

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química



Evaluación de la activación alcalina a nivel laboratorio de polvos de acería para la obtención de geopolímeros en mezclas para concreto

Trabajo de graduación presentado por Silvia del Carmen Pivaral Dubón para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala

2021

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



Evaluación de la activación alcalina a nivel laboratorio de polvos de acería para la obtención de geopolímeros en mezclas para concreto

Trabajo de graduación presentado por Silvia del Carmen Pivaral Dubón para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala

2021

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



Evaluación de la activación alcalina a nivel laboratorio de polvos de acería para la obtención de geopolímeros en mezclas para concreto

Trabajo de graduación presentado por Silvia del Carmen Pivaral Dubón para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala

2021

Vo. Bo.:

(f) _____
Ing. Gamaliel Zambrano

Tribunal Examinador:

(f) _____
Ing. Gamaliel Zambrano

(f) _____
Ing. Carmen Ortiz

(f) _____
Ing. Luis Núñez

Fecha de aprobación: Guatemala, 19 de marzo del 2021

PREFACIO

Este trabajo es producto de una propuesta hecha por el departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala para determinar una posible solución a la problemática del manejo de algunos residuos de la industria siderúrgica en el país, los cuales actualmente no reciben el tratamiento adecuado. Tras una investigación sobre el manejo de cenizas y sobre la industria en otros países se decidió determinar si las cenizas de acería cumplen con los requisitos de la norma establecida para cenizas volantes, según la Asociación América para Pruebas y Materiales (ASTM), para así clasificarla y determinar la viabilidad para obtener un concreto geopolimérico, activando en forma alcalina de las cenizas de acería. El alcance del trabajo se delimitó a la caracterización, obtención de geopolímeros, así como la propuesta de alternativas.

Agradezco a Dios por darme la salud, guía y protección durante toda la vida, y por haberme dado a una familia incondicional. A mis padres, Silvia Dubón y José María Pivaral, por darme la oportunidad de estudiar, por ser mi ejemplo para seguir, por su apoyo y amor incondicional para cumplir mis deseos y anhelos. A mis hermanos, José María Pivaral y Fernando Pivaral, por ser mi apoyo incondicional y fuente de inspiración. A mi abuela, Anita Espinoza, por su fe en mí. Al resto de mis tíos, tías, primos, quienes han estado presentes y me han apoyado en cada etapa. A mis amigos, María André Hass, Natalia Morales, Leslie De León, Carol Mayorga, Fernanda Mollinedo, Andrea Jaser, por acompañarme y apoyarme en recorrer este camino de la carrera universitaria, por darme su amistad incondicional y momentos inolvidables e invaluable. A la Universidad del Valle de Guatemala, al Departamento de Ingeniería Química, a mis catedráticos: Ing. Carmen Ortiz, Ing. Allan Cifuentes, Ing. Luis Núñez, Ing. Jorge Muñoz e Ing. Jaime Rosales por compartir su conocimiento y experiencia que contribuyeron a mi formación como profesional. Personal agradecimiento a mis asesores, Ing. Cristian Rossi e Ing. Gamaliel Zambrano por su asesoría, apoyo y experiencia que contribuyeron notablemente en el desarrollo del trabajo. Al ing. Rodrigo Rubio por su disponibilidad y apoyo. Especial agradecimiento a Cementos Progreso y sus investigadores: Ing. Luis Velásquez, Ing. Roberto Díaz e Ing. Ricardo Posadas por su apoyo, tiempo, recursos y conocimientos compartidos para el desarrollo de la sección experimental.

Este logro es en gran parte gracias a cada uno de ustedes, pues a pesar de ser un camino que parecía difícil, nunca estuve sola, siempre conté con el apoyo de todos ustedes. Dedico este trabajo a Dios, mis padres y todos ustedes, quienes son mi fuente de motivación y alegría.

CONTENIDO

PREFACIO	V
CONTENIDO	VII
LISTA DE CUADROS	X
LISTA DE FIGURAS	XII
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
A. OBJETIVO GENERAL	3
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
III. JUSTIFICACIÓN	4
IV. ANTECEDENTES	6
V. MARCO TEÓRICO	13
A. CONCRETO.....	13
1. Componentes.....	13
a. Pasta	13
b. Mortero.....	14
c. Cemento	14
d. Agua	17
e. Aire.....	18
f. Agregados.....	18
g. Aditivos	19
2. Propiedades físicas	19
a. Finura del cemento	19
b. Concreto fresco	20
c. Concreto en estado endurecido	21
B. HORNO DE ARCO ELÉCTRICO	22
C. CENIZAS O POLVOS DE ACERÍA	24
1. Metales pesados	29
a. Inmovilización de residuos sólidos	31
2. Reducción de tamaño	33
a. Trituradores de mandíbula	34
b. Molinos giratorios	35
c. Molinos de martillo	35
D. GEOPOLÍMERO	36
E. ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	40
1. Fluorescencia de rayos X	40
2. Difracción de rayos X	41
3. Metales pesados por espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inducido.....	42
4. Pérdida al fuego	43
5. Residuos insolubles.....	43
6. Análisis granulométrico	44
7. Densidad de bulto o aparente.....	45
8. Contenido de humedad.....	45
9. Actividad puzolánica.....	46

F.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	46
1.	Rango	46
2.	Media	46
3.	Varianza	47
4.	Desviación estándar	47
VI.	METODOLOGÍA.....	48
A.	EQUIPO UTILIZADO	48
B.	CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA	49
1.	Análisis químicos	49
a.	Determinación del contenido de dióxido de silicio (SiO ₂), óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) y óxido de hierro (III) (Fe ₂ O ₃)	49
b.	Determinación del contenido de trióxido de azufre (SO ₃)	49
c.	Determinación de pérdida al fuego (Loss of ignition)	50
d.	Análisis de Residuos insolubles (RI)	50
e.	Análisis de metales pesados	50
f.	Contenido de humedad.....	50
2.	Análisis físicos	51
a.	Granulometría.....	51
b.	Densidad de bulto.....	52
c.	Identificación de piezas metálicas y ferromagnetismo	53
C.	COMPARACIÓN CON LA COMPOSICIÓN REPORTADA DE OTRAS CENIZAS DE ACERÍA DE LAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS.	53
D.	COSTO DE TRANSPORTE	54
E.	ASPECTOS AMBIENTALES EN EL MANEJO DE LAS CENIZAS DE ACERÍA	54
F.	OTRAS APLICACIONES DE LAS CENIZAS DE ACERÍA.....	54
VII.	RESULTADOS	55
VIII.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	64
IX.	CONCLUSIONES	71
X.	RECOMENDACIONES	73
XI.	BIBLIOGRAFÍA	74
XII.	ANEXOS.....	81
A.	ANEXO 1: APARIENCIA DE LAS CENIZAS DE ACERÍA	81
B.	ANEXO 2: DATOS DE EQUIPOS	83
1.	Analizador de humedad	83
2.	RO-TAP	84
3.	Balanza de tamizado	84
4.	Balanza industrial.....	84
5.	Sistema de medición de la densidad de bulto	85
6.	Balanza para ensayo de piezas metálicas	85
C.	ANEXO 3: DATOS ORIGINALES	86
D.	ANEXO 4: CÁLCULOS DE MUESTRA	90
E.	ANEXO 5:ANÁLISIS DE ERROR.....	93
F.	ANEXO 6: DATOS CALCULADOS	95
G.	ANEXO 7: NORMAS	99
1.	Norma ASTM C 618.....	99
2.	Norma ISO 29581-2.....	100
3.	Método interno de CEMPRO para la difracción de rayos X.	101
4.	Norma C114.....	102
5.	ASTM C311	103
6.	ASTM C29.....	104
7.	ASTM C 422	105

8.	ASTM C 33	106
9.	EPA 3051a	107
10.	EPA 3052	108
11.	EPA 6010c.....	109
12.	EPA 200.7	110
H.	ANEXO 8: ANÁLISIS EN CEMPRO	111
XIII. GLOSARIO.....		120

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Comparación de datos sobre composición de tres muestras de cenizas de Alemania, Brasil y Jordania.	9
Cuadro 2. Proporciones de los materiales usados en la producción de concreto, % v/v.	13
Cuadro 3. Óxidos y compuestos principales del cemento y sus abreviaturas.	16
Cuadro 4. Clasificación y contenido de las emisiones del polvo horno de arco eléctrico.	25
Cuadro 5. Requerimientos químicos de la ceniza volante de acuerdo la norma ASTM C618-05.	28
Cuadro 6. Requerimientos físicos de la ceniza volante de acuerdo la norma ASTM C618-05.	28
Cuadro 7. Guía de selección de molinos a partir del rango del diámetro de partícula alimentado y del producto.	34
Cuadro 8. Razones de componentes de geopolímeros con compresibilidad satisfactoria.	39
Cuadro 9. Clasificación de la arena por su módulo de finura.	45
Cuadro 10. Tamices utilizados para la prueba de granulometría.	52
Cuadro 11. Características físicas de ceniza de acería.	55
Cuadro 12. Análisis granulométrico realizado por CETEC.	56
Cuadro 13. Rango de composición química, pérdida al fuego (LOI) y residuos insolubles (RI) de las cenizas por el método de Fluorescencia de rayos X (XRF) expresada en porcentaje m/m.	57
Cuadro 14. Rango de la concentración de las fases minerales de las cenizas de acería por el método de difracción de rayos X expresadas PORCENTAJE m/m.	58
Cuadro 15. Contenido de metales pesados expresados en mg/kg.	59
Cuadro 16. Comparación de otras cenizas de acería con la literatura en porcentaje masa/masa (% m/m).	60
Cuadro 17. Costo de transporte de las cenizas de acería para una producción mensual de 900 toneladas.	61
Cuadro 18. Aspectos e impactos ambientales del manejo de cenizas de acería.	62
Cuadro 19. Posibles alternativas al tratamiento y uso de las cenizas de acería.	63
Cuadro 20. Datos de la determinación de humedad a partir del analizador de humedad Ohaus MB 120.	86
Cuadro 21. Tiempo, peso inicial y final de las muestras para la determinación de humedad.	88
Cuadro 22. Propiedades y condiciones del agua para la determinación de la densidad.	89
Cuadro 23. Peso de la ceniza en las 5 corridas realizadas para la determinación de la densidad en la balanza industrial.	89
Cuadro 24. Datos para la determinación del porcentaje de piezas metálicas en las cenizas.	89
Cuadro 25. Datos para la obtención del análisis granulométrico.	89
Cuadro 26. Datos para la determinación del porcentaje de piezas metálicas.	90
Cuadro 27. Límites de granulometría para el agregado fino.	90
Cuadro 28. Determinación de humedad de las cenizas de acería con su media y desviación estándar a partir analizador de humedad OHAUS MB120.	95
Cuadro 29. Determinación de la densidad de bulto de la ceniza de acería a 22 °C en el recipiente de capacidad de 4.61 L en la figura 13.	95
Cuadro 30. Determinación del porcentaje de piezas metálicas presentes en las cenizas.	95
Cuadro 31. Determinación de la granulometría con los tamices mencionados en el cuadro a continuación. Corrida 1.	96

Cuadro 32. Determinación de la granulometría con los tamices mencionados en el cuadro a continuación. Corrida 2.....	96
Cuadro 33. Determinación de la granulometría con los tamices mencionados en el cuadro a continuación. Corrida 3.....	96
Cuadro 34. Determinación de la granulometría con los tamices mencionados en el cuadro a continuación. Corrida 4.....	97
Cuadro 35. Determinación de la granulometría promedio y desviación estándar de las 4 corridas.	97
Cuadro 36. Costo de transporte de las cenizas de acería desde la planta SIDEGUA hasta planta San Miguel Petapa.	97
Cuadro 37. Costo de reactivos necesarios para una tonelada de concreto geopolimérico.....	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Difractogramas de Rayos X para SiO ₂ cristalino (a) y no cristalino (b).....	11
Figura 2. Mecanismos de formación de los precursores de EAFD.....	24
Figura 3. Triturada Blake y excéntrica	35
Figura 4. Esquema de la reacción de formación del geopolímero	36
Figura 5. Análisis granulométrico de ceniza de acería.	56
Figura 6. Difractograma de ceniza de acería	58
Figura 7. Apariencia de las cenizas de acería.	81
Figura 8. Piezas metálicas atraídas por magnetismo.	81
Figura 9. Piezas magnéticas sin lavar.	82
Figura 10. Piezas magnéticas después de lavado.....	82
Figura 11. Analizador de humedad Ohaus.....	83
Figura 12. Análisis de humedad realizados a distancia	83
Figura 13. Tamizador RO-TAP y balanza de tamizado.....	84
Figura 14. Balanza industrial	84
Figura 15. Sistema de medición de densidad de bulto.....	85
Figura 16. Sistema para la determinación de piezas metálicas.	85
Figura 17. Curvas de secado de la ceniza de acería expresando el contenido de humedad en función del tiempo a una temperatura de 105 °C.....	88
Figura 18. Norma ASTM C 618: Especificación estándar para ceniza volante de carbón y puzolanas naturales calcinadas o no para su uso en concreto.	99
Figura 19. Norma ISO 29581-2 análisis químico por fluorescencia de rayos X.	100
Figura 20. Método interno para análisis de difracción de rayos X, desarrollado por Panalytical.	101
Figura 21. Norma C 114: Métodos estándar para el análisis químico del cemento hidráulico. .	102
Figura 22. Norma C 114: Métodos estándar para la prueba de cenizas volantes o puzolanas naturales para su uso en concreto con cemento Portland.....	103
Figura 23. Norma C 29: Método estándar para la determinación de densidad de agregados.....	104
Figura 24. Norma C 422: Método estándar para el análisis granulométrico.	105
Figura 25. Norma C 33: Especificaciones de agregados para concreto.....	106
Figura 26. Norma EPA 3051a: Digestión ácida asistida por microondas.....	107
Figura 27. Digestión asistida por microondas de matrices silíceas y orgánicas	108
Figura 28. Espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inducido.	109
Figura 29. Determinación de metales y elementos traza en agua y residuos por Espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inducido.....	110
Figura 30. Informe de ensayo de laboratorio químico de difracción de rayos X (10-09-2020). 111	111
Figura 31. Informe de ensayo de laboratorio químico por fluorescencia de rayos X (10-09-2020)	112
Figura 32. Informe de ensayo de laboratorio químico de pérdida al fuego (LOI) (10-09-2020).	113
Figura 33. Informe de ensayo de laboratorio químico de Residuos Insolubles (RI) (10-09-2020).	114
Figura 34. Informe de ensayo de laboratorio químico de difracción de rayos X (25-01-2021)).115	115
Figura 35. Informe de ensayo de laboratorio de agregados del análisis granulométrico (25-01-2021).	116

Figura 36. Informe de ensayo de laboratorio de Residuos insolubles (RI) y pérdida al fuego (LOI) (25-01-2021)	117
Figura 37. Informe de ensayo de laboratorio químico de fluorescencia de rayos X (25-01-2021).	118
Figura 38. Informe de resultados de contenido de metales pesados.	119

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la activación alcalina de los polvos de acería a nivel laboratorio para determinar la factibilidad técnica de la obtención de geopolímeros para mezclas de concreto. Se aplicó una metodología experimental en donde se llevó a cabo pruebas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, así como se contó con el apoyo de CEMPRO para las pruebas de difracción y fluorescencia de rayos X, pérdida al fuego (LOI), residuos insolubles (RI) y análisis granulométrico. La composición química determinada por DRX y FRX, identificó que los compuestos principales son óxidos de calcio, silicio y hierro, con los rangos 49.72 % a 51.01 % m/m, 13.04 % a 15.07 % m/m y 11.57 % a 13.32 % m/m respectivamente. Las fases minerales cristalinas principales son portlandita, calcita y merwinta, con los rangos de 61.40 % a 63.70 % m/m, 7.40 % a 28.10 % m/m y 6.70 % a 17.20 % m/m respectivamente. La caracterización física determinó una granulometría de 85 % en el tamiz No. 20 y la presencia de piezas metálicas magnéticas (50 ± 4 % m/m). El análisis fisicoquímico, determinó que no es posible la producción de geopolímeros a partir de la activación alcalina de los polvos de acería debido al bajo contenido de aluminosilicatos y óxidos de hierro de 29.95 % y 31.03 % m/m, así como al alto contenido de piezas metálicas. La reducción de tamaño de estas resulta dañina para los equipos de molienda. Adicionalmente, el costo asociado al transporte y reactivos adicionales es elevado (Q. 66,499.65). Se recomienda evaluar el proceso de fusión y afino para identificar áreas de mejora que permitan reducir la generación de estos, disminuir su emisión al ambiente o mejorar su composición, haciendo una evaluación de la calidad de la chatarra, para disminuir la cantidad de residuo y el porcentaje de materiales ferrosos útiles así como diseñar un proceso de separación adecuado para las piezas metálicas magnéticas para mejorar su distribución granulométrica y poder evaluar la alternativa de su uso como arena.

Palabras clave: polvos de acería, geopolímero, horno de arco eléctrico.

ABSTRACT

The alkaline activation of electric arc furnace dust was study at laboratory scale to determine the technical feasibility of obtaining geopolymers for concrete mix. An experimental method was carried out where tests were performed in “Laboratorio de Operaciones Unitarias“ as well as with the support of CEPMRO for X ray diffraction and fluorescence, Loss of Ignition (LOI) insoluble residues (IR) and granulometry analysis. The chemical composition was determined by XRD and XRF, the principal compounds identified where calcium, silicone and iron oxide with ranges between 49.72 % to 51.01 % m/m, 13.04 % to 15.07 % m/m and 11.57 % a 13.32 % m/m respectively. The main crystalline mineral phases are portlandite, calcite and merwint, with ranges from 61.40% to 63.70% m / m, 7.40% to 28.10% m / m and 6.70% to 17.20% m / m respectively. The physical analysis determined a particle distribution of 85 % in sieve No. 20 and the presence of magnetic metallic pieces (50 ± 4 % m/m). The physicochemical analysis determined that is not possible to produce geopolymers through the alkaline activation of EAF dusts due to its low content of aluminosilicates and iron oxide between 29.95 % and 31.03 % m/m, as well as the high metallic pieces content. The reduction of size of this pieces, results harmful for the grinding equipment. In addition, the cost associated with transport and additional reagents required is elevated (Q. 66,499.65). An evaluation of the melting and refining processes is recommended to identify areas of improvements that allow reducing their generation, reducing their emission to the environment or improving their composition, making an evaluation of the quality of the scrap, to reduce the amount of waste and the percentage of useful ferrous materials as well as designing a suitable separation process for magnetic metal pieces to improve their granulometric distribution and to be able to evaluate the alternative of their use as sand.

Key words: electric arc furnace dust (EAFD), geopolymer, electric arc furnace.

I. INTRODUCCIÓN

En el trabajo se estudió la ceniza o polvos de acería a nivel laboratorio para la determinación de la factibilidad técnica de su aplicación para la obtención de geopolímeros como un agregado a las mezclas de concreto. La utilización de los polvos como agregado al concreto, permite el aprovechamiento de un residuo industrial de la siderurgia, así como la disminución del uso de cemento requerido en las mezclas sin afectar las propiedades del concreto. Lo anterior contribuye a disminuir el impacto ambiental de ambas industrias, siderúrgica y cementera. Para ello, se realizó la caracterización de las cenizas usando las normas ASTM correspondientes en conjunto con la asesoría de los investigadores de CEMPRO.

Se determinó que los polvos de acería analizados no tienen las características necesarias para la producción de geopolímeros debido a su bajo contenido de compuestos ferrosos y aluminosilicatos, así como un alto contenido de piezas metálicas magnéticas que no pueden ser magnéticamente separadas y que impiden el acondicionamiento requerido de reducción de tamaño, debido a su dureza que genera desgastes y daños en los molinos. Adicionalmente, el costo asociado a su transporte y costo de reactivos para la activación (hidróxido de sodio y silicato de sodio), es elevado.

En concordancia con lo anterior, CEMPRO no está interesado en procesar las cenizas de acería para la obtención de geopolímeros o como sustituto en cemento o concreto, mientras estas no cambien su composición, se remuevan las partículas metálicas y el costo del flete sea elevado. Se espera que este documento sea una referencia para aquellos investigadores que deseen hacer un estudio con los polvos de acería, para evitar el gasto de más recursos en hacer análisis a menos de que se haga un cambio en la producción de acero para y se modifique la composición de estos polvos.

El trabajo de graduación está conformado de los siguientes apartados: los objetivos con la justificación del tema, luego los antecedentes que incluyen estudios previos realizados sobre el tema y la información proporcionada por CEMPRO.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Estudiar la activación alcalina de los polvos de acería a nivel laboratorio para determinar la factibilidad técnica de la obtención de geopolímeros para mezclas de concreto.

B. Objetivos específicos

1. Caracterizar los polvos de acería generados por la combustión en horno de arco eléctrico en la industria siderúrgica, usando normas, y técnicas fisicoquímicas.
2. Determinar el rango de concentración de la solución de hidróxido de sodio necesaria para la activación del subproducto de acería y posterior formación del geopolímero.
3. Determinar la factibilidad técnica y aspectos ambientales, de acuerdo con la caracterización fisicoquímica realizada, para la producción de un geopolímero a partir de la activación alcalina de los polvos de acería.

III. JUSTIFICACIÓN

Los polvos o cenizas de arco eléctrico (EAFD) son un residuo de la industria siderúrgica que está clasificado como peligroso por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), debido al contenido de metales pesados como plomo (Pb), cromo (Cr) y cadmio (Cd). Actualmente es colocado en el terreno destinado a su disposición final sin un tratamiento previo, de prevención o de contingencia contra los efectos adversos que estos tienen para la salud y el ambiente. De acuerdo con la Asociación Mundial del Acero (WSA, por sus siglas en inglés), una tonelada de acero producida en un horno de arco eléctrico es equivalente a 200 toneladas de subproductos, donde 13 toneladas corresponden a estos polvos. En Guatemala, el total de la producción de acero es por horno de arco eléctrico (EAF), en donde el manejo de este residuo es un costo elevado que no genera un beneficio económico.

Estos pueden procesarse para adecuar sus propiedades usando diferentes tratamientos físicos y químicos, y así proporcionarles un valor agregado. La evaluación de esta alternativa permitirá identificar una posible solución a la problemática actual que afronta la industria siderúrgica, disminuyendo las interacciones directas con el ambiente y, por ende, el impacto sobre este. La evaluación de la viabilidad de la aplicación de ceniza volante de carbón ha sido ampliamente estudiada y la Asociación América de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) ha desarrollado la norma ASTM C 618 que establece los parámetros para la aplicación de esta. El estudio bajo las condiciones de esta norma para las propiedades de las cenizas de acería permitió determinar la viabilidad técnica para obtener un material geopolimérico a partir de este residuo.

