZ, F., 2007. Cemetera colombiana adaptation of bogue´s equations to mineralogical estimate of the clinker for a colombian cement factory. *Dyna*, no. 0012-7353, pp. 53-60.
- TRAN, D.T., LEE, Y., LEE, H.S., YANG, H.M. y SINGH, J.K., 2021. Effects of γ -C2s on the properties of ground granulated blast-furnace slag mortar in natural and accelerated carbonation curing. *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 1, pp. 1-16. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su13010357.
- VALDÉS URIBE, J.D., 2019. *Desempeño de materiales cementantes suplementarios en resistencia a compresión e hidratación en pastas de cemento*. S.I.: UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.
- VLČEK, J., ŠVRČINOVÁ, R., BURDA, J., TOPINKOVÁ, M., KLÁROVÁ, M., OVČAČÍKOVÁ, H., JANČAR, D. y VELIČKA, M., 2016. Hydraulic properties of ladle slags. *Metalurgija*, vol. 55, no. 3, pp. 399-402. ISSN 05435846.
- VLČEK, J., TOMKOVÁ, V., BABKOVÁ, P. y VAVRO, M., 2009. Alkali-activated composites based on slags from iron and steel metallurgy. *Metalurgija*, vol. 48, no. 4, pp. 223-227. ISSN 05435846.
- WANG, H., TSAI, S., HUNG, C. y JIAN, T., 2022. Research on engineering properties of cement mortar adding stainless steel reduction slag and pozzolanic materials. *Case Studies in Construction Materials* [en línea], vol. 16, no. April, pp. e01144. ISSN 2214-5095. DOI 10.1016/j.cscm.2022.e01144. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01144>.
- WANG, K., REN, L. y YANG, L., 2018. Excellent carbonation behavior of rankinite prepared by calcining the C-S-H: Potential recycling of waste concrete powders for prefabricated building products. *Materials*, vol. 11, no. 8. ISSN 19961944. DOI 10.3390/ma11081474.
- XARGAY, H., RIPANI, M., CAGGIANO, A., FOLINO, P. y MARTINELLI, E., 2019. Using recycled materials in cementitious composites. *Tecnura* [en línea], vol. 23, no. 60, pp. 38-51. Disponible en: <https://doi.org/10.14483/22487638.14697>.
- XU, X., WANG, F., GU, X. y ZHAO, Y., 2022. Mechanism of Different Mechanically Activated Procedures on the Pozzolanic Reactivity of Binary Supplementary Cementitious Materials. *Minerals*, vol. 12, no. 11, pp. 1365.

ISSN 2075163X. DOI 10.3390/min12111365.

YI, Y., MA, W., SIDIKE, A., MA, Z., FANG, M., LIN, Y., BAI, S. y CHEN, Y., 2022.

Synergistic effect of hydration and carbonation of ladle furnace slag on cementitious substances. *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, pp. 1-18. ISSN 20452322. DOI 10.1038/s41598-022-18215-7.

YONG-SING, N., YUN-MING, L., CHENG-YONG, H., AL BAKRI ABDULLAH,

M.M., LING CHAN, L.W., HUI-TENG, N., SHEE-WEEN, O., WAN-EN, O. y YONG-JIE, H., 2021. Evaluation of flexural properties and characterisation of 10-mm thin geopolymer based on fly ash and ladle furnace slag. *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 163-176.

ZARAGOZA VALDÉS, R., NASSUR BOGACHKOV, A., CONCEPCIÓN GÓMEZ,

A.A. y TÁPANES ROBAU, D., 2001. Utilización de las escorias de los hornos de arco eléctrico y de cuchara como materiales de construcción. *Use of slags from ladle and electric arc furnaces as construction materials*. [en línea], vol. 4, no. 1, pp. 19-26. ISSN 1029516X. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=32652801&lang=es&site=ehost-live>.

ZELADA MUÑOZ, R. y RODRIGUEZ CASTILLO, A., 2016. *Valoración*

económica de la escoria de horno eléctrico de siderperu como producto alternativo a la piedra cantera en el sector construcción [en línea]. S.I.: UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO. Disponible en: <http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/14465/Aguilar Ramos Cesar Hilton.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

ZITO, S.V., IRASSAR, E.F. y RAHHAL, V.F., 2020. Management of sanitary ware

wastes as supplementary cementing materials in concretes. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* [en línea], vol. 9, no. 1, pp. 35-49. ISSN 21650381. DOI 10.1080/21650373.2019.1673258. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1673258>.