Los geopolímeros son polímeros inorgánicos de estructura amorfa que, gracias a su composición rica en aluminosilicatos, pueden ser alcalinamente activados para formar una estructura geopolimérica que le permite desarrollar propiedades aglutinantes. Los cementos geopoliméricos han sido introducidos satisfactoriamente en la construcción, ya que presentan elevada dureza superficial, estabilidad térmica y una precisa moldeabilidad. Los geopolímeros implican el uso de una solución alcalina como activadora, la cual tiene la función de acelerar el proceso de solubilización del aluminosilicato presente en la ceniza volante; lo cual favorece la

formación de hidratos estables y promueve la formación de una estructura compacta con estos. A los materiales necesarios para la clinkerización se le atribuye un 5 % de la producción global de dióxido de carbono (CO_2) por subproductos y residuos, por lo que la sustitución de estos implica una reducción en ese aspecto.

IV. ANTECEDENTES

De acuerdo con datos de la Asociación Mundial del Acero (WSA, por sus siglas en inglés), en el año 2019 se produjo 523, 142 miles de toneladas de acero por la vía de horno de arco eléctrico (EAF, por sus siglas en inglés) a nivel mundial, correspondiendo al 27.9 % de la producción total de acero. El dato anterior incluye la producción de acero al carbón, acero inoxidable y otras aleaciones de este. En Guatemala, en el mismo año se produjo 306 miles de toneladas de acero, siendo el 100 % de estas, en un horno de arco eléctrico. En uno de los reportes publicados por WSA en el 2010, se estableció que la producción de polvos o cenizas de acería (EAFD, por sus siglas en inglés) por un horno de arco eléctrico es de 13 kilogramos por tonelada de acero. En Aceros de Guatemala, se estima una producción de 900 toneladas mensuales de cenizas de acería.

Según la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, ASTM por sus siglas en inglés, las cenizas volantes son el residuo finamente dividido que resulta de la combustión de carbón molido o en polvo y que es transportado por los gases de combustión. La composición de la ceniza volante depende de la fuente y propiedades del carbón utilizado, pero todas las cenizas volantes incluyen cantidades sustanciales de dióxido de silicio (SiO_2) y, óxido de calcio o cal viva (CaO). (Glazer, Graber, Roose, Syrett y Youssef, 2011). Estas son el material más común utilizado para desarrollar geopolímeros, las cuales pueden ser clasificadas de acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas, según la norma ASTM C 618. Estas difieren de los polvos de acería en el proceso de producción y características fisicoquímicas.

En otros países, se han estudiado las posibles aplicaciones y reciclado del polvo o cenizas de acería de horno de arco eléctrico. Durante los procesos de fabricación de acero se producen polvos y lodos. Los polvos o finos se generan en diferentes procesos como la siderurgia y la laminación, los cuales se recogen en las plantas de abatimiento equipadas con filtros. Una vez que se eliminan de los gases, contienen grandes cantidades de óxidos de hierro y carbono, que pueden utilizarse para fines internos. Por otro lado, los residuos que contienen hierro, que no se reciclan internamente, pueden comercializarse externamente y ser utilizados por otros sectores, en diferentes aplicaciones, como en cemento Portland. Las cascarillas de laminación se producen principalmente durante los procesos de fundición continua y laminación, en atmósferas oxidantes. (Branca, Colla, Algermissen, Granbom, Martini, Morillon, Pietruck, y Rosendahl, 2020).

La capa de óxidos de hierro se forma en la superficie del acero. Puede reutilizarse como materia prima en las plantas de sinterización, así como para briquetas y pellets (Branca, *et.al.* 2020).

El reciclaje interno de algunos subproductos del proceso de peletización se ha investigado recientemente por Matino, Colla, Branca, y Romaniello, 2016, donde se logró obtener pellets de alta calidad y la reducción de los impactos ambientales y los costes operativos. Además, el polvo recuperado del tratamiento de gas EAF se ha utilizado para sustituir arcillas en la fabricación tradicional de ladrillos, al producir ahorros de energía, reducción del impacto ambiental y posibles beneficios económicos.

Otra alternativa es su aplicación como materia prima para el procesamiento del acero, separando el hierro del polvo estudiada por López y López-Delgado, (2002). Esta tiene la ventaja que el zinc está presente en el polvo, el cual podría ser reducido, volatilizado y recolectado por el sistema de remoción de polvo, enriqueciéndolo con concentraciones de zinc apropiadas para los procesos de recuperación de zinc desarrollados. Adicionalmente, se incorporó el EAFD en el horno de arco eléctrico, en forma de briquetas con el coque necesario para reducir todos los óxidos existentes en el polvo. Se determinó un aumento del 38% en el tiempo y no hubo variación significativa en el consumo de energía. El nuevo polvo generado tiene aproximadamente un 50% de Zn, lo que permite procesarlo para otros fines.

Se evaluó el desarrollo de ladrillos de construcción utilizando polvos de horno de arco eléctrico como aditivo en materias primas arcillosas normalmente utilizadas por las industrias cerámicas. Este EAFD contiene varios óxidos y, por lo tanto, puede considerarse como material secundario para sustituir arcillas en la fabricación tradicional de ladrillos. Se hace énfasis en los posibles beneficios económicos para el sector de la cerámica industrial del ahorro de energía durante la cocción junto con un alto potencial para la gestión ambientalmente segura del polvo de acero (Karayannis, 2016).

En este estudio se preparó varias mezclas de arcilla con EAFD a las que se les adicionó agua para formar una masa plástica que forma ladrillos por extrusión. Estas muestras fueron secadas y cocidas a diferentes temperaturas máximas, en un horno controlado de cámara de laboratorio, para sinterización y consolidación. Según los resultados, el desarrollo de ladrillos extruidos y cocidos con hasta un 15 % en masa de subproducto de la industria del acero reciclado es factible sin variaciones significativas en sus propiedades tecnológicas (Karayannis, 2016).

En el estudio de Caldas, Teixeira, Pinho y Cámara, 2010 se analizó el efecto del contenido de EAFD en el tiempo de fraguado de la lechada de cemento, sustituyéndolo en un 10 %, 15 % y 20 % en masa por una EAFD con un contenido de 35.89 % de hierro y 10.76 de zinc. Se concluyó que la resistencia a la compresión de las muestras de hormigón aumenta con la adición de EAFD en el rango de 10 % a 20 % en masa junto con la resistencia a la tracción con la adición. Un aumento en EAFD aumenta significativamente el tiempo de fraguado del hormigón.

En el cuadro a continuación se presenta una comparación de tres muestras de cenizas de la combustión de carbón (ceniza volante), cenizas del filtro de pulpa al final del proceso de beneficio del mineral de hierro (IOT) y la muestra de HCA se obtuvo del filtro de mangas de calderas para producción de vapor.

Cuadro 1. Comparación de datos sobre composición de tres muestras de cenizas de Alemania, Brasil y Jordania.

Fórmula	Ceniza volante¹	IOT²	HCA²	EAFD³
CaO	2.8%	0.01%	43.10%	1.4%
SiO ₂	51.7%	22.30%	1.75%	4%
Al ₂ O ₃	27.8%	4.25%	4.94%	1.28%
MgO	3.2%	0.14%	8.24%	4.66%
MnO	N/A	0.50%	0.39%	N/A
Fe ₂ O ₃	6.6%	65.78%	2.42%	32%
SO ₃	N/A	N/A	N/A	N/A
TiO ₂	1.3%	0.21%	0.50%	N/A
K ₂ O	2.7%	0.04%	4.52%	2.7%
Na ₂ O	1.0%	< 0.10 %	0.28%	N/A
P ₂ O ₅	N/A	0.15%	3.24%	N/A
ZnO	N/A	N/A	N/A	29%
Cu ₂ O	N/A	N/A	N/A	0.7%
CaSO ₄	N/A	N/A	N/A	3.43%
NaCl	N/A	N/A	N/A	5.79%
LOI	2.0%	6.10%	29.66%	11.63%
Otros	0.09 %	0.05 %	1 %	1.5%

Nota 1.LOI, pérdida al fuego por sus siglas en inglés.

En la segunda columna, se presenta la composición de cenizas volantes de carbón que cumplen con los estándares establecidos en la norma ASTM C 618 del contenido de silicio y aluminio en su composición, a las cuales se le añade hidróxido de calcio en distintas proporciones para determinar su impacto en la generación de la estructura del geopolímero y resistencia, utilizando hidróxido de sodio como activador alcalino.

¹ Composición química de ceniza volante de carbón (Dombrowski, Buchwald, y Weil, 2006).

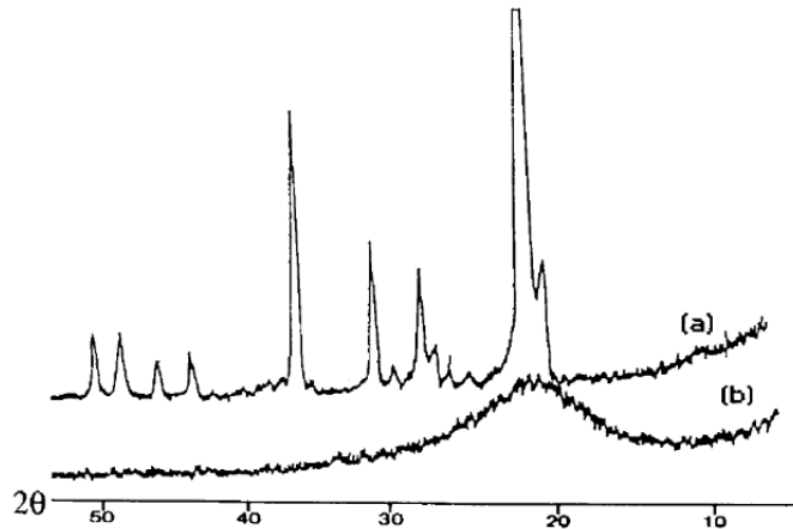
² Composición de cenizas con alto contenido de calcio (HCA) e IOT: relaves de material de hierro (Bezerra, *et.al.* 2019).

³ Polvos de horno de arco eléctrico (Alsheyab y Khedaywi, 2013).

Las investigaciones realizadas a temperatura ambiente presentaron evidencia de productos de reacción principalmente amorfos de rayos X, por lo que se dice que la fase amorfa de rayos X incluye tanto las fases de aluminosilicato como C – S– H, que coexisten como productos de reacción en muestras con alto contenido de calcio. Lo anterior indica la formación del geopolímero, que se ve favorecida por la formación de fases amorfas, junto con una gran cantidad de fases C-S-H. Las muestras con un contenido muy alto de calcio (sustitución del 20% de cenizas volantes) todavía contenían una cantidad adecuada de fases zeolíticas. La mezcla con hidróxido de calcio al 8% produjo valores máximos de resistencia, demostrando su desempeño. Adicionalmente, los resultados de difracción de rayos (XRD) muestran que los productos de reacción de los aglutinantes de cenizas volantes son principalmente amorfos a los rayos X (Dombrowski, *et.al.* 2006).

La difracción de rayos X es una técnica que permite identificar las estructuras cristalinas presentes en un material. Según (Davidovits, 2008), los ligantes de geopolímeros, al igual que otros ligantes, que se endurecen a temperatura ambiente, permanecen amorfos ante los rayos X. Los sistemas cementosos hidráulicos que requieren la hidratación de silicatos de calcio también son amorfos ante los rayos X. Debido a lo anterior, materiales en estado no cristalino, en la difracción de rayos X producen un haz difuso amplio en lugar de picos de difracción de forma. En la figura, a continuación, se presenta la comparación entre un haz de una estructura cristalina y otra no cristalina.

Figura 1. Difractogramas de Rayos X para SiO₂ cristalino (a) y no cristalino (b)



(Davidovits, 2008).

Un estudio realizado por *Bezerra, et.al. 2019*, utilizó cenizas volantes con alto contenido de calcio (HCA) de acuerdo con las composiciones reportadas en el Cuadro 1. En este se investigó el potencial de los activadores alcalinos sobre residuos sólidos, para ser usados como material de construcción. Los resultados mostraron que las cenizas con alto contenido de calcio son un material con potencial para desarrollar de materiales de construcción con propiedades hidráulicas. Los HCA ya no deberían depositarse en vertederos para evitar posibles cambios en el pH del suelo, su lixiviación y pérdida de nutrientes que pueden dañar la agricultura.

En cuanto a la resistencia a la compresión, todas las formulaciones excepto aquella con una relación 1.00 SiO₂ / Na₂O tienen potencial de aplicación en bloques compactados ya que la resistencia mínima para estos bloques a los 28 días es de 2 MPa. No obstante, es necesario evaluar otros aspectos como las características no mecánicas del sistema de mampostería. Estos incluyen características, como el rendimiento acústico y térmico de los muros de mampostería, el desarrollo y estudio de revoques compatibles y una evaluación de durabilidad (*Bezerra, et.al. 2019*).

En la última columna en el Cuadro 1, se utilizó EAFD como aditivo en mezclas de cemento asfáltico con cinco porcentajes (0%, 5%, 10%, 15% y 20%) por volumen de aglutinante. Se analizó la penetración, ductilidad, gravedad específica, punto de reblandecimiento, punto de inflamación y viscosidad, encontrándose que mientras la penetración y la ductilidad disminuían con el aumento de la concentración de EAFD en el aglutinante, aumentaban la gravedad específica, el punto de ablandamiento, el punto de inflamación, el punto de combustión y la viscosidad (Alsheyab y Khedaywi, 2013).

En el megaproyecto *Estudio técnico de producción de geopolímeros*, realizado en el 2014 en la Universidad del Valle de Guatemala se estudió la síntesis de geopolímeros a partir de arcilla y arena volcánica. Los materiales producidos fueron sometidos a pruebas de compresión, obteniendo los mejores resultados cuando la temperatura de curado fue de 60 °C y no a temperatura ambiente. Se mejoró la resistencia a la compresión cuando se utilizó arena volcánica en lugar de arcilla. En las recomendaciones se propone utilizar materiales con un tamaño de partícula menor a 45 micrómetros, pues estos demostraron mejorar la resistencia a la compresión de las mezclas geopoliméricas.

Al inicio de esta investigación se consultó con los investigadores del Centro de Investigación y Desarrollo (CETEC) sobre la posibilidad de realizar una activación alcalina, y se sugirió realizar de nuevo una caracterización de los polvos de horno de arco eléctrico (EAFD), ya que se había realizado varias en el pasado y valía la pena determinar si el EAFD había cambiado su composición química. Además, se mencionó que la empresa no tenía interés en las cenizas ya que el costo de transporte de estas es muy elevado, en comparación con el costo mucho menor de obtener los materiales en las canteras propias, por el mínimo transporte requeridos así como el costo de los reactivos necesarios para la activación.

Cementos Progreso (CEMPRO) solicitó que se hiciera un estudio científico que reuniera toda la información técnica y demás aspectos, para sustentar el hecho de no realizar más evaluaciones sobre de la activación alcalina de la ceniza de acería de Guatemala para la producción de geopolímeros, para no invertir recursos hasta que se modifiquen las características de la producción de las mismas que se producen en la empresa que proporcionó las muestras.

V. MARCO TEÓRICO

A. Concreto

Se define como la mezcla de un aglutinante, materiales de relleno (agregados), agua y eventualmente aditivos que al endurecerse forma un sólido capaz de resistir grandes esfuerzos de compresión después de un período de tiempo determinado. En esta mezcla el cemento actúa como aglutinante, siendo los materiales principales de relleno la grava y arena. (Asociación Colombiana de Productores de Concreto, 2018). Existen varias alternativas que incrementan la flexibilidad y las aplicaciones del concreto. Entre ellas se encuentra el concreto autoconsolidante, relleno de fluido, concreto proyectado, concreto ligero, concreto de alta resistencia, concreto compensador de la contracción, concreto reforzado con fibra, concreto pesado, concreto compactado a rodillo, concreto de altas prestaciones y concreto con polímeros. El concreto se encuentra constituido por componentes que pueden variar en un rango de proporciones de acuerdo con el siguiente cuadro:

Cuadro 2. Proporciones de los materiales usados en la producción de concreto, % v/v.

Componente	Proporción (% v/v)
Cemento	7 – 15
Agua	16 – 21
Aire	0.5 – 3
Agregados	56 – 81

(ASOCRETO, 2018).

A continuación, se presenta una breve descripción de sus componentes (Durand, 2017).

1. Componentes

a. Pasta

Este término se refiere a la mezcla de cemento, agua, aire y aditivos, cuando estos últimos son empleados. La pasta actúa como lubricante para agregados proporcionando fluidez a la mezcla, permitiendo una colocación y compactación adecuada cuando el concreto se encuentra en estado plástico. Cuando la mezcla alcanza el estado endurecido, la pasta de cemento al aglutinarse ocupa los espacios entre las partículas reduciendo la permeabilidad del concreto, evitando el desplazamiento de agua dentro del concreto endurecido.

La pasta fraguada y endurecida, junto con los agregados, contribuye a suministrar la resistencia mecánica característica a la compresión, la cual depende de la interfase agregado-pasta.

b. Mortero

Es una mezcla de pasta y agregado fino (usualmente arena), que es comúnmente utilizado en la nivelación de pozos, estabilización de taludes y especialmente en mampostería en donde se usa como pegamento para ladrillos o recubrimiento de muros. El concreto es la mezcla de un mortero con agregado grueso (grava).

c. Cemento

Es un conglomerante hidráulico producido por calcinación de piedra caliza, arcilla y minerales de hierro de la cual se obtiene el clinker, compuesto esencialmente por silicatos hidráulicos de calcio. Este nuevo material se muele con yeso y otros aditivos para producir cemento. Es un material que tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua debido a que los componentes reaccionan químicamente con ella para producir un material con buenas propiedades aglutinantes. Los principales constituyentes del cemento son óxido de calcio (CaO), óxido de sílice (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3), y en pequeñas cantidades se pueden presentar otros óxidos (Durand, 2017). El cemento Pórtland es el tipo más común, su nombre es debido a la similitud con una piedra abundante en la región de Pórtland, Inglaterra; patentando en 1824. Se fabrican varios tipos de cemento para satisfacer las diferentes necesidades, en la norma NTC 30 se especifican once clases de cemento, incluyendo de resistencia elevada a los sulfatos (Pórtland tipo 5), de color blanco (Pórtland blanco) y cemento Pórtland adicionado. El clinker es adicionado con una proporción de otro material que desarrolla propiedades aglomerantes al combinarse con el Clinker. Estos aditivos pueden ser escorias de alto horno, cenizas volantes, cal hidratada u otras puzolanas (ASOCRETO, 2018). A continuación, se describen brevemente los tipos principales de cementos con aditivos o adicionados:

- Cemento Pórtland de escoria de alto horno

Se obtiene a partir de la combinación de clinker y escoria molida con adición de yeso (sulfato de calcio). La escoria se presenta entre un 15 % a 85 % de la masa total, siendo comúnmente utilizado para construcciones en general.

- Cemento Pórtland puzolánico

Una puzolana es todo material silico-aluminoso natural o artificial, que al carecer de actividad hidráulica y de propiedades cementantes, que contienen compuestos que a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, se combinan con hidróxido de calcio, originando compuestos insolubles en agua y estables, comportándose como conglomerantes hidráulicos.

Las puzolanas se pueden clasificar según su origen como naturales o artificiales. La actividad de las puzolanas se encuentra relacionada con su composición y estructura interna, mientras mayor sea la estructura amorfa o vítrea y menos cristalina sea, mayor será su actividad.

Este cemento se obtiene por una pulverización de clinker Pórtland con puzolana o una mezcla uniforme entre ambos, siendo necesaria la adición de yeso por cualquier vía. El contenido de puzolana varía entre 15 % y 50 % de la masa total. Los cementos con puzolanas tienen propiedades que los diferencian del Pórtland debido a las funcionalidades que estas aportan, permitiendo que estos que tengan distintas aplicaciones (ASOCRETO, 2018).

- Cemento Pórtland con adiciones

Este se obtiene a partir de la combinación de cemento Pórtland con materiales arcillosos, calcinados o no, o calcáreo-sílico-aluminosos que poseen propiedades hidráulicas o puzolánicas.

- 1) Propiedades del cemento
- a) Propiedades químicas

El proceso de clinkerización del cemento implica reacciones en estado sólido donde los cuatro compuestos principales forman en el interior del horno a altas temperaturas, un líquido pastoso que al enfriarse origina sustancias de estructura cristalina relacionada con los óxidos involucrados. A continuación, se listan los óxidos y compuestos principales que constituyen el cemento:

Cuadro 3. Óxidos y compuestos principales del cemento y sus abreviaturas.

Fórmula	Nombre	Abreviatura
CaO	Óxido de calcio (cal)	A
SiO ₂	Dióxido de sílice (silicato)	S
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio (aluminato)	A
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro (hierro)	F
3CaO·SiO ₂	Silicato tricálcico	C ₃ S
2CaO·SiO ₂	Silicato dicálcico	C ₂ S
Al ₂ O ₃ ·3CaO	Aluminato tricálcico	C ₃ A
Al ₂ O ₃ ·4CaO·Fe ₂ O ₃	Ferroaluminato tetracálcico	C ₄ AF

(ASOCRETO, 2018).

Estos componentes se encuentran en las fases minerales del cemento, donde la alita tiene un alto contenido de C₃S, la belita de C₂S, la fase aluminato de C₃A y la fase ferrito compuesta de una solución de ferritos y aluminatos de calcio. La alita es la fase principal en los clinkers de cemento Pórtland y de ella dependen considerablemente las características de desarrollo de resistencia mecánica. Esta reacciona de forma rápida con el agua, endurece en poco tiempo y presenta un alto calor de hidratación, afectando el tiempo de fraguado y la resistencia inicial. La belita es el segundo componente más importante que reacciona lentamente con el agua, con un bajo calor de hidratación que contribuye al desarrollo de la resistencia transcurridos los primeros siete días. El contenido de estas fases minerales es alrededor del 75 % de la masa en el cemento (ASOCRETO, 2018).

Otra fase principal es la fase aluminato, la cual está compuesta principalmente por C₃A con impurezas de SiO₂ y MgO. Esta reacciona con agua, contribuyendo al calor de hidratación y a una alta resistencia inicial. Sin embargo, también confiere propiedades indeseadas como cambios volumétricos y poca resistencia al ataque de sulfatos, por lo que su contenido en el cemento varía entre 5 % - 15 % (ASOCRETO, 2018).