ZULKARNIN, A.B., 2015. *The Study of Ladle Furnace Slag as Cementitious*

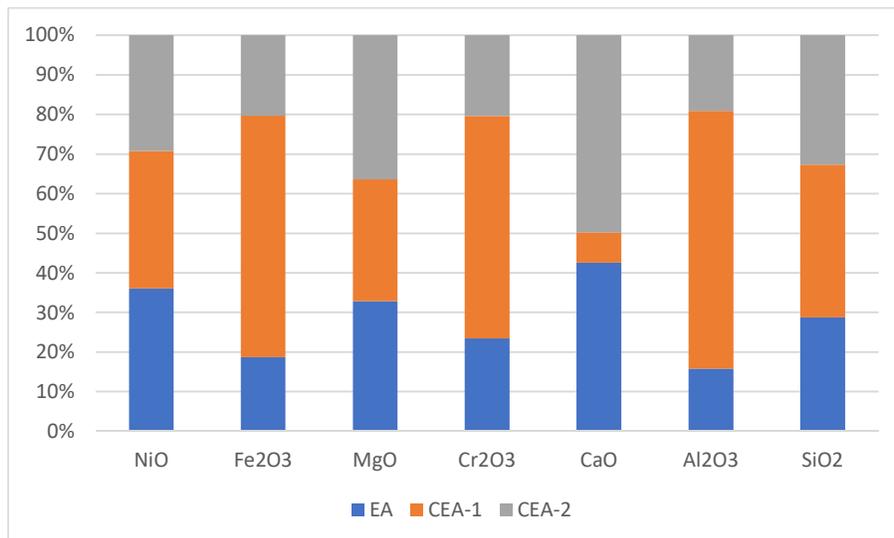
*Material*__. S.I.: Universiti Teknologi PETRONAS.

Anexos

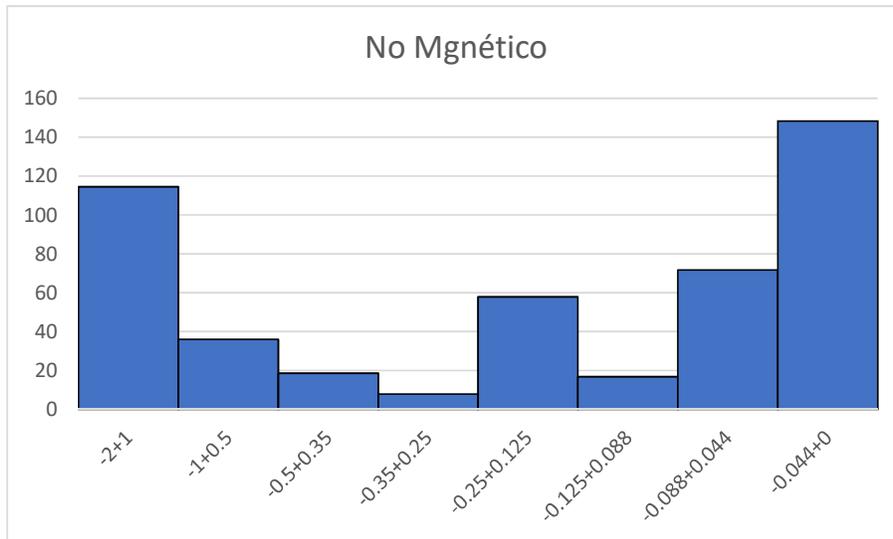
Anexo 1: Resultados del estudio fraccionario

Muestra	Fracción (mm)	m	$\Gamma 1$ %	$\Sigma\Gamma+1$ %	$\Sigma\Gamma-1$ %
EA-1	-2+1	130.59	26.12	26.12	96.08
EA-2	-2+0.5	39.85	7.97	34.09	69.96
EA-3	-0.5+0.35	20.59	4.12	38.21	61.99
EA-4	-0.35+0.25	8.59	1.72	39.92	57.87
EA-5	-0.25+0.125	60.40	12.08	52.00	56.16
EA-6	-0.125+0.088	17.32	3.46	55.47	44.08
EA-7	-0.088+0.044	73.74	14.75	70.22	40.61
EA-8	-0.044	129.32	25.86	96.08	25.86

Anexo 2: Composición química por fracciones



Anexo 3: Contenido de material no magnético por fracciones



Anexo 4: Comportamiento del material magnético retenido y cernido durante el análisis granulométrico