La formación de la pasta se debe a las reacciones químicas del cemento con el agua, según las condiciones de hidratación y composición del cemento lo que hace que su estado cambie con el tiempo, formando un conjunto complejo de productos de hidratación. En el cemento después de entrar en contacto con el agua se forman cristales que crecen lentamente hasta desarrollar una sustancia gelatinosa, el gel. Las reacciones de hidratación del clinker, la presencia de sulfato de calcio, aditivos y otros compuestos en menor grado son las responsables de la formación del gel y que liberan hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) durante el proceso (ASOCRETO, 2018).

En términos generales, se puede decir que el desarrollo de resistencia hasta los tres días de mezclado y producido es debido a la hidratación del C_3S y C_3A , mientras que a los siete días es debido al aumento de hidratación del C_3S y a los 28 días es debido al C_3S con una contribución del C_2S . Después de transcurridos los 28 días es debido a la hidratación del C_2S , indicando que es el responsable de la resistencia a largo plazo (ASOCRETO, 2018).

d. Agua

El agua, en la construcción, tiene dos aplicaciones importantes:

- Agua de mezclado: es agregada a la mezcla de concreto con la finalidad de la hidratación de los compuestos activos del cemento, para generar una mezcla trabajable y crear espacio en la pasta para los productos resultantes de la hidratación del cemento (Durand, 2017).

La cantidad de agua de mezclado se determina según el tipo de cementos y agregados a utilizar, y según esta será mayor o menor la fluidez de la pasta y al endurecerse una cantidad de agua queda fija y la otra como agua libre. Si la medida del agua de mezclado aumenta, el agua fija permanece constante, por lo que el agua libre aumenta. Lo anterior causa que también aumente la porosidad pues con el tiempo esta agua libre se evapora dejando conductos pequeños en el concreto o cemento, lo cual disminuye la resistencia de este (ASOCRETO, 2018).

- Agua de curado: el curado es el proceso por el cual el concreto a partir de cemento hidráulico madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación de este. cuando el concreto ha fraguado, es necesario suministrar agua para garantizar la completa hidratación del grano del cemento, lo cual depende de las condiciones de humedad y temperatura ambiente. El objetivo del curado es mantener el concreto saturado hasta que los espacios que estaban saturados con agua se llenen con los productos de hidratación del cemento (ASOCRETO, 2018). Las aguas adecuadas para el amasado también lo son para el curado. Para que un agua sea apta para el amasado de un concreto debe estar limpia y encontrarse lo más posible libre de impurezas, o por debajo de determinados límites, a fin de que no se produzca alteraciones en la hidratación del cemento, retrasos en sus fraguado y endurecimiento, reducción en sus resistencias, ni peligros en su durabilidad (Durand, 2017).

e. Aire

Este es normalmente atrapado dentro de la masa de concreto durante el mezclado, y es liberado posteriormente durante los procesos de compactación, No obstante, siempre queda cierta cantidad dentro de la masa endurecida, pues no es posible extraerlo todo.

f. Agregados

Son materiales granulares inertes, de tamaño comprendido entre 0 mm y 100 mm, de naturaleza inorgánica, y de procedencia natural o artificial que contribuyen a la estabilidad de volumen, resistencia y economía del concreto. Aproximadamente el 80% del volumen del concreto, es ocupado por los áridos, los cuales ejercen influencia positiva en las resistencias mecánicas, retracción, fluencia, abrasión, incluso durabilidad; por lo cual deben ser adecuados para no afectar la calidad del concreto.

Los áridos pueden clasificarse según su origen en naturales y artificiales. Los naturales proceden de la desintegración natural o artificial de rocas y según la naturaleza de estas, reciben el nombre de silíceos, calizos, graníticos, basálticos, entre otros. Los artificiales son obtenidos por un proceso industrial a partir de materiales inorgánicos u orgánicos como las escorias siderúrgicas, siempre y cuando tengan las características requeridas para un concreto (Durand, 2017).

Los agregados por su tamaño se dividen en dos grupos: agregado fino y agregado grueso. Los agregados finos normalmente son arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pasan la malla N° 4 (4.75 mm) y quedan retenidas por la malla N° 200 (0.075 mm) y los agregados gruesos consisten en grava o agregado triturado y son aquellas partículas retenidas en la malla No. 4 (4.75 mm). El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm (Durand, 2017).

g. Aditivos

Son materiales orgánicos o inorgánicos que se agregan a la mezcla durante o luego de formada la pasta de cemento y que modifican algunas características del proceso de hidratación, el endurecimiento e incluso la estructura interna del mortero (Durand, 2017).

2. Propiedades físicas
a. Finura del cemento

La finura de las partículas de cemento es una propiedad importante que hay que controlar cuidadosamente, puesto que la hidratación comienza en la superficie de las partículas de este material. Cuanto más finas sean estas, mayor será el área superficial y, por tanto, permitirá como resultado un desarrollo más rápido de la resistencia y un calor inicial mayor de hidratación (Durand, 2017). La hidratación inicia en la superficie y continua hacia el interior, por lo que el área superficial es un parámetro para regular la velocidad de hidratación.

Es importante mencionar que una alta finura implica un costo elevado debido al aumento del tiempo de molienda; además, mientras más fino es el cemento, más rápido se deteriora debido a que absorbe con mayor facilidad la humedad del aire. Adicionalmente, liberan mayor calor de hidratación, dando lugar a una mayor retracción y siendo más susceptibles a la fisuración (ASOCRETO,2018).

b. Concreto fresco

Al período en que el concreto se comporta como un fluido se le conoce como estado fresco. A continuación, se describirá las propiedades que permiten obtener una mezcla con masa homogénea, sin grandes burbujas de aire o agua atrapada (Durand, 2017).

- Trabajabilidad o maleabilidad

Es la capacidad que tiene el concreto para ser colocado y compactado sin que se produzca alguna segregación. Esta propiedad es representada por el grado de compacidad, cohesividad, plasticidad y consistencia. La prueba de asentamiento es un indicador de la facilidad de trabajo con el concreto en el momento de evaluar mezclas similares. Esta prueba se realiza usando el cono de Abrams y permite clasificar la consistencia del concreto de acuerdo con los valores de asentamiento (Durand, 2017). La consistencia depende de:

- Agua de amasado.
- Tamaño máximo del agregado.
- Granulometría.
- Forma de los agregados
- Tiempo de fraguado

Cuando entran en contacto el cemento y el agua, se inicia una reacción química exotérmica que determina el progresivo endurecimiento de la mezcla. Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable y se le conoce como fraguado final (Durand, 2017).

El tiempo de fraguado de una mezcla determinada, es el lapso necesario para que la mezcla pase del estado fluido al sólido. Así definido, el fraguado es solo una etapa del proceso de endurecimiento.

c. Concreto en estado endurecido

- Densidad

Según la norma ASTM C-642 “Método estándar para densidad, absorción y vacíos en el concreto“, la densidad se define como la masa de la unidad de volumen de concreto en estado endurecido. La densidad real de un concreto depende fundamentalmente de la que tengan los áridos, de su granulometría y del volumen de estos que entren en su composición. Una densidad elevada, puede ser un índice de que posee buenas resistencias mecánicas y buena durabilidad. Esta se obtendrá con mayor compacidad, es decir cuanto menor sea la cantidad de huecos del concreto o mayor sea la consolidación de este (Durand, 2017).

- Absorción

Esta expresa la relación que existe entre la masa de agua que penetra los poros saturables y la masa seca de la muestra penetrada por el agua (Durand, 2017).

- Porosidad

Es la cantidad de espacios vacíos que quedan inmersos dentro de la masa del material, como consecuencia de la evaporación del agua libre de la mezcla y de la presencia de aire naturalmente atrapado (Durand, 2017).

- Resistencia a la compresión

Es uno de los requisitos principales del diseño estructural para garantizar que la estructura sea capaz de soportar una carga pretendida. También se emplea como medida de calidad, para estimar la durabilidad y resistencia a la meteorización. La prueba se realiza con probetas cilíndricas y está estandarizada por la norma ASTM C 39. El tamaño estándar de las probetas es de 0.15m (6. in) de diámetro y 0.30 m (12 in) de altura, aunque también pueden utilizarse otros tamaños que tengan una relación diámetro-altura igual a dos. Luego de permanecer sumergido en agua durante 28 días, y posteriormente ser sometido a fuerzas de compresión axial en una máquina universal (Durand, 2017).

El concreto es el material de construcción más abundante en el mundo. El uso promedio actual es aproximadamente una tonelada métrica instalada por año para cada persona en el planeta. La producción de concreto es energéticamente demandante, desde la extracción de todas las materias primas que lo constituyen hasta el transporte para ser utilizado. (Glazer, *et.al.* 2011). Se estima que por cada 1000 kg de cemento Portland producido en los Estados Unidos, se emiten 927 kg de CO₂. (National Ready Mixed Concrete Association, 20008). La reducción o eliminación del uso de cemento Portland ha resultado en menores niveles de extracción de sílice virgen y piedra caliza, así como también en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) ligadas al concreto mismo. En las consideraciones actuales, no se tiene en cuenta el proceso de producción de cenizas volantes en los efectos, sino los del concreto (Glazer, *et al*, 2011).

Según el ACI, en un estudio sobre las emisiones de CO₂ producidas con la fabricación del concreto, establecen que la sustitución de cenizas volantes en un 25 % en una mezcla de concreto típica puede reducir las emisiones totales de CO₂ entre 13 y 15 %. Por el otro lado, la Asociación Americana de Cenizas de Carbón, ACAA por sus siglas en inglés, estima que las cenizas volantes en el concreto son responsables de evitar doce millones de toneladas de emisiones de CO₂ cada año (Glazer, *et al*, 2011).

B. Horno de arco eléctrico

Se obtiene el acero a partir de dos materias primas principales, el arrabio obtenido en alto horno y la chatarra. Los materiales básicos usados son minerales de hierro, coque y piedra caliza. La producción de acero se realiza eliminando impurezas y añadiendo cantidades de magnesio (Mg), silicio (Si) y distintos elementos de aleación (Chiquito, 2006). En la actualidad existen varios hornos para la obtención del acero, se listan a continuación:

- Horno de Pudelado
- Horno de Crisol
- Horno Bessemer
- Horno Thomas
- Horno Martin
- Horno Siemens
- Horno Linz-Donawit

- Horno Wilhelm Von Siemens
- Horno Heroult
- Horno Stassano
- Horno eléctrico

El horno de arco eléctrico es el más utilizado para la producción de acero a partir de chatarra. Este consiste en un recipiente circular cóncavo recubierto en su interior de material refractario, que utiliza energía eléctrica para fundir chatarra de acero. Este se compone de tres partes: solera, cuba y bóveda, donde la estructura externa de acero tiene una chaqueta de enfriamiento por agua. La fundición de la chatarra se logra con el calor desprendido por el arco eléctrico generado entre la materia prima y los electrodos. Existen varios tipos de horno de arco eléctrico pero el más económico es el de arco directo. Estos hornos cuentan con una tapa removible para permitir la carga por arriba y con un sistema hidráulico para vaciar el horno, al inclinarlo (miteco, 2019).

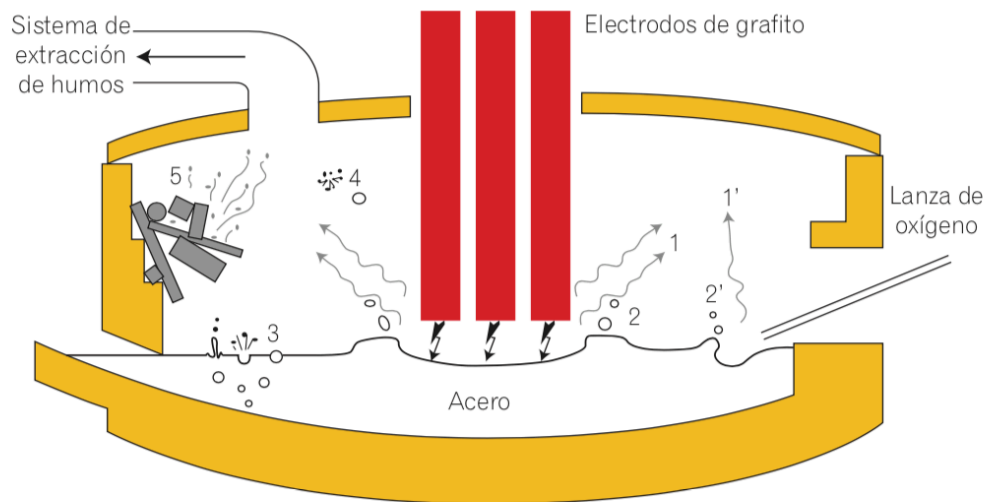
El EAF se carga por la parte superior con la chatarra o hierro esponja, en donde la fusión de la chatarra es por la acción del arco eléctrico producido por los electrodos de grafito en el horno. La chatarra, previo a ingresar al horno, se somete a un proceso de selección y separación. La calidad de este depende de su facilidad para cargarse en el horno, de su comportamiento durante la fusión y su composición (Chiquito, 2006).

El horno de arco eléctrico permite obtener una mejor calidad del acero, a un costo por tonelada más alto en comparación con otros tipos de horno, como el horno básico de oxígeno. Estos requieren de un fundente para remover impurezas y el más común es piedra caliza. En este proceso de refinado, las escorias flotan sobre el acero fundido. La escoria, producto de las impurezas presentes en el carbón y mineral de hierro, se funde y se mezcla con la cal utilizada como fundente, puede utilizarse como fertilizante de suelos áridos, como grava para carreteras o materia prima para plantas de sinterización para el suministro de altos hornos. Durante el proceso de fundición de chatarra, se producen emisiones de gases y humos que son nocivos para la salud y ambiente (miteco, 2019).

C. Cenizas o polvos de acería

La emisión de material particulado se da cuando se desprende de la chatarra en los procesos de fusión y afino, consistiendo en las impurezas en la chatarra como óxidos de hierro, pigmentos de pinturas, incrustaciones no metálicas, entre otras (Chiquito, 2006). Los polvos de acero o cenizas están constituidos por partículas finas, arrastradas por los gases de escape, generados por el horno de arco eléctrico. Estas partículas están compuestas por elementos provenientes del acero, de la escoria y de la carga, incluyendo hierro, cinc y metales pesados, como el plomo y el cadmio, que se volatilizan durante el proceso. Los polvos de acería solían ser liberados a la atmósfera usando una chimenea, pero ahora son recuperados en las casas de humos. Inicialmente, los polvos se depositaban en terrenos o en depósitos de terceros (Medias, 2009).

Figura 2. Mecanismos de formación de los precursores de EAFD.



Volatilización: 1) en el arco eléctrico; 1') en la zona de impacto del chorro de oxígeno; proyección de gotas: 2) en el arco eléctrico; 2') en la zona de impacto del chorro de oxígeno; 3) proyección de gotas en atmósfera oxidante, sufriendo una rápida descarburación; desprendimiento directo de partículas sólidas provenientes de adiciones en el horno (4) o de la chatarra (5).

(Medias, 2009)

Algunos de los componentes de la chatarra son el cinc (Zn) y el plomo (Pb), que se volatizan en su mayoría durante el proceso. Solo una pequeña parte de estos pasa a formar parte de la escoria y metal. Las partículas de polvo atrapadas en los filtros de los sistemas de extracción de humos son el resultado de una serie de fenómenos: emisiones del baño, transporte por el flujo de gas en el sistema de extracción de humos y, transformaciones físicas y químicas que ocurren durante ese transporte. Desde el punto de vista de la estructura cristalina, el polvo está constituido por espinelas del tipo (Fe, Zn, Mn), Fe₂O₃, de fases vítreas ricas en FeO_x, SiO₂ y CaO y de zincita (ZnO) (Medias, 2009).

Con respecto a las propiedades físicas, según Buzin, Walburga, Vilela, y Faria, (2016 su densidad aparente o de bulto está entre 1.1 y 2.5 g/cm³; según Lanzerstorfer, (2018) es de un promedio de 713 kg/m³ y en un segundo estudio en la densidad aparente se encuentra entre 590 y 1560 kg/m³, con un contenido de humedad entre 0.1 y 0.6 %, y una distribución de partícula entre 0.0014 mm a 0.1 mm.

Los polvos emitidos durante el procesamiento de chatarra pueden ser clasificados en primarios o secundarios según la cantidad total en la etapa. (Ioana, Semenescu, Costoiu y Marcu, 2017). A continuación, se presenta la clasificación y su contribución al total emitido:

Cuadro 4. Clasificación y contenido de las emisiones del polvo horno de arco eléctrico.

Tipo de emisión	Fase	Emisión (%)
Primario	Fusión y refinado	93
Secundario	Carga	2.75
	Evacuación	3.5
	Falta de sello (alrededores de los electrodos, puerta)	0.75
Total	Duración del proceso	100

(Ioana, *et.al.* 2017).

Al introducirse los sistemas de recolección de humos en las acerías eléctricas, comenzó a presentarse el problema de determinar qué hacer con los polvos recuperados en los filtros. La primera solución, todavía utilizada, fue el uso de los depósitos, ya sea en terrenos propios de las siderúrgicas o bien en terceros. En América Latina predomina el uso del depósito sin tratamiento en terrenos preparados para ese efecto. Debido a la presencia de metales pesados que pueden ser lixiviados y contaminar corrientes de agua, los requisitos legales para los depósitos han ido aumentando (Medias, 2009).

Una de las alternativas que ha tomado interés es el reciclado de estos, en la industria de construcción y siderúrgica. Los productores de cinc requieren materias primas con un contenido mayor al 18 % de cinc. En general, los polvos de horno eléctrico tienen un contenido menor. Existe la posibilidad de enriquecer el polvo en cinc, reciclándolo en el horno o sometiéndolo a procesos pirometalúrgicos. También existe un proceso para recuperar el hierro en forma de arrabio (Medias, 2009).

A continuación, se listan las aplicaciones actuales de las cenizas de acería:

- Depósito sin tratamiento (América Latina)
- Depósito con tratamiento de insolubilización de metales pesados (Estados Unidos)
- Reciclado en el mismo horno de arco eléctrico (España)
- Reciclado para la obtención de óxido de cinc (Europa)
- Reciclado para la obtención de arrabio y óxido de zinc (Europa)

Las técnicas comúnmente recomendadas para el análisis de la composición y observación de la microestructura de la ceniza de acería son la fluorescencia de rayos X (XRF) y difracción de rayos X (DRX). Lo anterior debido a que permiten determinar los elementos, cantidades y forma de los constituyentes.

Estudios han demostrado que la ceniza volante que pasa por un proceso de reducción de tamaño de partícula genera pastas con mejor comportamiento de resistencia a la compresión. De igual forma, se han encontrado mejores resultados con concentraciones del activador alcalino alrededor de 15 M, pues aumenta la resistencia de las pastas. En el mismo estudio, las resistencias a la compresión a los 28 días de 20.0–23.0 MPa fueron obtenidas con las concentraciones de NaOH de 9.5–14.0 M. El aumento de la concentración de NaOH más allá de este punto resultó en una disminución en la resistencia de la pasta debido a la precipitación temprana de los productos de aluminosilicato (Van Jaarsveld, *et. al.* 2002).

Durante la hidratación del cemento, los componentes de este se disuelven a diferentes velocidades al entrar en contacto con el agua según su reactividad, precipitando los hidratos correspondientes liberando gran cantidad de calor. Estos hidratos son fundamentalmente silicato cálcico hidratado (gel CSH), hidróxido cálcico o portlandita (CH) y sulfoaluminatos cálcicos hidratados. Las partículas de cada uno de estos compuestos se van distribuyendo al azar formando una microestructura heterogénea, donde el exceso de agua, que no reacciona, queda ocluido en los espacios libres, (poros), formando la llamada “Fase Acuosa de los Poros” (FAP) (Lorenzo, 1993).

La principal propiedad tecnológica de este tipo de microestructuras es la resistencia mecánica, originada por la cantidad de enlaces que se crean entre sus partículas. Cuanto menor sea el tamaño de estas partículas, y mayor por lo tanto el área específica, mayor será su capacidad enlazante. En este sentido, es el gel CSH, el considerado como responsable de la generación de resistencias mecánicas, en este tipo de materiales. La portlandita es la fase hidratada más soluble, y actúa como una “reserva alcalina”, asegurando el nivel de alcalinidad a un pH igual a 12.5, según su producto termodinámico de solubilidad. La solubilidad de la portlandita disminuye con el pH, por lo tanto, a niveles elevados de pH, se encuentran trazas de Ca*’ normalmente en la FAP (Lorenzo, 1993).

La caracterización de la ceniza debe realizarse siguiendo los parámetros establecidos en la norma ASTM C618-05 con los requerimientos listados a continuación:

Cuadro 5. Requerimientos químicos de la ceniza volante de acuerdo la norma ASTM C618-05.

	Clase		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO ₂) más óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) más óxido de hierro (Fe ₂ O ₃), mín, %	70.0	70.0	50.0
Óxido de azufre (SO ₃), máx, %	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad, máx, %	3.0	3.0	3.0
Pérdida por ignición, máx, %	10.0	6.0 ^A	6.0

^AEl usuario puede aprobar el uso de puzolana clase F que contenga hasta 12.0 % de pérdidas por ignición si se ponen a disposición registros de rendimiento aceptables o resultados de pruebas de laboratorio.

Cuadro 6. Requerimientos físicos de la ceniza volante de acuerdo la norma ASTM C618-05.

	Clase		
	N	F	C
Finura:			
Cantidad retenida cuando se tamiza en húmedo en un tamiz de 45 µm (No. 325), máx.,%	34	34	34
Índice de actividad de fuerza: ^A			
Con cemento portland, a los 7 días, min, porcentaje de control	75 ^B	75 ^B	75 ^B
Con cemento portland, a los 28 días, min, porcentaje de control	75 ^B	75 ^B	75 ^B
Requerimiento de agua, máx., Porcentaje de control	115	105	105
Solidez: ^C			
Autoclave de expansión o contracción, max, %	0.8	0.8	0.8
Requisitos de uniformidad:			
La densidad y finura de muestras individuales no variará del promedio establecido por las diez pruebas anteriores, o por todas las pruebas anteriores si el número es menor que diez, por más de:			
Densidad, variación máxima del promedio, %	5	5	5
Porcentaje retenido en 45 µm (No. 325), variación máxima, puntos porcentuales del promedio	5	5	5

^AEl índice de actividad de resistencia con cemento portland no debe considerarse una medida de la resistencia a la compresión del concreto que contiene la ceniza volante o la puzolana natural. La masa de ceniza volante o puzolana natural especificada para la prueba para determinar el índice de actividad de resistencia con cemento portland no se considera la proporción recomendada para el concreto que se utilizará en el trabajo. La cantidad óptima de cenizas volantes o puzolanas naturales para cualquier proyecto específico está determinada por las propiedades requeridas del concreto y otros componentes del concreto y debe establecerse mediante pruebas. El índice de actividad de resistencia con cemento portland es una medida de reactividad con un cemento dado y está sujeto a variación dependiendo de la fuente de cenizas volantes o puzolana natural y el cemento.

^B El cumplimiento del índice de actividad de fuerza de 7 días o 28 días indicará el cumplimiento de las especificaciones.

^C Si la ceniza volante o la puzolana natural constituirán más del 20% en masa del material cementoso en la mezcla del proyecto, las muestras de prueba para la expansión del autoclave deberán contener ese porcentaje anticipado. La expansión excesiva del autoclave es muy significativa en casos donde las relaciones de agua a material cementoso son bajas, por ejemplo, en mezclas de bloques o de hormigón proyectado.

1. Metales pesados

Los componentes mayoritarios de los EAFD son óxidos de hierro, los cuales suelen tener un contenido importante de metales pesados, como plomo (Pb), cinc (Zn), cadmio (Cd) y níquel (Ni). Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad alta, que son tóxicos para el ser humano y el ambiente. Cuando estos residuos entran en contacto directo con los suelos, durante su disposición o cuando el polvo es transportado por los vientos o las aguas de lugares adyacentes del depósito. Esto aumenta la probabilidad que los residuos entren en contacto con los seres vivos del suelo, creando interacciones que pueden impactar, negativamente, sobre la movilidad de los metales pesados en las aguas (Delvasto, 2011).

Se conoce que, como consecuencia de sus procesos metabólicos, los microorganismos del suelo producen diversos ácidos orgánicos que presentan la particularidad de poder atacar a las matrices minerales de los óxidos metálicos, haciendo que esta clase de residuos puedan resultar lixiviables bajo condiciones naturales (Delvasto, 2011). A continuación, se menciona los posibles efectos a la salud de estos metales:

- Plomo (Pb, 82)

Es un metal pesado que se ha utilizado durante muchos años debido a su resistencia a la corrosión, ductibilidad, maleabilidad y facilidad para formar aleaciones. El plomo es absorbido por inhalación, ingestión y a través de la piel. La inhalación e ingestión de plomo tiende a distribuirse en diferentes órganos, tejidos, huesos y dientes, donde se va acumulando con el paso del tiempo (Reyes, Vergara, Torres, Díaz-Lagos, y González, 2016).

- Cadmio (Cd, 48)

Sus propiedades químicas y físicas son similares a las del zinc, y con frecuencia coexiste con este metal en la naturaleza. El cadmio es muy resistente a la corrosión y se utiliza para su electrodeposición en otros metales, especialmente el acero y el hierro (Nordberg, 2000). Por inhalación o ingestión, es transportado por la sangre, concentrándose en el hígado y riñones. El cadmio tiene la capacidad de acumularse en estos órganos vitales produciendo daños irreversibles aún en concentraciones reducidas. De otra parte el tiempo de permanencia en estos órganos puede ser muy elevado. El cadmio es conocido como uno de los metales pesados

con mayor tendencia a acumularse en las plantas, causando desequilibrios en los procesos de nutrición y transporte de agua (Reyes, *et.al.* 2016).

- Zinc (Zn, 30)

Se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza y constituye aproximadamente un 0,02 % de la corteza terrestre. La esfalerita, el principal mineral de zinc y fuente de al menos el 90 % del zinc metálico, contiene hierro y cadmio como impurezas. Casi siempre aparece acompañado de galena, el sulfuro de plomo, y ocasionalmente se encuentra asociado con minerales que contienen cobre u otros sulfuros metálicos básicos (Nordberg, 2000).

La capacidad del zinc para proteger los metales ferrosos de la corrosión puede potenciarse mediante electrólisis. El zinc actúa como ánodo con el hierro y otros metales estructurales, a excepción del aluminio y el manganeso, y así, los agentes corrosivos atacan preferentemente al zinc, y se protegen los demás metales. El óxido de zinc (ZnO), o blanco de zinc (flores de zinc), se produce por oxidación de zinc puro vaporizado o mediante la calcinación del mineral de óxido de zinc. Se utiliza como pigmento para la fabricación de pinturas, lacas y barnices, y como carga en plásticos y caucho (Nordberg, 2000).

En la metalurgia y producción de zinc, las operaciones de soldadura y corte de metales galvanizados, el riesgo más frecuente derivado del zinc y sus compuestos es la exposición a los humos de óxido de zinc, que puede causar fiebre, ataques de escalofríos, náuseas, entre otros (Nordberg, 2000).

- Cromo (Cr, 24)

El único mineral de cromo importante es la espinela, cromita o piedra de cromo hierro, que es cromito ferroso y está ampliamente distribuida en la corteza terrestre. Es ampliamente utilizado en aleaciones con hierro y níquel para formar acero inoxidable, y con níquel, titanio, niobio, cobalto, cobre y otros metales para formar aleaciones con fines específicos (Nordberg, 2000).

Los compuestos que contienen Cr (VI) se utilizan en muchos procesos industriales, los compuestos con cromo en estado de oxidación Cr (III) son considerablemente menos peligrosos que los compuestos de Cr (VI). Los compuestos de cromo en estado de oxidación Cr (VI) se absorben rápidamente después de la ingestión o la inhalación. Los efectos irritantes y corrosivos del Cr (VI) se producen inmediatamente después de la absorción a través de la mucosa, que es muy rápida. La exposición profesional a los compuestos de Cr (VI) puede producir irritación o corrosión cutáneo-mucosa, reacciones cutáneas de tipo alérgico o ulceraciones de la piel (Nordberg, 2000).

a. Inmovilización de residuos sólidos

El término de inmovilización incluye métodos físicos y químicos para solidificar y estabilizar los residuos.

- La estabilización consiste en los métodos por los que residuos peligrosos son convertidos en una forma más estable, con la adición de reactivos que mejoran el manejo y las características físicas del residuo. Lo que resulta en la disminución de la superficie de la cual se da la liberación de los contaminantes, reducción de la solubilidad y toxicidad de los contaminantes (Vargas y Romero, 2006).
- La solidificación consiste en las técnicas que inmovilizan los residuos en una masa sólida, la cual puede ser el residuo original o el residuo previamente estabilizado. La adición de reactivos permite la solidificación de dicha masa, con una mayor resistencia, menor compresibilidad y permeabilidad del residuo. La mezcla produce sustancias no peligrosas y además pueden ser usados en materiales para la industria de construcción contaminantes (Vargas y Romero, 2006).

Los procesos de inmovilización suelen aplicarse en las siguientes situaciones:

- Estabilización de residuos, previo a su eliminación en vertederos
- Recuperación de terrenos contaminados
- Solidificación de residuos industriales

Mecanismos de estabilización

- Macro encapsulación: los constituyentes del residuo quedan atrapados físicamente en una matriz estructural de mayor tamaño.
- Micro encapsulación: los constituyentes del residuo peligroso quedan en el interior de la estructura cristalina de la matriz solidificada a nivel microscópico.
- Absorción: es un proceso donde los contaminantes son tomados por el sorbente, siendo una medida temporal para la mejora las características de disposición.
- Adsorción: los contaminantes son ligados de manera electroquímica a los agentes de estabilización de la matriz.
- Precipitación: los contaminantes del residuo precipitan y dan lugar a una forma más estable de los constituyentes dentro del residuo.
- Detoxificación: proceso de estabilización en el que algunas de las reacciones químicas que tienen lugar pueden dar lugar a un residuo de menor toxicidad.

El proceso de inmovilización eficiente es aquel donde los agentes contaminantes son inmovilizados con éxito, en una estructura de residuos estabilizados o solidificada y aislados del medio ambiente, haciéndolos inadecuados para la lixiviación, donde la lixiviación es el proceso por el cual los contaminantes se transfieren de una matriz estabilizada a un medio líquido como el agua (Vargas y Romero, 2006).

2. Reducción de tamaño

Es una operación unitaria usada para disminuir el tamaño de partículas. El grado de reducción, la energía consumida y la cantidad de calor generado dependen del tipo de reducción, de la magnitud de fuerzas aplicadas y del tiempo. Algunas razones por las que se lleva a cabo esta operación incluyen la mejora en las posibilidades de uso de los materiales, aumentar la relación superficie- volumen del sólido, obtener mezclas más homogéneas o facilitar la extracción de sus constituyentes. Esta es una operación utilizada por la industria cementera para formar un producto fino que permita una mayor interacción química del cemento con los aditivos, como por ejemplo el procesamiento de la caliza y dolomita. Estos equipos pueden ser de compresión, impacto, frotación o rozamiento y corte, según el método (Leñero, 2010). A continuación, se listan los tipos de molinos disponibles (Perry, 1997):

1. Trituradoras de mandíbulas
2. Trituradoras giratorias
3. Molinos de impacto de servicio pesado
4. Trituradoras de rodillos
5. Ollas secas y molinos de arrastre
6. Trituradoras:
7. Cortadores rotativos
8. Molinos de medios
9. Molinos de velocidad periférica media
10. Molinos de alta velocidad periférica
11. Molinos superfinos de energía fluida

Cuadro 7. Guía de selección de molinos a partir del rango del diámetro de partícula alimentado y del producto.

Operación de reducción de tamaño	Dureza del material	Tamaño				Razón de reducción	Tipo de equipo
		Rango de alimentación (in)		Rango de productos (in)			
		Max.	Min.	Max.	Min.		
Trituración Primaria	Duro	60	12	20	4	3 a 1	1 y 2
		20	4	5	1	4 a 1	
Secundaria	Duro	5	1	1	0.2	5 a 1	1 a 5
	Suave	1.5	0.25	0.185	0.033	7 a 1	
Molienda de pulverizado Grueso	Duro	60	4	2	0.4	10 a 1	2 a 7
		0.185 (4)	0.033 (20)	0.023 (28)	0.003 (200)	10 a 1	
Fino	Duro	0.046 (14)	0.0058 (100)	0.003 (200)	0.00039 (1250)	15 a 1	8 a 11
Desintegración Grueso	Suave	0.5	0.065	0.023	0.003	20 a 1	6 a 9
		0.156	0.0195	0.003	0.00039	50 a 1	
Fino	Suave	(5)	(32)	(200)	(1250)	50 a 1	9 a 11

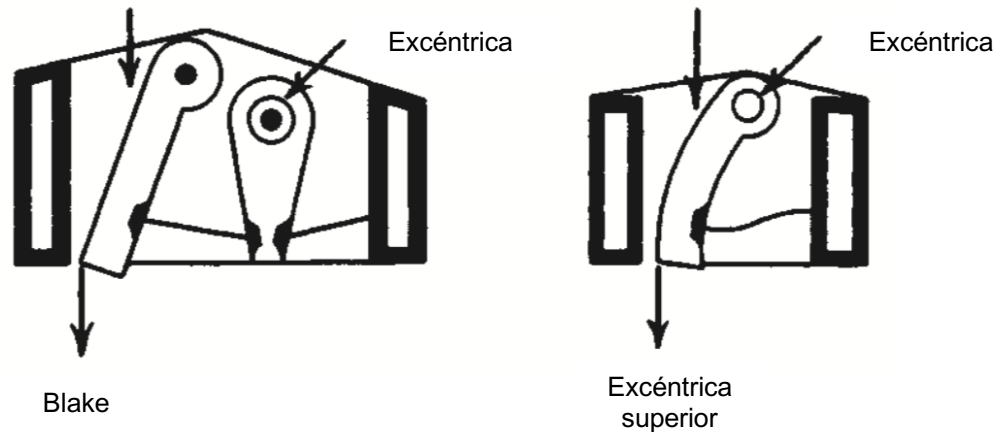
Nota 2. Número de tamiz entre paréntesis.

Nota 3. Para los materiales de trituración primaria y secundaria se tienen dos rangos de alimentación con diferentes razones de reducción.

a. Trituradores de mandíbula

Se dividen en dos grupos principales: Blake, con una mandíbula móvil pivotada en la parte superior, que da mayor movimiento a los bultos más pequeños; y la excéntrica superior, que también tiene bisagras en la parte superior, pero a través de un eje accionado que imparte un movimiento elíptico a la mandíbula. Ambos tipos tienen una placa trituradora extraíble, generalmente corrugada, fijada en posición vertical en el extremo frontal de un marco rectangular hueco. Se adjunta una placa similar a la mordaza móvil oscilante (Perry, 1997).

Figura 3. Trituradora Blake y excéntrica



(Perry, 1997)

b. Molinos giratorios

Consiste en un mortero cónico que oscila dentro de un mortero cónico de mayor tamaño. Los ángulos de los conos son tales que el ancho del paso disminuye hacia la parte inferior de las caras de trabajo. El mortero consiste en un manto que puede girar libremente sobre su eje. El husillo oscila desde un cojinete excéntrico situado debajo. El movimiento diferencial que causa el desgaste solo puede ocurrir cuando las piezas quedan atrapadas simultáneamente en la parte superior e inferior del paso debido a la diferencia de radios en estos puntos (Perry, 1997).

c. Molinos de martillo

Se utilizan para pulverización fina y desintegración funcionan a altas velocidades, donde el eje del rotor puede ser vertical u horizontal, el cual lleva martillos. Los martillos pueden ser elementos en forma de T, barras o anillos fijados al eje. La acción de trituración resulta del impacto y el desgaste entre grumos o partículas del material que se está triturando, la carcasa y los elementos de trituración. Una rejilla cilíndrica generalmente encierra todo o parte del rotor. La finura del producto se puede regular cambiando la velocidad del rotor, la velocidad de alimentación o la holgura entre los martillos y las placas de molienda, así como cambiando el número y tipo de martillos utilizados y el tamaño de las aberturas de descarga (Perry, 1997).

Al observar las reacciones de formación del geopolímero, se evidencia la liberación de agua durante la reacción, por lo que es eliminada o expulsada durante el período de curado y secado adicional, dejando atrás los poros discontinuos en la matriz. Lo anterior proporciona diversos beneficios al rendimiento de los geopolímeros. Debido a lo anterior, se dice que el agua en la mezcla de geopolímeros no tiene un rol en la reacción. Esta contribuye a la maleabilidad de la mezcla; situación que contrasta con la mezcla tradicional de cemento durante el proceso de hidratación. (Rangan, 2008).

La mezcla geopolimérica puede ser curada a temperatura ambiente o a una temperatura determinada adecuada para el proceso. Estudios han demostrado que, a temperatura ambiente, la reacción de las cenizas volantes es lenta, pero un curado inicial a temperaturas entre 40 y 95 ° C mejora la geopolimerización, lo que conduce a una alta resistencia a la compresión del geopolímero. (SomnA, Jaturapitakkul, Kajitvichyanukul y Chindaprasirt, 2011). Los tres tipos de geopolímeros más comunes son la cadena de polisilato (Al – O – Si), la cadena de polisialato siloxo (Al – O – Si – Si) y la cadena de polisialato disiloxo (Al – O – Si – Si – Si). La microestructura del geopolímero de cenizas volantes consiste en gel de aluminosilicato, cenizas volantes sin reaccionar y otras fases cristalinas. Los átomos de Al, cargados negativamente y coordinados tetraédricamente dentro de la red están balanceados por carga con cationes de metales alcalinos de la solución alcalina. (Van Jaarsveld, van Deventer, y Lukey, 2002).

Las cenizas volantes de carbón son el material comúnmente utilizado para hacer geopolímeros. Según la ASTM, las cenizas pueden clasificarse en tres tipos; clase N, clase F y clase C. Las de clase N (silicocalcáreas), son aquellas puzolanas naturales, que necesitan ser calcinadas para adquirir propiedades aceptables; las de clase F (silicoaluminosas), se producen generalmente por la combustión de antracita y carbones bituminosos de alto poder calorífico), y tienen un contenido de óxido de calcio menor al 10% y las de clase C (sulfocálcicas), se producen por la combustión de lignito y carbón bituminoso de baja calidad, y tienen más de un 10% de óxido de calcio (Tejedor, 2019). Las cenizas de clase F dan lugar a geopolímeros de alta resistencia, sin embargo, se ha demostrado que las cenizas volantes de alto contenido de calcio del lignito también se pueden utilizar para producir morteros de geopolímero con una resistencia a la compresión de hasta 65.0 MPa (Van Jaarsveld, *et.al.* 2002).

En concordancia con lo anterior, al agregar cenizas volantes al concreto, la trabajabilidad de la mezcla mejora durante el vertido debido a la forma esférica de sus partículas. La ceniza volante en la mezcla permite que el concreto fluya y bombee mejor que el concreto de cemento 100% Portland, requiriendo menor cantidad de agua en la mezcla en proporción directa con la cantidad de cenizas volantes agregadas a la misma. Según el Instituto Americano del Concreto, ACI por sus siglas en inglés, la ceniza volante hace que el concreto sea menos permeable, lo que reduce la infiltración del agua (Halstead, 1986).

En particular, la ceniza volante aumenta la resistencia del concreto a los ataques químicos, incluyendo el agregado de álcali-sílice y las reacciones al sulfato, que pueden causar grietas expansivas. La disminución de la permeabilidad es el resultado de compuestos cementosos adicionales y la reducción de agua en la mezcla. Esto, a su vez, reduce las posibilidades de corrosión del refuerzo de acero, que es una fuente importante de falla del concreto. En otras palabras, la ceniza volante imparte propiedades que mejoran el rendimiento del concreto en sí, extendiendo su vida útil. (Halstead, 1986).

Cuando el concreto fresco se fragua, lo hace debido a una reacción entre el agua y los compuestos cementosos en el cemento para formar varios tipos de hidratos de silicato de calcio y aluminato de calcio. Estos productos forman una estructura alrededor de las partículas agregadas que conducen al fraguado del concreto. Un subproducto de las reacciones iniciales es el hidróxido de calcio. El hidróxido de calcio en solución reacciona lentamente con materiales puzolánicos como las cenizas volantes. El producto de esta reacción es básicamente del mismo tipo y características que el producto de la reacción cementosa inicial. De este modo, se obtiene un producto de unión adicional y se desarrollará una resistencia adicional. Debido a que la reacción puzolánica es mucho más lenta que las reacciones cementosas iniciales, cuando la ceniza volante ha reemplazado una porción del cemento, es probable que la resistencia inicial sea menor, pero en última instancia, se debe desarrollar una resistencia igual o mayor. La rapidez con que esto ocurra dependerá de las características de las cenizas volantes y los cementos utilizados, así como de la proporción de los ingredientes del hormigón de cenizas volantes (Halstead, 1986).

Las reacciones de hidratación son exotérmicas, es decir, una porción de la energía latente requerida para combinar los elementos es liberada por la reacción de hidratación y esto eleva la temperatura del concreto. Si las reacciones ocurren rápidamente dentro de una gran masa de concreto y el calor no se disipa lo suficientemente rápido como para evitar un aumento significativo de las temperaturas, las tensiones en el concreto a medida que se enfría pueden ser de suficiente magnitud como para causar grietas. En el concreto con cenizas volantes, las reacciones puzolánicas son lentas ya que el calor se libera durante un período de tiempo más largo y las temperaturas de este permanecen más bajas porque el calor se disipa a medida que se desarrolla. Un gran porcentaje de partículas de cenizas volantes más grandes que el tamiz de 45 μm (No. 325S) tuvo un efecto negativo en las resistencias de 28 y 90 días de los morteros de cenizas volantes de cemento Portland curados normalmente; un gran porcentaje de partículas de menos de 10 μm tuvo una influencia positiva en la resistencia del mortero (Halstead, 1986).

Los materiales geopoliméricos tienen una amplia gama de aplicaciones en el campo de industrias tales como las industrias automotriz y aeroespacial, fundiciones no ferrosas y metalurgia, ingeniería civil y plástica. El tipo de aplicación de los materiales geopoliméricos está determinado por la estructura química (Rangan, 2008).

En el cuadro a continuación se muestran las razones de materiales en la composición de geopolímeros que han generado resultados satisfactorios, los cuales fueron determinados en base a la literatura de otros autores [8,9,15].

Cuadro 8. Razones de componentes de geopolímeros con compresibilidad satisfactoria.

Razones	Límite inferior	Límite superior
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0.2	0.48
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3	5
$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	10	25
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	0.8	1.2

La solución activadora alcalina juega un papel importante en la disolución de los átomos de Si y Al para formar precursores de geopolímeros y finalmente material de aluminosilicato. Los activadores alcalinos más utilizados son NaOH y KOH. Estudios han demostrado que el NaOH afectaba significativamente tanto la resistencia a la compresión como la estructura de los geopolímeros. La concentración de NaOH en la fase acuosa del sistema geopolimérico actúa sobre el proceso de disolución, así como sobre la unión de partículas sólidas en la estructura final. Cuando las cenizas volantes entran en contacto con NaOH, comienza la lixiviación de Si, Al y otros iones menores. La cantidad de lixiviación depende de la concentración de NaOH y del tiempo de lixiviación. (Somna, Jaturapitakkul, Kajitvichyanukul y Chindaprasirt, 2011).

E. Análisis de laboratorio

A continuación, se listan las técnicas y análisis realizados a las cenizas:

1. Fluorescencia de rayos X

La fluorescencia de rayos X (FRX) tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas y líquidas. Este análisis es un método cualitativo-cuantitativo basado en la medida de las intensidades de los rayos X característicos emitidos por los elementos químicos que componen la muestra cuando es debidamente excitada. Los electrones en el átomo están distribuidos entre los distintos niveles y subniveles de energía, ocupando primero aquellos de menor energía. A este estado de mínima energía se le conoce como el estado fundamental (Alvarado, 2013).

Los átomos son bombardeados por un haz de electrones o fotones de rayos X, donde una parte de la energía es invertida para producir el espectro característico de rayos X de los elementos que componen la muestra bombardeada. Este proceso consta de tres etapas, la excitación, emisión y detección de esos rayos X. El choque de un electrón o fotón X incidente con un electrón de los niveles internos del átomo, da lugar a la expulsión de dicho electrón quedando el átomo en un estado de excitación (Campo, 1970).

Este átomo excitado tiende a volver inmediatamente a su estado fundamental, lo cual alcanza debido a los saltos que se producen de electrones de los niveles externos hacia los internos para llenar el espacio vacío. Este proceso genera un desprendimiento de energía igual a la diferencia de energía entre los niveles donde se da el salto, en la forma de radiación electromagnética correspondiente a la región de rayos X (Campo, 1970).

La excitación producto del bombardeo de electrones se conoce como excitación primaria y a la radiación obtenida se le conoce como radiación X primaria. Los tubos de rayos X son fuentes de la radiación X primaria. A la radiación X emitida por un átomo, cuando en vez de electrones acelerados se utilizan rayos X para su excitación, se la designa como radiación secundaria o radiación X de fluorescencia (Campo, 1970).

Dentro de las ventajas que proporciona esta técnica se considera que no es destructiva, ya que es una determinación relativamente rápida, la interpretación de los resultados es simple, permite la determinación de varios elementos de manera simultánea. Adicionalmente, posee un amplio rango de aplicaciones, sin embargo, el equipo requerido es costoso (Meléndez y Camacho, 2009).

2. Difracción de rayos X

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica instrumental no destructiva, rápida y confiable, utilizada para la identificación de las fases minerales de materiales con estructura cristalina. Esta técnica se encuentra fundamentada en la estructura tridimensional de los materiales, la cual se define como la repetición regular de planos de átomos que forman un cristal. Cuando un haz enfocado de rayos X interactúa con estos planos, parte de este es transmitido, absorbidos por la muestra, refractado y dispersado, y otra parte es difractada. Los rayos X son difractados de forma distinta para cada mineral, dependiendo de los átomos que componen su estructura cristalina y de cómo se encuentren ordenados (Ochoa, 2017).

Los rayos X suelen ser generados en un tubo sellado al vacío al que se aplica una corriente de alto voltaje que calienta el filamento, generalmente de cobre y cobalto, donde este voltaje acelera los electrones que al incidir con el objetivo producen los rayos X con la longitud de onda característica del mismo. El detector detecta la señal de los rayos X, convirtiéndola en una frecuencia de conteo. El escaneo de rayos X resulta del cambio de ángulo entre el tubo emisor de rayos X, la muestra y el detector (Ochoa, 2017).

Dentro de las ventajas se considera que es una técnica no destructiva que permite una determinación rápida de las fases de materiales cristalinos, que no requiere una gran cantidad de muestra y la interpretación de datos es relativamente sencilla. No obstante, solo determina fases cristalinas y donde para la determinación de fases no cristalinas, no existe un método preciso sino aproximaciones. Asimismo, la determinación de fases de componentes similares será difícil, además se requeriría una base de datos de patrones de referencia para la interpretación de los difractogramas (Ochoa, 2017).

3. Metales pesados por espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inducido

Es una técnica útil para la determinación de una amplia variedad de elementos en geología de materiales. Para muchos metales, la técnica posee sensibilidad adecuada para la determinación directa siguiendo el procedimiento de disolución apropiado. Para otros elementos, se puede utilizar técnicas de concentración para ampliar los límites inferiores de detección (Manning, y Grow, 1997).

La espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inducido (ICP-AES) utiliza un plasma como fuente de atomización y excitación. Un plasma es eléctricamente neutro, gas altamente ionizado que consta de iones, electrones y átomos. La energía que mantiene un plasma analítico se deriva de un campo eléctrico o magnético. La mayoría de los plasmas analíticos funcionan con argón o helio puro, lo que imposibilita la combustión. Los plasmas se caracterizan por su temperatura, electrón y densidades de iones (Manning, y Grow, 1997).

El objetivo de la espectroscopia atómica analítica es identificar elementos y cuantificar sus concentraciones en varios medios. El procedimiento consta de tres pasos: formación, excitación y emisión de átomos. Antes de la excitación, un elemento que está ligado a una matriz específica debe estar separada de esa matriz para que su emisión atómica los espectros están libres de interferencias. Para espectroscopia UV y visible, la energía de entrada debe ser suficiente para elevar un electrón del estado fundamental al estado excitado. Una vez el electrón está en estado excitado, el átomo emite luz, que es característica de ese elemento particular (Manning, y Grow, 1997).

4. Pérdida al fuego

También conocida como LOI por sus siglas en in inglés, es una prueba para analizar los minerales, la cual consiste en un calentamiento de una muestra a una temperatura específica permitiendo que las sustancias volátiles escapen hasta alcanzar peso constante. El análisis puede realizarse en una atmosfera reactiva o en presencia de un gas inerte de acuerdo con la norma ISO 29581-2:2010. En los agregados para o concreto para construcción, el porcentaje de materia orgánica afecta el tiempo de fraguado y el endurecimiento, lo que puede ser una causa de deterioro en el concreto (Lagares, 2017).

Ciertos componentes volátiles no carbonáceos en los sedimentos pueden incrementar los valores de LOI, dándole mayor importancia a las arcillas, el yeso, minerales azufrosos, e hidróxidos metálicos, que también pueden modificar los valores de LOI vía oxidación o deshidratación. Otros errores pueden producirse por perdidas de carbón inorgánico entre las temperaturas de 425 °C y 520 °C por parte de minerales como la siderita, magnesita, rodocrosita y dolomita (Lagares, 2017).

5. Residuos insolubles

Este ensayo proporciona el porcentaje de material sin carbonatos en agregados calizos y sirve para caracterizar el desgaste/pulido característico de estos, que pueden presentar rangos de resistencia al deslizamiento (Flores, Pérez y Garnica, 2008).

Se determina mediante la digestión de la muestra en ácido clorhídrico seguida, después de la filtración, por una digestión adicional en hidróxido de sodio. El residuo resultante es incinerado y pesado. Este se rige bajo la norma ASTM C 114. Es útil para determinar la presencia de impurezas presentes en el agregado y cementos (Kiattikomol, Jaturapitakkul, y Tangpagasit, 2000).

6. Análisis granulométrico

Esta influye en la reactividad química y en la demanda de agua en la mezcla de mortero o cemento. La granulometría es afectada por el proceso térmico y el tipo de precipitadores. La finura de las cenizas y su contenido en la mezcla, es un factor determinante en la demanda de agua y en el desarrollo de resistencias de la mezcla en la cual se encuentran incorporadas. (Lorca, 2014).

Este análisis consiste en separar las partículas del agregado según su tamaño, de manera que se conocen las cantidades en masa que cada tamaño contribuye en la masa final. Para la separación se usan tamices de diferentes aberturas, Las masas cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la grafica de valores de material. Los resultados del análisis granulométrico se expresan en un gráfico de barras del porcentaje retenido en función del tamaño de partícula (Cañas, 2007).

El módulo de finura (MF) es un índice que sirve para clasificar los agregados en función de su granulometría que se obtiene de acuerdo con la norma ASTM C 125. Consiste en la suma de los porcentajes retenidos acumulados de un árido, dividido por 100, de una serie de tamices que están en progresión geométrica de razón 2. Es un índice de la finura del agregado entre mayor sea el modo de finura, mas grueso sera el agregado. El modulo de finura del agregado fino es útil para estimar las proporciones de los de los agregados finos y gruesos en las mezclas de concreto (Villalta, 2011).

Cambios significativos en la granulometría de la arena tienen un efecto importante en la demanda de agua y, por ende, en la trabajabilidad, por lo que una variación significativa en la granulometría de la arena implica ajustes en el contenido de cemento y agua para conservar la resistencia del mortero (Villalta, 2011).

Cuadro 9. Clasificación de la arena por su módulo de finura

Tipo de arena	Módulo de finura
Gruesa	2.9 – 3.2
Media	2.2 – 2.9
Fina	1.5 – 2.2
Muy fina	1.5

7. Densidad de bulo o aparente

La densidad aparente de un polvo es la relación entre la masa y volumen de una muestra de incluyendo la contribución del volumen vacío entre partículas. Esta depende de la densidad de las partículas de polvo y de su disposición espacial. Asimismo, las propiedades de volumen de un polvo dependen de la preparación, el tratamiento y el almacenamiento de la muestra. La densidad aparente se expresa en la unidad internacional de kilogramo por metro cúbico (kg/m^3) (WHO, 2012).

La densidad es una propiedad física de los agregados que indica el volumen ocupado en la mezcla y está definida por la relación entre la masa y el volumen de un agregado determinado, lo que significa que depende directamente de las características del grano de agregado. En la producción y funcionamiento de morteros y concretos se considera en el diseño (Lorca, 2014).

El método se rige por la norma ASTM C 29, equivalente a la norma NTG 41010 h2 (Determinación de la densidad aparente (masa unitaria) e índice de vacíos en los agregados), consiste en la determinación de la densidad aparente a través de la calibración del recipiente en conformidad con la norma con una capacidad específica (ASTM, 2003).

8. Contenido de humedad

La humedad natural es la cantidad de agua que posee un agregado en estado natural. El método gravimétrico determina la humedad por diferencia de masas, llevando una muestra de agregado a peso constante, obteniéndose la humedad evaporable. Este método no considera el agua químicamente ligada a algún compuesto del agregado. Este se rige bajo la norma ASTM C 311:

“Métodos de prueba estándar para muestreo y prueba de cenizas volantes o puzolanas naturales para uso en concreto de cemento Portland“ (Lorca, 2014).

9. Actividad puzolánica

Es la capacidad de un material para fijar la cal a temperatura ambiente y formar compuestos con propiedades hidráulicas. Se dice que un material tiene propiedades hidráulicas cuando este tiene la capacidad de endurecer en presencia de agua (Lorca, 2014).

Se dice que la actividad puzolánica tiene una relación entre el tamaño de las partículas de cenizas volantes y su composición química. Las partículas de cenizas más grandes tienden a actuar más como finos inertes que como componentes activos y las partículas más finas tienden a constituir la parte reactiva de la ceniza. Es esencial determinar la actividad puzolánica de la ceniza volante cuando se quiere emplear como producto activo en una mezcla de conglomerante (Lorca, 2014).

Para determinar la actividad puzolánica se usan pruebas físicomecánicas y métodos químicos. El más común es el ensayo mecánico que mide la carga de rotura de compresión de mezclas de puzolanas con cemento Portland o cal, mediante el cual se determina el índice de la actividad puzolánica de la ceniza volante (Lorca, 2014).

F. Análisis estadístico

1. Rango

Es una medida de dispersión, que es la diferencia entre el mayor y el menor valor de la variable, indica la longitud del intervalo en el que se hallan todos los datos (Castillo, 2009).

2. Media

Es una medida aritmética de tendencia central, también conocida como promedio, que se obtiene de la suma de los valores de un conjunto y al dividir el producto de esta suma entre el número de valores de este. Se expresa por \bar{x} , si son para una población, se denota por la letra griega (Castillo, 2009).

3. Varianza

La varianza es una medida de dispersión, que tan próximos o no están los datos a la media. La varianza es la media de los cuadrados de la desviación media, la cual es la media de los valores absolutos de las diferencias entre la media y los diferentes datos (Castillo, 2009).

4. Desviación estándar

Es una medida de dispersión que es la raíz cuadrada de la varianza. La desviación estándar muestral se representa por “s” mientras que para la desviación poblacional se usa “ σ ” (Castillo, 2009).

VI. METODOLOGÍA

A. Equipo utilizado

Ensayo	Equipo	Especificación	Norma/Procedimiento estándar
Composición química (Determinación del contenido de dióxido de silicio (SiO ₂), óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) y óxido de hierro (III) (Fe ₂ O ₃) y trióxido de azufre (SO ₃)	Espectrómetro	Thermo Fisher Scientific ARL Optim'x 375	Método verificado bajo ISO 29581-2:2010
Determinación de fases minerales	Difractómetro	Panalytical Empirean series 2, tubo de cobre y detector PIXcel3D	Método interno DE CETEC desarrollado por Panalytical.
Determinación de pérdida al fuego (LOI)	Balanza analítica	Mettler-Toledo ME204	Método verificado bajo ISO 29581-2:2010
	Mufla	Thermo Scientific Lindberg Blue M	
	Crisoles	Au/Pt:05/95	
Determinación residuos insolubles (RI)	Balanza analítica	Mettler-Toledo ME204	Método validado y acreditado bajo ISO 17025:2017, utilizando la norma ASTM C114-18 como referencia.
	Mufla	Thermo Scientific Lindberg Blue M	
	Crisoles	Au/Pt:05/95	
Contenido de metales pesados	Horno de combustión IR	N/A	EPA 3051a, EPA 3052, EPA 6010c, EPA 200.7 y Horno de combustión IR.
Contenido de humedad	Analizador de humedad	Termobalanza Ohaus MB120 con bandejas de aluminio	Adaptado de ASTM C 311

Ensayo	Equipo	Especificación	Norma/Procedimiento estándar
Granulometría	Tamizador	RO-TAP	Adaptado de ASTM D 422
	Balanza electrónica	Balanza Mettler Toledo IND 231	
	Tamices	WS Tyler, No. 20, 30, 45, 60, 80, 100	
Densidad de bulto	Balanza electrónica industrial	OHAUS 3000 series	Adaptado de ASTM C 29
	Termómetro de bulbo	Rango de 0 a 100 °C	
	Probeta	Capacidad: 1L	
	Cubeta	Capacidad: 2 L (1/2 galón)	
Porcentaje de piezas metálicas	Balanza	Nordika	N/A

B. Caracterización de la ceniza

1. Análisis químicos

a. Determinación del contenido de dióxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (III) (Fe_2O_3)

- Determinado por fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X en el Centro Tecnológico de Cementos Progreso.
- Para la difracción de rayos X se utilizó un método interno desarrollado por Panalytical.
- Para la fluorescencia de rayos X se aplicó el método verificado bajo ISO 29581-2:2010
- El uso del método analítico por fluorescencia de rayos X es permitido por la ASTM C114 – 07.

b. Determinación del contenido de trióxido de azufre (SO_3)

- Determinado por fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X en el Centro Tecnológico de Cementos Progreso.
- Para la difracción de rayos X se utilizó un método interno desarrollado por Panalytical.
- Para la fluorescencia de rayos X se aplicó el método verificado bajo ISO 29581-2:2010.

- c. Determinación de pérdida al fuego (Loss of ignition)
- Determinado en el Centro Tecnológico de Cementos Progreso mediante el método verificado bajo ISO 29581-2:2010 .
- d. Análisis de Residuos Insolubles (RI)
- Determinado en el Centro Tecnológico de Cementos Progreso mediante el método validado y acreditado bajo ISO 17025:2017, utilizando la norma ASTM C114-18 como referencia.
- e. Análisis de metales pesados
- Determinado en el Laboratorio de Recursos Alternativos (AFR), PROVERDE por solicitud de CEMPRO.
 - Se aplicó los métodos siguientes: EPA 3051a, EPA 3052, EPA 6010c, EPA 200.7 y Horno de combustión IR.

f. Contenido de humedad

Para la determinación del contenido de humedad se llevó a cabo la siguiente metodología:

- Se revisó el estado, orden y colocación correcta de los componentes del analizador (ver anexo, *Figura 11*).
- Se verificó el correcto nivelado del analizador.
- Se ubico el indicador de nivel en el centro.
- Se conectó la espiga del analizador de humedad al toma corriente.
- Se encendió el analizador con el botón ON/OFF.
- Se taró del recipiente de aluminio.
- Se pesó 10 g de la muestra de ceniza.
- Se presionó el botón de “Method Library” y luego el botón “New”
- Se colocó el nombre del método a “CENIZA + No. corrida” escribiendo en la pantalla táctil, seguido del botón OK.
- Se utilizó el método de secado a “Standard” seleccionado la función “Drying program”.

- Se llevo el análisis a la temperatura a 110 °C seleccionado la función “Drying temperature”.
- Se presionó la opción “Switch-off criterion” y luego la opción A60.
- Al terminar de introducir las especificaciones del nuevo método, se presionó “Save” para guardar el método.
- Habiendo terminado el análisis de humedad, se anotó la media (Mean X), desviación estándar (Standard deviation) y tiempo de análisis (elapsed time).
- Se repitió el procedimiento anterior hasta obtener cinco corridas de las muestras de ceniza.
- Al terminar las pruebas, se introdujo las cenizas a un recipiente cerrado.

2. Análisis físicos

a. Granulometría

Para la determinación de la granulometría se llevó a cabo la siguiente metodología:

- Se llevó a cabo una limpieza de todos los tamices en el *Cuadro 10*, utilizando una manguera de aire comprimido, en posición inclinada manteniendo una distancia de 20 cm aproximadamente entre el tamiz y la manguera.
- Se taró todos los tamices incluyendo el plato de finos en la balanza.
- Se colocó los tamices en orden decreciente, de mayor tamaño de partícula a menor, de arriba hacia abajo.
- Se pesó en un recipiente 1000 g de muestra en un recipiente.
- Se colocó la muestra en el tamiz superior y posteriormente la tapa de este.
- Se trasladó el grupo de tamices, deteniéndolos con una mano abajo y otra arriba y colocarlos en el tamizador RO-TAP.
- Se estableció el tiempo de tamizado en el RO-TAP a 15 min.
- Una vez pasados los 15 min, remover la serie de tamices cuidadosamente del tamizador y pesar todos los tamices individualmente, incluyendo el de plato de finos. Recordar remover la tapa del plato superior.
- Se anotaron los pesos correspondientes a la masa retenida en cada tamiz y en el plato de finos.

- Al finalizar, se limpió cada tamiz con aire comprimido después de cada corrida como se indica en a).
- Se realizó el procedimiento anterior hasta obtener 4 mediciones.

Cuadro 10. Tamices utilizados para la prueba de granulometría

No. Tamiz	Abertura (um)
20	850
30	600
45	355
60	250
80	180
100	150

b. Densidad de bulto

La determinación de la densidad de bulto se llevó a cabo como se indica a continuación:

- Se trasladó de la balanza industrial, la cubeta y la placa de vidrio cerca de un grifo de agua.
- Se encendió de la balanza industrial, verificando que la unidad de medición fuera “kg”.
- Se seleccionó el botón para hacer la tara del recipiente.
- Se taró la cubeta junto con la placa de vidrio en la balanza industrial, anotando el dato.
- Se colocó la cubeta con agua en la balanza ya encendida, procurando no derramar agua.
- Con la probeta de 1L, se agregó agua hasta que llegará a los bordes de la cubeta.
- Se colocó la placa de vidrio sobre la boca de la cubeta, asegurando que el agua tocará la superficie del vidrio. Si el agua no alcanzaba a tocar el vidrio, se utilizó la probeta de 1 L para agregar agua hasta que el agua tocará el vidrio.
- Se anotó el peso de la cubeta con agua y la placa de vidrio.
- Se removió la placa de vidrio y se tomó la temperatura del agua con el termómetro.
- Al finalizar, se vació el agua de la cubeta en el drenaje, secándola posteriormente.

- Se colocó la cubeta encima de la balanza industrial encendida y se agregó ceniza con la ayuda de un plato plástico hasta aproximadamente $\frac{1}{3}$ de la capacidad de la cubeta alcanzando el volumen uniformemente.
- Se agregó ceniza hasta $\frac{2}{3}$ de la capacidad de la cubeta y se volvió a nivelar la ceniza, hasta que la superficie fuera uniforme.
- Se agregó ceniza hasta que alcanzara el borde de la cubeta.
- Se anotó el peso indicado la balanza.
- Se repitió el procedimiento anterior hasta obtener 5 mediciones.

c. Identificación de piezas metálicas y ferromagnetismo

La determinación del contenido de piezas metálicas se llevo a cabo como se indica a continuación:

- Se taró el recipiente y se anotó el dato.
- Se tomo una muestra de 500 g y se coloco en el recipiente.
- Se tomó el imán y se acercó a las piezas de mayor tamaño, aquellas que evidenciaron atracción fueron separadas en un recipiente.
- Las piezas metálicas magnéticas separadas fueron cuantificadas.
- Se anotó el peso indicado la balanza.
- Se repitió el procedimiento anterior hasta obtener 4 mediciones.

C. Comparación con la composición reportada de otras cenizas de acería de las fuentes bibliográficas consultadas.

- Se investigó información de referencia sobre la composición de cenizas de acería en cuatro artículos diferentes.
- Se incluyó la información encontrada en el Cuadro 15, junto con la composición de la ceniza analizada.

D. Costo de transporte

- Se estimó la cantidad de viajes de ida y vuelta mensuales a partir de la producción aproximada de cenizas de acería de 900 toneladas mensuales.
- Se usó el costo por viaje de ida y vuelta determinado por Corado, 2021 donde el punto de recepción de las cenizas es la planta San Miguel (CEMPRO), partiendo de la planta de la acería en Masagua, Escuintla.
- Se calculó el costo mensual de transporte.

E. Aspectos ambientales en el manejo de las cenizas de acería

Se investigó y se propuso aspectos e impactos ambientales de las cenizas de acería delimitando el alcance, desde su recolección en filtros hasta transporte. Estos se presentan en la sección de resultados, *Cuadro 18*.

F. Otras aplicaciones de las cenizas de acería

Se investigó y se propuso una serie de posibles alternativas para el manejo, tratamiento y uso de las cenizas de acería, junto con observaciones de consideraciones técnicas. Este se encuentra en la sección de resultados, en el *Cuadro 19*.

VII. RESULTADOS

Cuadro 11. Características físicas de ceniza de acería.

Propiedad	Descripción
Descripción física de las cenizas de acería	Polvo grisáceo con presencia de piezas metálicas.
Descripción de las piezas metálicas identificadas	Partículas de forma irregular de color negro y gris.
Ferromagnetismo	Positiva. Presencia de material ferroso alta.
Humedad media (MC, %)	0.71 ± 0.100
Densidad media (kg/m ³)	924.98 ± 34.79
Porcentaje de piezas metálicas medio (% m/m)	50 ± 4
Granulometría	80 % retenido en tamiz No.20
Módulo de finura	2.66

Nota 4 Ver anexos, Figura 7

Nota 5 Ver anexos, Figura 10

Nota 6 Ver anexos, Figura 8

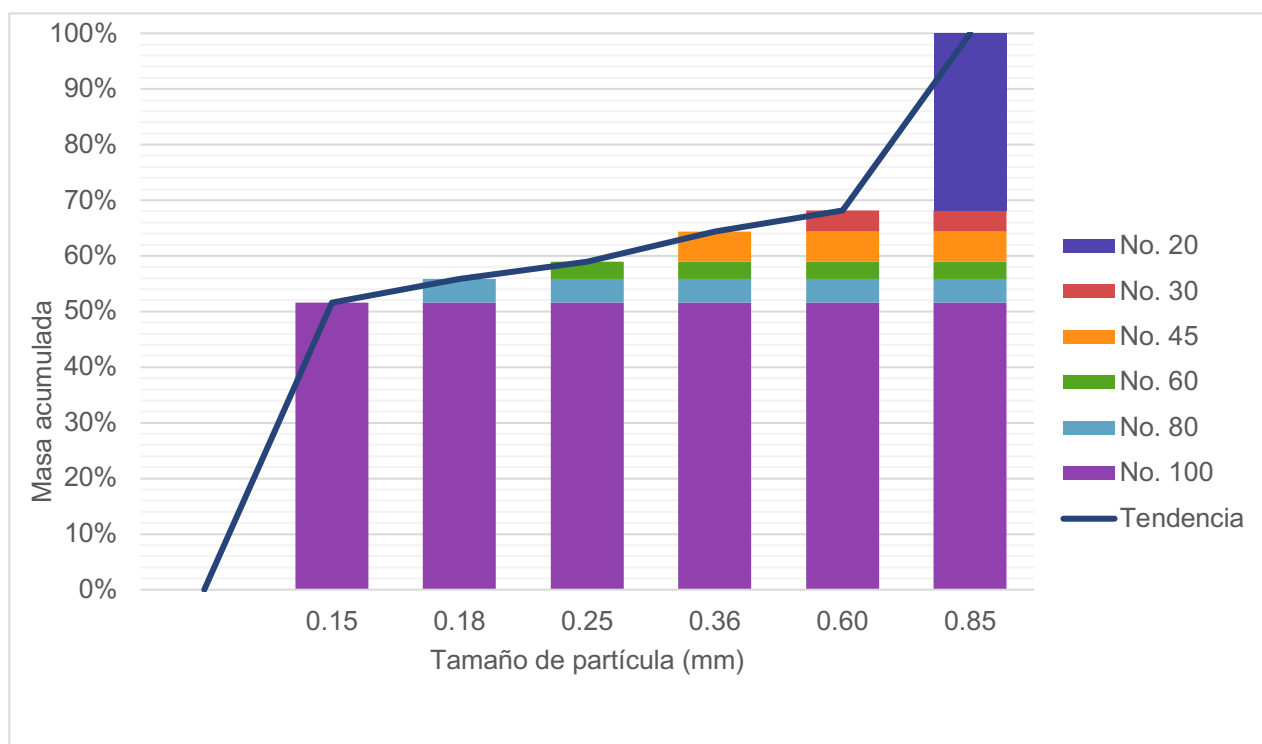
Nota 7 Para la determinación de humedad ver anexos Cuadro 28. Se analizó 5 muestras el 17 de septiembre del 2020, a una temperatura de secado de 105 °C por un tiempo promedio de 277 segundos.

Nota 8 Ver Cuadro 29

Nota 9 Ver en resultados *Figura 5*

Nota 10 El módulo de finura fue determinado en CETEC. Ver Figura 35

Figura 5. Análisis granulométrico de ceniza de acería.



Cuadro 12. Análisis granulométrico realizado por CETEC.

Tamaño nominal		Masa retenida (g)	% Pasa
19.0 mm	3/4 "	0.0	100%
12.5 mm	1/2 "	33.8	89%
9.5 mm	3/8 "	7.0	87%
4.75 mm	No. 4	36.4	75%
2.36 mm	No. 8	26.8	55%
1.18 mm	No. 16	19.5	60%
0.60 mm	No. 30	16.9	54%
0.30 mm	No. 50	15.1	49%
0.15 mm	No. 100	14.3	44%
0.075 mm	No.200	19.1	38%

Nota 11 Estos datos fueron obtenidos con un tamaño de muestra de 305 g en el Centro de Investigación y Desarrollo (CETEC).

Cuadro 13. Rango de composición química, pérdida al fuego (LOI) y residuos insolubles (RI) de las cenizas por el método de Fluorescencia de rayos X (XRF) expresada en porcentaje m/m.

Componente	Composición química (% m/m)	
	Límite inferior	Límite superior
Al ₂ O ₃	3.59	4.39
CaO	49.72	51.01
Cr ₂ O ₃	0.03	0.42
Fe ₂ O ₃	11.57	13.32
K ₂ O	0.05	0.06
MgO	5.39	6.72
MnO	0.76	1.95
Na ₂ O	0.05	0.26
P ₂ O ₅	0.14	0.19
SO ₃	0.37	0.39
SiO ₂	13.04	15.07
TiO ₂	0.25	0.33
LOI (950 °C)	8.55	9.56
RI (%)	7.88	11.8

Nota 12 Para la determinación de la composición química se presenta un rango obtenido de dos corridas, ver anexo, Figura 31 y Figura 37. Los valores reportados corresponden a una perla preparada, leída por triplicado en el equipo anteriormente enunciado dentro de una curva de "óxidos generales".

Nota 13 Para la determinación de la pérdida de fuego se presenta un rango obtenido de dos corridas, ver anexo Figura 32 y Figura 36.

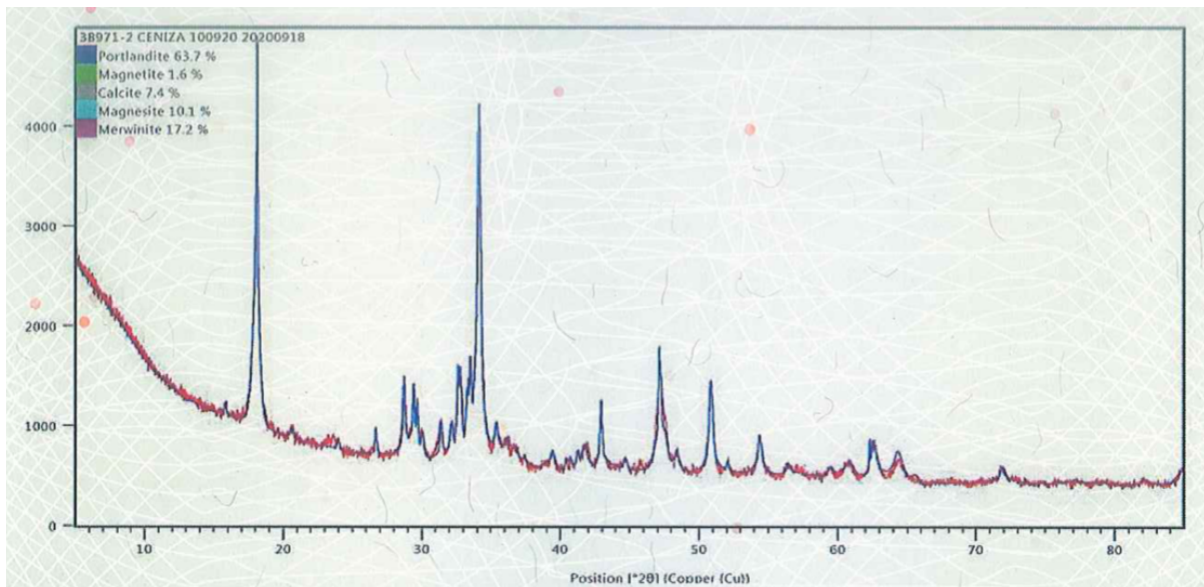
Nota 14 La determinación del rango de residuos insolubles se hizo con dos réplicas, ver anexo *Figura 33* y *Figura 36*. Se evaluó una el 23 de septiembre del 2020 y otra el 28 de enero del 2021.

Cuadro 14. Rango de la concentración de las fases minerales de las cenizas de acería por el método de difracción de rayos X expresadas porcentaje m/m.

Fase mineral	Fórmula	Concentración (% m/m)	
		Límite inferior	Límite superior
Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	61.40%	63.70%
Magnetita	Fe_3O_4	1.60%	1.60%
Calcita	CaCO_3	7.40%	28.10%
Magnesita	MgCO_3	3.70%	10.10%
Merwinita	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$	6.70%	17.20%
Oliviana	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$	0.10%	0.10%

Nota 15 Para la determinación de las fases minerales se presenta un rango obtenido de dos corridas, ver anexo, Figura 30 y Figura 34. Se utilizó el equipo Panalytical Empirean series 2, tubo de cobre y detector PIXcel3D. con afinamiento Rietveld, la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante un barrido del goniómetro del equipo comprendido entre los ángulos de $5^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$, con una duración de 4 minutos por barrido.

Figura 6. Difractograma de ceniza de acería



Cuadro 15. Contenido de metales pesados expresados en mg/kg.

Parámetro	Cantidad (mg/kg)
Ag	< 0.1
Al	12600
As	ND
Ba	671
Be	ND
Cd	33
Co	< 0.1
Cr	1343
Cu	122
Fe	61575
Mn	10098
Mo	ND
Ni	ND
Pb	276
Sb	32
Se	ND
Sn	27
Te	ND
Ti	ND
V	101
W	ND
Zn	4830
B	310
As	ND
Hg	0.03

Nota 16.ND = No detectado.

Nota 17.Realizado en PROVERDE a solicitud de CEMPRO, ver Figura 38.

Cuadro 16. Comparación de otras cenizas de acería con la literatura en porcentaje masa/masa (% m/m).

Compuesto	Fuentes					Propia	
	Grillo, <i>et;al</i> (2014)	Karayannis (2016)	Arnold, Vargas y Bianchini (2017)	Pelino, Karamanov, Piscicella, Crisucci, Zonetti (2002)	Pelino, Karamanov, Piscicella, Crisucci, Zonetti (2002)	Límite inferior	Límite superior
Al ₂ O ₃	1.5	0.7	0.35	1.48	0.65	3.59	4.39
CaO	5.7	7.7	1.83	20.69	7.5	49.72	51.01
Cr ₂ O ₃	0.27	N/A	0.74	15.85	1.12	0.03	0.42
Fe ₂ O ₃	44.88	N/A	43.45	24.28	52.82	11.57	13.32
K ₂ O	1.34	2.1	1.23	1.76	1.01	0.05	0.06
MgO	1.84	2.2	0.56	9.6	5.21	5.39	6.72
MnO	2.12	3.2	1.96	5.05	5.33	0.76	1.95
Na ₂ O	2.25	5.1	N/A	6.62	0.91	0.05	0.26
P ₂ O ₅	N/A	N/A	0.26	N/A	N/A	0.14	0.19
SO ₃	1.45	1.4	1.06	N/A	N/A	0.37	0.39
SiO ₂	6.57	3.7	3.71	4.4	5.94	13.04	15.07
TiO ₂	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.25	0.33
FeO	5.62	37.7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Fe0	0.4	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PbO	1.04	12	1.48	0.49	0.48	N/A	N/A
ZnO	10.83	22	31.89	7.57	13.8	N/A	N/A
Cl-	2.93	1.3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
CuO	N/A	N/A	0.3	0.41	0.18	N/A	N/A
NiO	N/A	N/A	0.05	1.8	0.08	N/A	N/A
Otros	2.1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
LOI (950 °C)	9.12	N/A	N/A	N/A	N/A	8.55	9.56

Nota 18. Se utiliza un código de colores donde el rojo representa valores mayores a los reportados, amarillo para los menores y verde para los que se encuentran dentro del rango reportado de datos.

Concentración de solución alcalina y prueba de compresión de geopolímeros

Se consultó con investigadores del CETEC sobre la posibilidad de activación alcalina de las cenizas. No fue posible obtener el geopolímero debido a la presencia de piezas metálicas (50 ± 4 %) que son excesivamente abrasivas para los molinos, pues toda la ceniza debe llevarse hasta el 85 % pasante del tamiz No. 200. Además del alto contenido de óxido de calcio y costo de transporte elevado.

Cuadro 17. Costo de transporte de las cenizas de acería para una producción mensual de 900 toneladas.

Costo total de un viaje ida y vuelta	GTQ 1,477.77
Viajes mensuales	45
Costo mensual	GTQ 66,499.65

Nota 19. Ver Cuadro 36

Cuadro 18. Aspectos e impactos ambientales del manejo de cenizas de acería.

Actividad	Aspecto ambiental	Impacto ambiental
Recolección de las cenizas de acería	Emisión de material particulado	Contaminación atmosférica
	Ruido	Contaminación auditiva
Almacenamiento temporal y final	Lixiviación de metales pesados	Contaminación del suelo
		Contaminación de aguas subterráneas
	Emisión de material particulado	Contaminación atmosférica
Separación magnética	Ruido	Contaminación auditiva
Trituración	Ruido	Contaminación auditiva
	Emisión de material particulado	Contaminación atmosférica
Transporte	Emisión de material particulado	Contaminación atmosférica
	Emisión de CO ₂	Contaminación atmosférica

Cuadro 19. Posibles alternativas al tratamiento y uso de las cenizas de acería.

Propuesta de manejo	Descripción	Observaciones
Estabilización de metales pesados	Adición de reactivos que mejoran el manejo y las características físicas del residuo.	Implica una serie de reacciones físicas y químicas complejas, que incluyen oxidación / reducción, insolubilización de metales, polimerización de silicatos, enlace puzolánico y solidificación.
Vertedero industrial	Un relleno diseñado para disposición final de material particulado.	Debe contar con un sistema de evacuación de lixiviados. Se debe instalar una planta de tratamiento para estos lixiviados y agua de lavado de los polvos.
Arena o agregado fino	Acondicionamiento de los polvos para su uso como agregado fino en concreto asfáltico.	Esta debe cumplir con la norma ASTM C33. Adicionalmente se requieren procesos de reducción de tamaño, estabilización y/o inmovilización de metales pesados y análisis de lixiviados.

VIII. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El trabajo de graduación tuvo como objetivo la caracterización de las cenizas de acería para determinar la factibilidad técnica de la obtención de geopolímeros para cubos estandarizados de mortero. Se aplicó una metodología experimental en donde se caracterizó las cenizas usando técnicas fisicoquímicas y los valores fueron comparados con los reportados en estudios consultados, así como también se determinó el costo de transporte, aspectos e impactos ambientales.

En el *Cuadro 11*, la apariencia física de las cenizas de acería según la literatura consultada suele ser rojiza o café, debido al contenido de hierro, sin embargo, en este caso la muestra analizada de cenizas presentó un color grisáceo y con un alto contenido de piezas metálicas magnéticas, con un valor de 50 ± 4 % m/m de piezas metálicas en la muestra. El color grisáceo puede ser un indicio de un alto contenido de cal. Se calculó una densidad aparente de 924.98 ± 34.79 kg/m³, relacionándolo con el porcentaje de pizas metálicas, una parte de la densidad se atribuye a ellas. La humedad en base húmeda fue de 0.71 ± 0.100 %, cumpliendo con los parámetros establecidos en la norma ASTM C 618 de todos los tipos de cenizas. Asimismo, este es un parámetro que durante la formación de pasta o mortero no sería significativo, pues en el balance de agua en el diseño de mezcla, el agua requerida para la preparación de la solución sería mucho mayor. Comparando la densidad aparente y humedad encontrada con el rango identificado por la literatura entre 560 a 1560 kg/m³ y 0.1 a 0.6 % respectivamente, se encuentra dentro de los valores esperados.

El análisis granulométrico que se reporta en el *Cuadro 11* y Figura 5 determinó que el 80 % es retenido por el tamiz No. 20, donde más del 50 % de la masa es acumulada en el tamiz No. 100. En el análisis realizado por CETEC, reportado en el Cuadro 12, se determinó la granulometría en una serie de tamices distintos, llegando hasta el tamiz No. 200, del cual se dice que el 80 % se encuentra en de 3/8 “. En ambos análisis granulométricos, las cenizas de acería no cumplen con el parámetro de finura, ya que el 80 % debió ser retenido en el tamiz No. 325 (45 μ m) de acuerdo con la norma ASTM C 618. Este es un parámetro permitió confirmar la necesidad de llevar a cabo una trituration, pues el 85 % debe ser retenido por el tamiz No. 325 para mejorar su reactividad y desempeño.

La muestra analizada de cenizas no se pudo moler debido al alto contenido de piezas metálicas las cuales, consultando con los investigadores de CEMPRO, no es posible llevar a cabo la reducción de tamaño pues estas dañan los molinos y los metales de menor tamaño pueden llegar a dañar los tamices muy finos. El módulo de finura determinado fue de 2.66, categorizándose como un agregado fino, una arena de tipo media (Cuadro 9).

La composición del EAFD depende de la calidad de la chatarra utilizada como materia prima, el tipo de acero producido y de las condiciones de operación del horno. Los resultados obtenidos por fluorescencia de rayos X sobre la composición de las cenizas de acería, realizados en CETEC, son reportados en el *Cuadro 13*. Se determinó un contenido de CaO (cal viva) entre 49.72 % y 51.02 % m/m, seguido por el Fe₂O₃ y silicio SiO₂ con valores entre 11.57 % a 13.32% m/m y 13.04 % y 15.07 % m/m respectivamente. El contenido Al₂O₃ es entre 3.59 % a 4.39 % m/m. El contenido del resto de óxidos se presenta en fracciones inferiores al 10 % m/m. En comparación con otros polvos y cenizas de acería (Cuadro 15), el contenido de óxido de calcio es mayor en un 30 % o más, el óxido de hierro es inferior por 10 % o más, el contenido óxido de silicio y aluminio es aproximadamente el doble. Algunos de estos polvos presentan un contenido promedio de zinc aproximadamente del 10 % o mayor, compuesto que no fue identificado en la muestra analizada.

El alto contenido de óxido de calcio se debe a que los hornos de arco eléctrico de Guatemala utilizan cal hidratada (Portlandita) como fundente y posteriormente se recupera de los humos. La presencia de óxido de aluminio, silicio y hierro es deseada para la formación de los geopolímeros, siendo el mínimo en conjunto, de 50 % m/m para obtener una resistencia a la compresión que cumpla con los parámetros establecidos para morteros, según la norma ASTM C 109. En el caso de la ceniza de acería, estos en conjunto presentan un valor entre 29.95 % y 31.03 % m/m, enfatizando la necesidad de mejorar el contenido de óxido de silicio usando una cantidad soluble de silicato de sodio en la solución activadora y así propiciar la formación del geopolímero.

De igual forma, la presencia de óxido de calcio y de óxido de magnesio se atribuye al proceso de desulfuración en la etapa final de la producción de acero, la cual se realiza con estos componentes debido a su basicidad. Con respecto a los otros componentes, el contenido de óxido de azufre se encuentra entre 0.37 % y 0.39 % m/m, cumpliendo con los requerimientos de las tres clases establecidas en la norma. A pesar de esto, considerando que se producen 900 toneladas mensuales de ceniza y por ende 3.42 toneladas mensuales de SO_3 son emitidas al ambiente. Esto es peligroso para el ambiente y ser humano, por lo que se requiere un sistema de captación y monitoreo de este, pues es principal responsable de la lluvia ácida.

La determinación de pérdida de fuego fue a una temperatura de 950 °C. Este proceso se lleva a cabo por dos reacciones. Durante la primera, la materia orgánica se oxida para formar dióxido de carbono (CO_2) entre los 500 – 550 °C; mientras que la segunda, se forman carbonatos. Se delimitó el LOI entre 8.55 % y 9.56 m/m con dos análisis realizados en CETEC bajo la norma ISO 29581-2:2010. Este es un valor relevante para la evaluación del potencial geopolimérico de un material, pues estudios han demostrado que el carbón no quemado absorbe la solución activadora, generando una menor resistencia a la compresión, y para contrarrestar este efecto se requiere una mayor cantidad de la solución, incrementando los costos. Con respecto a la norma, para parámetro, se cumple con lo requerido para una ceniza del tipo N, con un máximo del 10 % m/m. En el caso de los residuos insolubles, se obtuvo un rango de 7.88 % a 11.8 % m/m, lo cual es un valor aceptable, pues indica un bajo contenido de impurezas en las cenizas, principalmente en la forma de arcillas. Se desea que este sea lo más bajo posible, debido a que las arcillas tienden a absorber fácilmente la humedad, pudiendo llegar a afectar las propiedades de trabajabilidad de los morteros.

Con el análisis de DRX se identificó las fases minerales que se presentan debido al alto contenido de calcio, determinado por FRX. Estas fases son portlandita (cal hidratada) y en menor proporción, en forma de merwinita y calcita, con valores entre 61.59 % a 64 % m/m, 6.70 % a 17.20 % m/m y 7.40 % a 28.10 % m/m respectivamente. La portlandita es un mineral cristalino, con un pH característico básico. El alto contenido de portlandita impone limitaciones como una elevada solubilidad en agua y la posibilidad de reaccionar con sulfatos y dar lugar a procesos de expansión y ruptura. La calcita es la principal materia prima para la obtención de cal, y actúa como agente fundente en el proceso del acero, así como cal resultante que no fue hidratada.

La merwinita es el resultado de la interacción entre los óxidos de calcio, magnesio y silicio. Este mineral contiene los silicatos disponibles en las cenizas. La magnetita es un mineral de cristalino presente en cantidades muy pequeñas, siendo identificado en uno de los dos ensayos de DRX realizados, de 1.60 % m/m. Al ser una de las materias primas más importantes en la fabricación de hierro y, por ende del acero, es de esperarse que se encuentre en bajas cantidades. Lo anterior debido a que se espera que la mayor parte sea aprovechada por el proceso de producción de acero y no de polvos. Con respecto a la magnesita, esta se encuentra entre 3.70 % y 10.10 % m/m. Ladrillos de magnesita son utilizados en la línea de escoria y como ladrillo refractario por Aceros de Guatemala (AG). La formación de la magnetita y calcita también puede atribuirse al proceso de enfriamiento de EAFD. Los óxidos de calcio y magnesio absorben la humedad del aire, lo cual produce hidróxidos de calcio y magnesio que, a su vez, absorben dióxido de carbono, que conduce a la formación de carbonatos de calcio y magnesio. En la Figura 6, analizando el comportamiento de la muestra en el análisis de determinación de fases minerales, el ruido, junto con el ensanchamiento de los picos, son resultados de la presencia de fases amorfas en conjunto con las fases cristalinas. Las fases amorfas, son características de los polvos de acería.

En el valor correspondiente a la cantidad de residuos insolubles podría estarse cuantificando zinc y metales pesados (plomo (Pb), cadmio (Cd) y cromo (Cr)), que según la literatura estos suelen encontrarse en los EAFD. El análisis de metales pesados (Cuadro 15) identificó cantidades significativas de cromo con un valor de 1343 mg/kg y zinc de 4830 mg/kg, así como de plomo, bario, vanadio y boro con valores de 276 mg/kg, 671 mg/kg 101 mg/kg y 318 mg/kg, respectivamente. En menor proporción se encuentra el cadmio, con un valor de 33 mg/kg.

Debido al alto contenido de cromo y la presencia del resto de metales pesados mencionados, para cualquier aplicación relacionada con materiales de construcción, como balastro o para estabilizar suelos, (de acuerdo con los investigadores de CEMPRO), debe llevarse a cabo el ensayo de lixiviación, para determinar que no haya presencia de estos metales en los posibles lixiviados. Actualmente, estos metales no son tratados adecuadamente en las cenizas, y por lo tanto, tienen un impacto sobre el ambiente y el suelo. A continuación, se discuten las posibles fuentes de los minerales identificados: el zinc proviene de la chatarra de hierro galvanizado, el plomo de la pintura presente en la chatarra, mientras que el manganeso, cromo, silicio, níquel y estaño están presentes en las aleaciones de acero. El aluminio puede provenir del acero galvanizado y de la contaminación ambiental con la arcilla que pueda encontrarse en los suelos.

Evaluando el método experimental, durante el ensayo de ferromagnetismo, se observó que no solamente las partículas grandes, sino también una porción de polvos se adhería al imán, dificultando la cuantificación de las piezas metálicas magnéticas presentes. Esto también genera un error en el porcentaje de piezas metálicas presentes e indica que una separación magnética adecuada no es posible. Sería riesgosa la separación por tamizaje ya que se perdería el material útil. La determinación de las fases minerales se realizó por DRX, el cual es un método adecuado para fases cristalinas, siendo necesario otro análisis para la determinación exacta de las fases amorfas.

El costo de un viaje de ida y vuelta desde la planta en Masagua hacia la planta de CEMPOR San Miguel, Sanarate, El Progreso de CEMPRO determinado por Corado (2021), se utilizó para estimar los costos mensuales asociados al transporte de las cenizas a partir de la producción mensual, este es de Q. 66, 499.65 (Cuadro 17). Este es un costo que no es conveniente asumir para CEMPRO, pues resulta más costoso transportar las cenizas hacia su planta que transportar la materia prima necesaria desde las canteras propias. Adicionalmente, para la activación alcalina se requiere hidróxido de sodio y silicato de sodio como reactivos, donde el costo para preparar una tonelada de concreto geopolimérico, conteniendo aproximadamente 25 kg de ceniza o polvos de acería, es de Q. 271.68 (Cuadro 37). Es un costo que CEMPRO no está dispuesto a asumir.

Con respecto a la viabilidad de la obtención de geopolímeros a partir de las cenizas de acería, con análisis de la caracterización fisicoquímica se determinó que no presenta las propiedades químicas y físicas para ser activada en forma alcalina. Esto debido al bajo contenido de aluminosilicatos pues se requiere como mínimo un 50% de estos para obtener un alto grado de polimerización que de lugar a las características cementantes deseadas; alto contenido de piezas metálicas que no pueden ser molidas con los molinos disponibles en CEMPRO pues en ensayos anteriores, estas han dañado a los molinos, a una granulometría superior al tamiz No. 200 y costos de transporte y reactivos asociados. Adicionalmente, de los parámetros caracterizados establecidos en la norma ASTM C 618, la ceniza cumple con todos los requerimientos químicos de la clase N (Cuadro 5). En el caso de los requerimientos físicos, se realizó el análisis de densidad aparente, granulometría con adaptaciones a la norma. Debido a que no se realizó el resto del análisis en la norma de solidez, índice de actividad de fuerza y expansión en autoclave, no se establece un tipo de ceniza de acuerdo con sus características físicas. Es importante mencionar que, de haberse obtenido el geopolímero, la literatura ha establecido que la adición de cenizas como sustituyente parcial del cemento, afecta directamente el tiempo de fraguado y endurecimiento. Este aumenta en comparación con una mezcla convencional.

Debido al relativamente alto contenido de metales pesados y su clasificación como residuos industriales peligrosos, el polvo de los hornos de arco eléctrico no se puede eliminar, a menos que exista un vertedero que cumpla con todas las medidas técnicas y ambientales adecuadas. Evaluando aspectos ambientales asociados al manejo de ceniza de acería en el Cuadro 18, se observa que, una vez generados, estos son enfriados y recolectados. Durante este proceso se tiene contaminación auditiva por el ruido generado y contaminación atmosférica, debido a la emisión de este material particulado. Esta emisión de material particulado se presenta durante todo el manejo, incluyendo el almacenamiento, molienda y transporte. El almacenamiento actual se hace un terreno en el que se colca los polvos recolectados, sin tratamiento de estabilización o inmovilización de metales pesados. Esto da lugar a la lixiviación, que puede llegar a afectar los mantos freáticos y las propiedades del suelo. Se consideró la molienda, separación y transporte para evaluar los aspectos relacionados pues son operaciones que resultan necesarias, si no se maneja este polvo en planta.

Como se ha mencionado, en la industria siderúrgica se tiene la problemática de la producción de polvos o cenizas de acería, residuos que actualmente no reciben un tratamiento y disposición con los controles adecuados, que eviten efectos sobre el ambiente. Al identificar los componentes que presentan mayor riesgo, se investigó y se propone una serie de posibles alternativas para el manejo de estos en el *Cuadro 19*. La primera propuesta podría ser el aplicada a corto plazo, para mejorar el manejo y poder evaluar otras alternativas de su uso a largo plazo. Esta consiste en la estabilización de los metales pesados, sin embargo, tiene la complejidad técnica de llevar a cabo los estudios pertinentes para determinar los mecanismos necesarios para la estabilización e inmovilización de estos. En esta se incluye la inmovilización por uso como aditivo en concreto asfáltico, sin embargo, el material deberá pasar por un proceso de reducción de tamaño, el cual bajo las condiciones actuales no es posible de realizar.

Otra propuesta que podría ser puesta en práctica en conjunto con la anterior, es el diseño de un vertedero industrial, que cuente con un sistema de evacuación de lixiviados y que impida el arrastre del material particulado. Todas las alternativas requieren una inversión y costos inherentes. En el caso del vertedero industrial, se requiere de la instalación de una planta de tratamiento de lixiviados. Finalmente, se propone utilizarlo como arena o agregado fino para concreto, sin embargo, se debe mejorar la granulometría del material, ya que debe cumplir con lo establecido en el *Cuadro 27*. Adicionalmente, se debe realizar una prueba de lixiviación para verificar que no imponga un riesgo según la aplicación.

El objetivo planteado de caracterizar las cenizas o polvos de acería conforme a la norma ASTM C618, fue alcanzado al determinar que esta cumple con todos los parámetros de tipo N. De igual forma, se analizó las propiedades físicas, determinándose que una operación de reducción de tamaño no es posible debido a que la operación resulta dañina para los molinos, así como incremento en el consumo de energía y de operación mayor. La producción de geopolímeros, se determinó que no es posible bajo las propiedades y condiciones actuales de los polvos. Adicionalmente, se evaluó aspectos e impactos ambientales, así como posibles alternativas, las cuales deben ser estudiadas para determinar la factibilidad técnica, económica y ambiental de las cenizas con las características fisicoquímicas evaluadas en este estudio.

IX. CONCLUSIONES

1. Los polvos de acería fueron caracterizados químicamente por fluorescencia y difracción de rayos X, determinando que los compuestos principales son óxidos de calcio, silicio y hierro, con los rangos 49.72 % a 51.01 % m/m, 13.04 % a 15.07 % m/m y 11.57 % a 13.32 % m/m respectivamente. Las fases minerales cristalinas principales son portlandita, calcita y merwinta, con los rangos de 61.40 % a 63.70 % m/m, 7.40 % a 28.10 % m/m y 6.70 % a 17.20 % m/m respectivamente. El porcentaje de material no incinerada, pérdida al fuego (LOI) fue de 8.55 % a 9.56 m/m. Debido a todas las propiedades anteriores, los polvos analizados se caracterizan como ceniza tipo N.
2. El análisis de metales pesados identificó la presencia de cromo de 1343 mg/kg, zinc de 4830 mg/kg, plomo de 276 mg/kg y cadmio de 33 mg/kg, lo cual confirma la necesidad de realizar un análisis de lixiviados para los polvos, para así determinar las medidas adecuadas de tratamiento para la disposición correcta de este material y evitar riesgos ambientales.
3. La caracterización física de las cenizas analizadas determinó una granulometría de 85 % en el tamiz No. 20 con un módulo de finura de 2.66. La presencia de piezas metálicas magnéticas se confirmó con un valor de 50 ± 4 % m/m, la humedad y densidad promedio fueron de 0.71 ± 0.100 % y 924.98 ± 34.79 kg/m³, respectivamente.
4. De acuerdo con el análisis fisicoquímico, se determinó que, con las cenizas de acería evaluadas en este estudio, no es posible la producción de geopolímeros a partir de su activación alcalina debido al bajo contenido de aluminosilicatos y óxidos de hierro de 29.95 % y 31.03 % m/m y al alto contenido de piezas metálicas magnéticas de 50 ± 4 % m/m, cuya reducción de tamaño resulta dañina para los equipos de molienda.
5. El posible costo de asociado al transporte de las cenizas producidas mensualmente desde la planta de acería, desde Masagua, Escuintla hacia la planta San Miguel es de Q. 66,499.65, el cual no es atractivo asumir para la industria cementera del país, junto con el costo energético adicional de la operación de reducción de tamaño.

6. No se determinó el rango de concentración de la solución de hidróxido de sodio para la formación de geopolímero, debido a que el análisis de las propiedades fisicoquímicas determinó que no es técnica o económicamente viable producirlos.
7. No se realizó la caracterización del geopolímero desarrollado usando fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (XRD) para determinar el contenido de aluminosilicatos no fue posible debido a las dificultades identificadas para el uso de las cenizas de acería.
8. No se determinó el cambio en la resistencia mecánica del mortero estandarizado con la adición de diferentes proporciones de ceniza activada para la formación del geopolímero, siguiendo la Norma ASTM C-109, debido a que no fue posible realizar los morteros geopoliméricos con las características actuales de los polvos de acería.
9. Se investigó y se identificó que los impactos ambientales que causan contaminación atmosférica y de suelo, asociados con el manejo de las cenizas de acería, se deben a la emisión de material particulado y a la lixiviación de materiales peligrosos como el cromo y plomo.
10. Se propuso una serie de posibles alternativas para un mejor manejo de las cenizas de acería que deben ser evaluadas para determinar su factibilidad técnica, económica y ambiental.

X. RECOMENDACIONES

1. Evaluar el proceso de fusión y afino, así como los sistemas de recolección de polvos para identificar áreas de mejora que permitan reducir la generación de estos, disminuir su emisión al ambiente o mejorar su composición, haciendo una evaluación de la calidad de la chatarra, para disminuir la cantidad de residuo y el porcentaje de materiales ferrosos útiles.
2. Determinar las propiedades hidráulicas como la actividad puzolánica, absorción de agua, porosidad y permeabilidad para completar la caracterización fisicoquímica como agregado, así como evaluar aditivos para las mejoras de estas propiedades y posibilidad de solidificación para su disposición final y otras aplicaciones.
3. Diseñar un proceso adecuado de separación para piezas metálicas magnéticas, y de molienda del material fino de cenizas de acería para mejorar el porcentaje de partículas de tamaño pequeño de agregados finos y evaluar alternativa de uso como sustituto de arena.
4. Realizar un análisis de lixiviación para validar la presencia de materiales peligrosos emitidos al ambiente en los lixiviados y poder aplicar medidas de control y recuperación de los suelos, así como las técnicas de inmovilización de los materiales peligrosos.
5. Realizar un estudio del estado actual de los suelos y fuentes de agua próximas al terreno de disposición para determinar el impacto que ha tenido el residuo y tomar las medidas necesarias de control y recuperación.
6. Estudiar la viabilidad técnica, económica y ambiental de las alternativas propuestas para el manejo de los polvos de acería.
7. Investigar nuevas alternativas para manejo, uso y disposición final de cenizas de acería para reducir impacto ambiental y solucionar problemática del manejo de residuos de industria siderúrgica.

XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Antony, J. (2003). *Design of experiments for Engineers and Scientists*. Butterworth-Heinemann. 73 – 92. Extraído de: <https://web.b.ebscohost.com/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fMTA0Nzk2X19BTg2?sid=11a2f9a4-1278-479a-b471-aae98dc2dc9f@pdc-v-sessmgr06&vid=3&format=EB&rid=1>
2. Alvarado, C. (2013). *Análisis Multielemental de Fertilizantes (mezclas físicas) por Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total*. Guatemala. Extraído de: <https://biblioteca-farmacia.usac.edu.gt/Tesis/Q215.pdf>
3. Asociación de Productores de Cementos (ASOCEM).(2019). *Panorama mundial de la industria del cemento*. Extraído de: asocem.org.pe/archivo/files/Vision%20General%20de%20la%20Industria%20del%20Cemento%20y%20sus%20Principales%20Actores.pdf
4. Bezerra, A. França, S., Magalhães, L. Y Carvalho, M. (2019). *Alkaline activation of high-calcium ash and iron ore tailings and their recycling potential in building materials*. *Ambiente Construído*, Porto Alegre. 19(3). , p. 99-112. ISSN 1678-8621. Extraído de: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000300327>
5. Branca, T., Colla, V., Algermissen, D., Granbom, H., Martini, U. Morillon, A., Pietruck, R. y Rosendahl, S. (2020). *Reuse and Recycling of By-Products in the Steel Sector: Recent Achievements Paving the Way to Circular Economy and Industrial Symbiosis in Europe*. *Metals* 2020, 10 (345). doi:10.3390/met10030345
6. Buzin, P., Walburga, Heck., Vilela, C. y Faria, A. (2016). *EAF dust: An overview on the influences of physical, chemical and mineral features in its recycling and waste incorporation routes*. *Journal of Materials Research and Technology*. doi:10.1016/j.jmrt.2016.10.002
7. Campo, M. (1970). *Aplicación de la fluorescencia de rayos X en el laboratorio central de ensayo de materiales de construcción*. *Materiales de Construcción*, 20(138-139). P. 61-67. Extraído de: <https://core.ac.uk/download/pdf/234614438.pdf>
8. Castillo, J. (2009). *Estadística: módulo 1*. Extraído de: <http://www.alejandrogonzalez.com.ar/archivos/librodecalidad-estadisticaaplicada.pdf>

9. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., y Ubolluk. (2009). *Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers*. Waste Management, 29 (2009). 539–543 doi:10.1016/j.wasman.2008.06.023
10. Chiquito, L. (2006). *Diseño de un sistema de extracción de humos y polvos secundarios para el proceso de producción de acero mediante horno de arco eléctrico*. Escuela superior politécnica del litoral. Ecuador. p. 4 – 20. Extraído de: <file:///Users/carmennpivaral/Downloads/CHIQUITO%20GUAMANQUISPE.pdf>
11. Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR). (2012). *Método de Ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado*. Guatemala.
12. Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR). (2013). *Método de ensayo. Determinación de la expansión en autoclave del cemento hidráulico*. Guatemala.
13. Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR). (2013). *Método de ensayo. Determinación de la densidad del cemento hidráulico*. Guatemala.
14. Cañas, J. (2007). *Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz No. 200 (75 μ M) en agregado mineral por lavado*. Universidad Centroamericana. El Salvador. Extraído de: <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/GRANULOMETRIA.pdf>
15. Delvasto, P., Ibañez, B. Y Sandoval, D. (2011). *Caracterización de polvos de acería eléctrica producidos en Venezuela y evaluación preliminar de su lixiviabilidad con ácidos orgánicos diluidos*. Dyna 78(169). pp. 221-229 ISSN 0012-7353. Extraído de: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v78n169/a26v78n169.pdf>
16. Diaz, E., Allouche, E., y Eklund, S. (2010). *Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers*. Fuel 89 (2010). 992–996. doi:10.1016/j.fuel.2009.09.012

17. Durand, A. (2017). *Influencia del Óxido De Calcio en la Trabajabilidad, Fraguado, Compresión, Densidad, Porosidad y Absorción del Concreto para Elementos Estructurales*, Trujillo. Perú. Extraído de: <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/12743/Durand%20Ciudad%2c%20Adriana%20Jes%3bas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
18. Dombrowski, K., Buchwald, A., & Weil, M. (2006). *The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers*. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3033–3043. doi:10.1007/s10853-006-0532-7 . Extraído de: https://scihub.do/https://www.researchgate.net/publication/225191432_The_Influence_of_Calcium_Content_on_the_Structure_and_Thermal_Performance_of_Fly_Ash_Based_Geopolymers
19. Flores, M., Pérez, A. y Garnica, P. (2008). *Análisis de especificaciones de valor de pulido para agregados. Secretaría de comunicaciones y transportes (SCT)*. ISSN 0188-7297. Extraído de: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt315.pdf>
20. Glazer, B., Graber, C., Roose, C., Syrett, P., y Youssef, C. (2011). *Fly Ash in Concrete*. Perkins + Will. 26 - 36.
21. Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D. y B. Rangan, V. (2004). *On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. *ACI Material Journal* 101-M52. 467 – 472.
22. Halstead, W. (1986). Use of fly ash in concrete. *Transportation Research Board*. Washington, D.C. Pág. 6 - 35. ISSN 0547-5570rr
23. Heiri, O., Lotter, A. y Lemcke, G. (2001). *Loss of ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results*. *Journal of Paleolimnology* 25(2001). P. 101 – 110. Extraído de: https://www.researchgate.net/publication/27702348_Loss_on_Ignition_as_a_Method_for_Estimating_Organic_and_Carbonate_Content_in_Sediments_Reproducibility_and_Comparability_of_Results
24. Ioana, A., Semenescu, A., Costoiu, M. y Marcu, D. (2017). *Elements of the electric arc furnace's environmental management. Recent Advances on Environment, Chemical Engineering and Materials*. Extraído de: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5018498>

25. Karayannis, V.G. (2016). *Development Of Extruded And Fired Bricks With Steel Industry Byproduct Towards Circular Economy*. *Journal of Building Engineering*, (), S2352710216301309–. doi:10.1016/j.jobbe.2016.08.003
26. Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C. y Tangpagasit, J. (2000). *Effect of insoluble residue on properties of Portland cement*. , 30(8), 1209–1214. doi:10.1016/s0008-8846(00)00315-x
27. Lagares, R. (2017). *Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de Magister en ingeniería Ambiental*. Universidad del Norte. Colombia. P. 44- 45
28. Lanzerstorfer, C. (2018). *Electric arc furnace filter dust: Influence of organic material on the bulk density and flowability*. *Particulate Science and Technology*. p1–5. doi:10.1080/02726351.2017.1405132
29. Lanzerstorfer, C. (2018). *Properties of steelmaking dusts from dry dust separations*. Metal, 2018. República Checa. Extraído de: <https://www.confer.cz/metal/2018/read/1003-properties-of-steelmaking-dusts-from-dry-dust-separators.pdf>
30. Leñero, J. (2010). *Desarrollo de un software para el diseño de plantas de quebrado y tamizado*. Universidad de Costa Rica. p. 18-21. Extraído de: <file:///Users/carmennpivaral/Downloads/31797.pdf>
31. López, Félix A.; López-Delgado, Aurora (2002). *Enhancement of Electric Arc Furnace Dust by Recycling to Electric Arc Furnace*. *Journal of Environmental Engineering*, 128(12), 1169–1174. doi:10.1061/(asce)0733-9372(2002)128:12(1169)
32. Lorca, P. (2014). *Efecto de la adición de hidróxido cálcico sobre mezclas con alta sustitución de cemento por ceniza volante*. Universidad Politécnica de Valencia. España. p. 35 – 50.
33. Lorenzo, M. (1993). *Influencia de dos tipos de cenizas volantes Españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de Cemento Portland Hidratado*. Universidad Complutense de Madrid. Extraído de: <https://eprints.ucm.es/2073/1/T18789.pdf>
34. Madias, J. (2009). *Reciclado de polvo de horno eléctrico*. Acero Latinoamericano. 38-47. Extraído de: https://www.researchgate.net/publication/261365779_Reciclado_de_polvo_de_horno_electrico

35. Madias, J. (2014). *Treatise on Process Metallurgy : Electric Furnace Steelmaking.* , (3), 271–300. doi:10.1016/B978-0-08-096988-6.00013-4 Extraído de: <https://sci-hub.ren/10.1016/B978-0-08-096988-6.00013-4>
36. Matino, I., Colla, V., Branca, T. y Romaniello, L. (2016). *Optimization of By-Products Reuse in the Steel Industry: Valorization of Secondary Resources with a Particular Attention on Their Pelletization. Waste and Biomass Valorization. Springer.* doi:10.1007/s12649-016-9768-x
37. Manning, T. y Grow, W. (1997). *Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry.* , 2(1), 1–19. doi:10.1007/s00897970103a. Extraído de: <https://sci-hub.ren/10.1007/s00897970103a>
38. Meléndez, C. y Camacho, A. (2009). *Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X. Aventuras del pensamiento.* P. 3 – 4. Extraído de: http://portal.uach.mx/extension_y_difusion/synthesis/2009/08/20/espectrometria_de_fluorescencia_de_rayos_X.pdf
39. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (miteco). (2019). *Hornos eléctricos de las acerías.* Extraído de: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040207-hornos-electr-acerias_tcm30-502317.pdf
40. Nordberg, G. (2000). *Metales: propiedades químicas y toxicidad.* Extraído de: <https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADtulo+63.+Metales+propiedades+qu%C3%ADmicas+y+toxicidad>
41. National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA). (2008). *Concrete CO2 Fact Sheet.* Extraído de: <http://www.nrmca.org/greenconcrete/concrete%20co2%20fact%20sheet%20june%202008.pdf>
42. Ochoa, R. (2017). *Caracterización mineralógica de material particulado en Hermosillo, Sonora, México, utilizando la técnica de difracción de rayos X.* P. 62-65. México. Extraído de: <http://repositorioinstitucional.uson.mx/bitstream/handle/unison/500/ochoacontrerasrobertom.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

43. Perry, R. (1997). *Perry's chemical engineers' handbook*. Mc Graw Hill. Séptima edición. Estados Unidos. p. 1630 – 1635. ISBN 0-07-049841-5
44. Rangan, V. (2008). *Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Curtin, University of technology. 4 – 20.
45. Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz-Lagos, M., y González, E. (2016). *Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria*. Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo, 16 (2), pp. 66-77
46. Ridzuan, A. , Khairulniza, A. y Arshad, M. (2014). *Effect of Sodium Silicate Types on the High Calcium Geopolymer Concrete*. Materials Science Forum, 803, 185–193. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.803.185 Extraído de: <https://sci-hub.ren/https://www.scientific.net/MSF.803.185>
sci-hub.se/10.1016/j.cemconres.2007.11.001
47. Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). (2005). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete: C618-05*. ASTM International. Estados Unidos.
48. Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). (2005). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete: C311-05*. ASTM International. Estados Unidos.
49. Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). (2007). *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement: C114-07*. ASTM International. Estados Unidos.
50. SomnA, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P y Chindaprasirt, P. (2011). *NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature*. Fuel 90 (2011) 2118–2124. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.01.018
51. Tejedor, J. (2019). *La necesidad de nuevos hormigones para una construcción más sostenible: Los Geopolímeros*. Universidad Politécnica de Valencia. P 30.
52. Ubolluk, R., y Chindaprasirt, P. (2009). *Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer*. Minerals Engineering 22, (2009) 1073–1078. doi:10.1016/j.mineng.2009.03.022.

53. Vargas, M. y Romero, L. (2006). *Tecnología de inmovilización de desechos peligrosos en Costa Rica. Tecnología en Marcha*, 19 (3). Extraído de: <file:///Users/carmennpivaral/Downloads/Dialnet-TecnologiaDeInmovilizacionDeDesechosPeligrososEnCo-4835818.pdf>
54. Van Jaarsveld, J., Van Deventer, J. y Lukey, G. (2002). *The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers*. *Materials Letters* 57 (2003). 1272–1280.
55. Villalta, S. (2011). *Estudio y análisis físico, químico, mecánico y petrográfico de agregados para concreto estructural de los bancos de la trituradora “morán”, obtenidos en el río Ostúa, y trituradora “el capullo”, obtenidos en el río Tamazulapa; ubicados en el municipio de Asunción Mita, Jutiapa*. Guatemala. p. 2 -4. Extraído de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3281_C.pdf
56. World Health Organization (Who). (2012). *Bulk density and tapped density of powders*. Extraído de: https://www.who.int/medicines/publications/pharmacopoeia/Bulk-tapped-densityQAS11_450FINAL_MODIFIEDMarch2012.pdf
57. Yip, C., Lukey, G., Provis, J., y van Deventer, J. (2008). *Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation. Cement and Concrete Research*, 38(4), 554–564. doi:10.1016/j.cemconres.2007.11.001 Extraído de:
58. Zhao, R., y Sanjayan, J. (2011). *Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. Magazine of Concrete Resear.* 63(3). 163 – 173.
59. Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G. y Tao, M. (2013). *Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. Construction and Building Materials*. 47 (2013). 1468–1478. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017>

XII. ANEXOS

A. Anexo 1: apariencia de las cenizas de acería

Figura 7. Apariencia de las cenizas de acería.



Figura 8. Piezas metálicas atraídas por magnetismo.



Figura 9. Piezas magnéticas sin lavar.



Figura 10. Piezas magnéticas después de lavado.



B. Anexo 2: datos de equipos

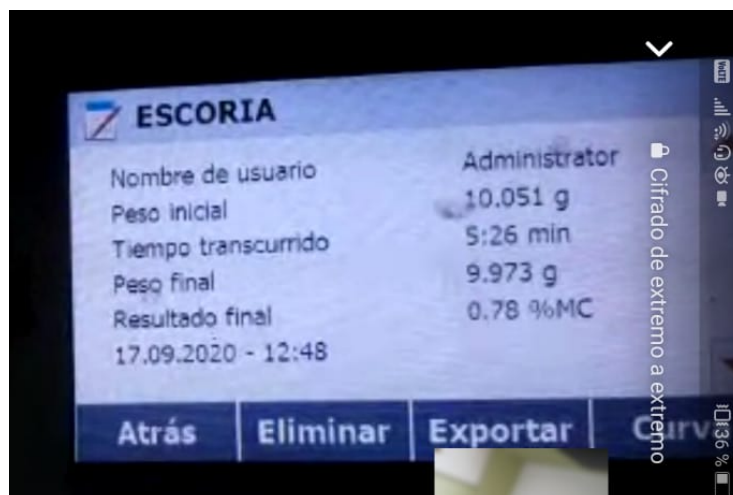
1. Analizador de humedad

- Marca: Ohaus
- Modelo: MB 120
- Rango de humedad: 0.01% - 100%
- Rango de temperatura: 40 °C - 230°C
- Reproducibilidad (Desviación estándar, g): 0.05 % (muestra de 3 g); 0.015 % (muestra de 10 g)

Figura 11. Analizador de humedad Ohaus



Figura 12. Análisis de humedad realizados a distancia



2. RO-TAP
 - Marca: Ws Tyler

3. Balanza de tamizado
 - Marca: Mettler Toledo
 - Modelo: IND 231

Figura 13. Tamizador RO-TAP y balanza de tamizado



4. Balanza industrial
 - Marca: Ohaus
 - Modelo: 3000 series

Figura 14. Balanza industrial



5. Sistema de medición de la densidad de bulto

Figura 15. Sistema de medición de densidad de bulto



6. Balanza para ensayo de piezas metálicas

- Marca: NORDIKA

Figura 16. Sistema para la determinación de piezas metálicas.



C. Anexo 3: datos originales

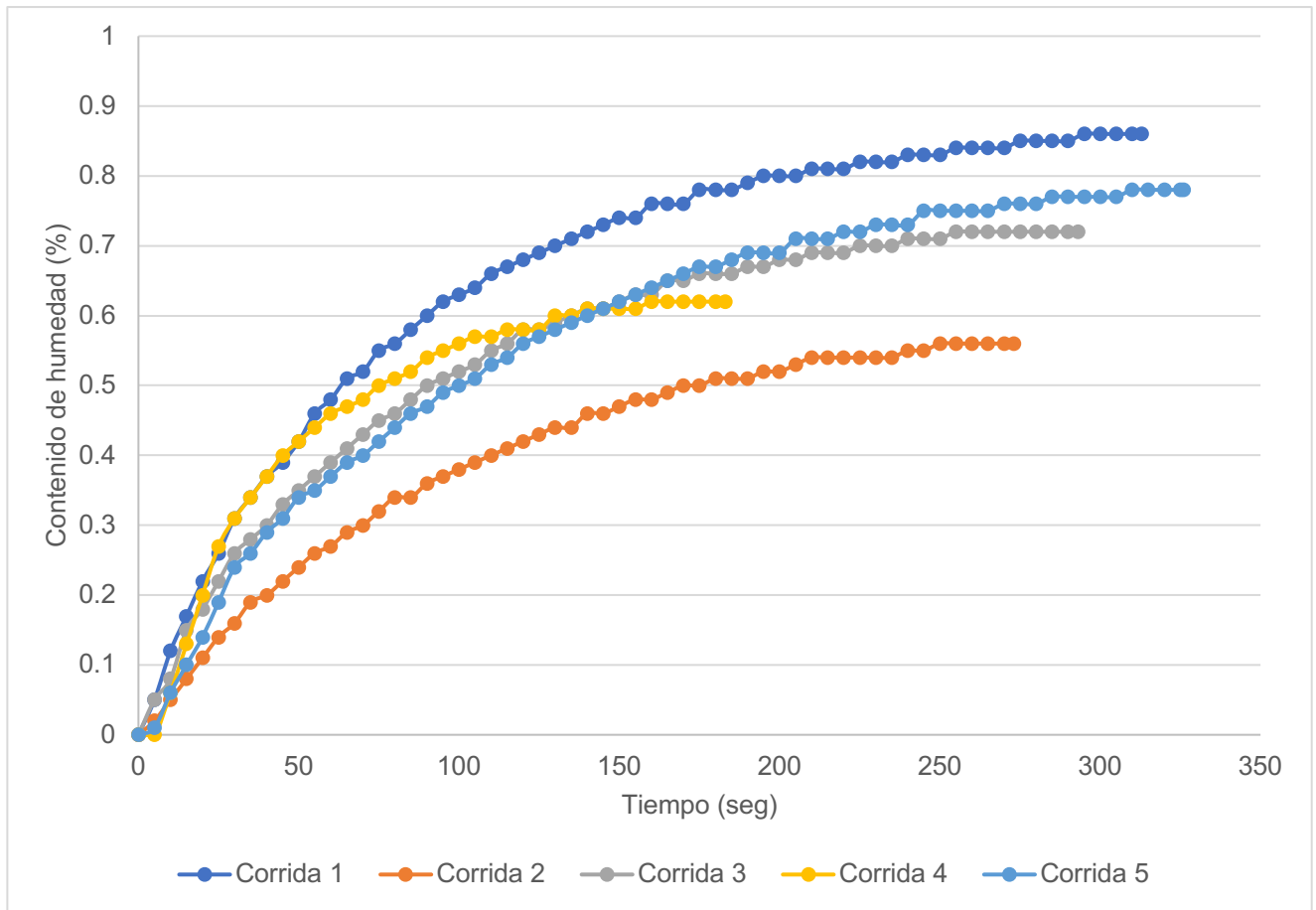
Cuadro 20. Datos de la determinación de humedad a partir del analizador de humedad Ohaus MB 120

Tiempo (s)	Contenido de humedad (%)				
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.05	0.02	0.05	0.00	0.01
10	0.12	0.05	0.08	0.06	0.06
15	0.17	0.08	0.15	0.13	0.1
20	0.22	0.11	0.18	0.20	0.14
25	0.26	0.14	0.22	0.27	0.19
30	0.31	0.16	0.26	0.31	0.24
35	0.34	0.19	0.28	0.34	0.26
40	0.37	0.20	0.30	0.37	0.29
45	0.39	0.22	0.33	0.40	0.31
50	0.42	0.24	0.35	0.42	0.34
55	0.46	0.26	0.37	0.44	0.35
60	0.48	0.27	0.39	0.46	0.37
65	0.51	0.29	0.41	0.47	0.39
70	0.52	0.30	0.43	0.48	0.40
75	0.55	0.32	0.45	0.50	0.42
80	0.56	0.34	0.46	0.51	0.44
85	0.58	0.34	0.48	0.52	0.46
90	0.60	0.36	0.50	0.54	0.47
95	0.62	0.37	0.51	0.55	0.49
100	0.63	0.38	0.52	0.56	0.50
105	0.64	0.39	0.53	0.57	0.51
110	0.66	0.40	0.55	0.57	0.53
115	0.67	0.41	0.56	0.58	0.54
120	0.68	0.42	0.58	0.58	0.56
125	0.69	0.43	0.58	0.58	0.57
130	0.70	0.44	0.59	0.60	0.58
135	0.71	0.44	0.60	0.60	0.59
140	0.72	0.46	0.61	0.61	0.60
145	0.73	0.46	0.61	0.61	0.61
150	0.74	0.47	0.62	0.61	0.62
155	0.74	0.48	0.63	0.61	0.63
160	0.76	0.48	0.63	0.62	0.64
165	0.76	0.49	0.65	0.62	0.65
170	0.76	0.50	0.65	0.62	0.66
175	0.78	0.50	0.66	0.62	0.67
180	0.78	0.51	0.66	0.62	0.67
185	0.78	0.51	0.66	0.62	0.68

Continuación

Tiempo (s)	Contenido de humedad (%)				
	Corrida 1	Tiempo (s)	Corrida 1	Tiempo (s)	Corrida 1
190	0.79	0.51	0.67		0.69
195	0.80	0.52	0.67		0.69
200	0.80	0.52	0.68		0.69
205	0.80	0.53	0.68		0.71
210	0.81	0.54	0.69		0.71
215	0.81	0.54	0.69		0.71
220	0.81	0.54	0.69		0.72
225	0.82	0.54	0.70		0.72
230	0.82	0.54	0.70		0.73
235	0.82	0.54	0.70		0.73
240	0.83	0.55	0.71		0.73
245	0.83	0.55	0.71		0.75
250	0.83	0.56	0.71		0.75
255	0.84	0.56	0.72		0.75
260	0.84	0.56	0.72		0.75
265	0.84	0.56	0.72		0.75
270	0.84	0.56	0.72		0.76
275	0.85	0.56	0.72		0.76
280	0.85		0.72		0.76
285	0.85		0.72		0.77
290	0.85		0.72		0.77
295	0.86		0.72		0.77
300	0.86				0.77
305	0.86				0.77
310	0.86				0.78
313	0.86				0.78
315					0.78
320					0.78
326					0.78

Figura 17. Curvas de secado de la ceniza de acería expresando el contenido de humedad en función del tiempo a una temperatura de 105 °C.



Cuadro 21. Tiempo, peso inicial y final de las muestras para la determinación de humedad.

Corrida No.	Peso inicial (± 0.001 g)	Peso final (± 0.001 g)	Tiempo (min)	Humedad (MC)
1	10.051	9.973	5:26	0.78%
2	10.065	10.003	3:03	0.62%
3	10.903	10.824	4:53	0.72%
4	10.061	10.005	4:33	0.56%
5	10.271	10.183	5:13	0.86%
Media				0.71%

Cuadro 22. Propiedades y condiciones del agua para la determinación de la densidad.

Masa de agua (kg)	4.72
Volumen del recipiente (L)	4.73
T (°C)	22
Densidad del agua (kg/m³)	997.86

Cuadro 23. Peso de la ceniza en las 5 corridas realizadas para la determinación de la densidad en la balanza industrial.

Corrida No.	Ceniza (kg)
1	4.48
2	4.22
3	4.48
4	4.36
5	4.22

Cuadro 24. Datos para la determinación del porcentaje de piezas metálicas en las cenizas.

Corrida No.	Muestra (± 0.05 g)	Piezas metálicas (± 0.05 g)
1	500	269
2	503	223
3	509	256
4	504	257

Cuadro 25. Datos para la obtención del análisis granulométrico.

No. Tamiz	Abertura (um)	Ceniza (± 0.10 g)			
		Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4
20	850	330	273	279	330
30	600	30	39	33	41
45	355	50	53	46	55
60	250	30	31	28	33
80	180	40	41	38	42
100	150	20	20	15	18
finos	finos	450	539	417	487
Total		950	996	856	1006

Cuadro 26. Datos para la determinación del porcentaje de piezas metálicas.

Corrida No.	Muestra (g)	Piezas metálicas (g)	Porcentaje de piezas metálicas
1	500	269	54%
2	503	223	44%
3	509	256	50%
4	504	257	51%

Cuadro 27. Límites de granulometría para el agregado fino

Tamiz No.	Porcentaje que pasa
3/8" (9,5 mm)	100
4 (4,75 mm)	95 a 100
8 (2,36 mm)	80 a 100
16 (1,18 mm)	50 a 85
30 (600 μm)	25 a 60
50 (300 μm)	5 a 30
100 (150 μm)	0 a 10

(Villalta, 2011).

D. Anexo 4: cálculos de muestra

Cálculo 1. Determinación de la humedad de cenizas de acería de la primera corrida.

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{A - B}{A} * 100$$

Donde:

A = peso inicial de la muestra (g)

B = peso final de la muestra (g)

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{(10.051 \pm 0.001 - 9.973 \pm 0.001)g}{10.051 \pm 0.001g} * 100$$

$$\text{Humedad (\%)} = 0.78 \pm 0.31$$

Nota 20. Se realizó el mismo cálculo para la humedad del resto de corridas, ver Cuadro 20, Cuadro 21 y Cuadro 28.

Cálculo 2. Volumen del recipiente para la determinación de densidad, ver Cuadro 22.

$$V (L) = \frac{A}{\rho_{agua}}$$

Donde:

A = Masa de agua en el recipiente de calibración (kg)

ρ_{agua} = Densidad del agua 22 °C. (kg/m³)

$$V (L) = \frac{4.48 \text{ kg}}{997.86 * 0.001 \frac{\text{kg}}{\text{L}}}$$

$$V (L) = 4.73 \text{ L}$$

Cálculo 3. Densidad de la ceniza de acería de la primera corrida.

$$\rho = \frac{A}{B}$$

Donde:

A = Masa de la muestra de ceniza en recipiente calibrado (kg)

B = Volumen del recipiente calibrado (m³)

ρ = Densidad en (kg/m³)

$$\rho = \frac{4.48 \pm 0.01 \text{ kg}}{4.73 * 0.001 \text{ m}^3}$$

$$\rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 947.16 \pm 47$$

Nota 21. Se realizó el mismo cálculo para la determinación de densidades para el resto de corridas, ver Cuadro 23 y Cuadro 29.

Cálculo 4. Porcentaje de piezas metálicas en las cenizas de acería de la primera corrida.

$$\text{Piezas metálicas (\%)} = \frac{A}{B}$$

Donde:

A = Masa de piezas metálicas en la muestra (g)

B = Masa de la muestra (g)

$$\text{Piezas metálicas (\%)} = \frac{269 \pm 0.05 \text{ g}}{500 \pm 0.05 \text{ g}}$$

$$\text{Piezas metálicas (\%)} = 54 \pm 0.01$$

Nota 22. Se realizó el mismo cálculo para el resto de corridas para la determinación del porcentaje de piezas metálicas, ver Cuadro 24 y Cuadro 30.

Cálculo 5. Determinación del porcentaje pasante en el tamiz No. 20 para la segunda corrida

$$\text{Retenido (\%)} = \frac{A}{B} * 100$$

Donde:

A = Masa de retenida en el tamiz (g)

B = Masa total de la muestra (g)

$$\text{Retenido (\%)} = \frac{273 \pm 0.10 \text{ g}}{996 \text{ g}} * 100$$

$$\text{Retenido (\%)} = 27.41 \pm 6.71$$

Nota 23. Se realizó el mismo cálculo para la determinación de los porcentajes de retenido en el resto de corridas y tamices, ver Cuadro 25, Cuadro 31, Cuadro 32, Cuadro 33, Cuadro 34, Cuadro 35 y Figura 5.

Cálculo 6. Determinación del porcentaje acumulado en el tamiz No. 30 de la segunda corrida.

$$\text{Acumulado (\%)} = A + B$$

Donde:

A = Masa de retenida en el tamiz (g)

B = Masa del total acumulado en el tamiz anterior (g)

$$\text{Acumulado (\%)} = 3.16 \pm 0.84 + 62.11 \pm 7.85$$

$$\text{Acumulado (\%)} = 65.26 \pm 8.50$$

Nota 24. Se realizó el mismo cálculo para la determinación de los porcentajes acumulados en el resto de corridas y tamices, ver Cuadro 25, Cuadro 31, Cuadro 32, Cuadro 33, Cuadro 34, Cuadro 35 y Figura 5.

Cálculo 7. Número de fletes mensuales requeridos.

$$\text{Número de fletes} = \frac{\text{Producción mensual de cenizas de acería}}{\text{Capacidad por flete}}$$

$$\text{Número de fletes} = \frac{900 \frac{\text{ton}}{\text{mes}}}{20 \frac{\text{ton}}{\text{flete}}}$$

$$\text{Número de fletes} = 45$$

Cálculo 8. Costo de transporte para los fletes mensuales.

$$\text{Costo mensual (Q)} = \text{Número de fletes} * \text{Costo por flete (Q)}$$

$$\text{Costo mensual (Q)} = 45 * Q.1,477.77$$

$$\text{Costo mensual (Q)} = 66,499.65$$

Cálculo 9. Determinación del costo de hidróxido de sodio.

$$\text{Hidróxido de sodio (Q)} = \text{Cantidad (kg)} * \text{Costo unitario} \left(\frac{Q}{kg} \right)$$

$$\text{Hidróxido de sodio (Q)} = 47 \text{ kg} * 3.84 \frac{Q}{kg}$$

$$\text{Hidróxido de sodio (Q)} = 181.67$$

Nota 25. Se aplicó el mismo procedimiento para la determinación del costo del silicato de sodio. Ver Cuadro 37

E. Anexo 5: análisis de error

Cálculo 10. Determinación de la humedad promedio.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^n x_i}{n}$$

Donde

\bar{x} = promedio o media

x_i = valor i de la serie de datos

n = número de sumados

\bar{x}

$$= \frac{(0.78 \pm 0.31\%) + (0.62 \pm 0.31\%) + (0.72 \pm 0.29\%) + (0.56 \pm 0.31\%) + (0.86 \pm 0.31\%)}{5}$$

$$\bar{x} = 0.71 \pm 0.10 \%$$

Nota 26. Se realizó el mismo cálculo para la determinación del promedio de la densidad, porcentaje de piezas metálicas y granulometría, ver Cuadro 11, Cuadro 35 y Cuadro 29.

Cálculo 11. Determinación de la incertidumbre de la primera corrida de humedad.

$$\Delta_c = c * \sqrt{\left(\frac{\Delta_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_b}{b}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta_n}{n}\right)^2}$$

Donde

Δ_i = incertidumbre de valor i

n = valor n

$$\Delta_c = 0.78 \% * \sqrt{\left(\frac{0.001 \text{ g}}{10.051 \text{ g}}\right)^2 + \left(\frac{0.03}{0.078 \text{ g}}\right)^2}$$

$$\Delta_c = 0.31 \%$$

Nota 27. Se realizó el mismo cálculo para la determinación de error del resto de corridas de humedad, así como la densidad, porcentaje de pizas metálicas y granulometría, ver Cuadro 11, Cuadro 28, Cuadro 29, Cuadro 30, Cuadro 31, Cuadro 32, Cuadro 33 y Cuadro 34.

Cálculo 12. Determinación de la desviación estándar de la humedad.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde

s = desviación estándar

\bar{x} = promedio o media

x_i = valor i de la serie de datos

n = número de sumados

$$s = \sqrt{\frac{(0.78\% - 0.71\%)^2 + (0.062\% - 0.71\%)^2 + (0.72\% - 0.71\%)^2 + (0.56\% - 0.71\%)^2 + (0.86\% - 0.71\%)^2}{5 - 1}}$$

$$s = 0.100 \%$$

Nota 28. Se realizó el mismo cálculo para la determinación de la desviación estándar de la densidad, porcentaje de piezas metálicas y granulometría, ver Cuadro 11, Cuadro 29 y Cuadro 35.

F. Anexo 6: datos calculados

Cuadro 28. Determinación de humedad de las cenizas de acería con su media y desviación estándar a partir analizador de humedad OHAUS MB120.

Corrida No.	Humedad (MC)	Incertidumbre
1	0.78%	0.31%
2	0.62%	0.31%
3	0.72%	0.29%
4	0.56%	0.31%
5	0.86%	0.31%
Media	0.71%	0.100%

Nota 29. Se analizó 5 muestras el 17 de septiembre del 2020, a una temperatura de secado de 105 °C por un tiempo promedio de 277 segundos. La incertidumbre de la media corresponde a la desviación estándar.

Cuadro 29. Determinación de la densidad de bulto de la ceniza de acería a 22 °C en el recipiente de capacidad de 4.61 L en la figura 13.

Corrida No.	Densidad (kg/m³)	Incertidumbre (kg/m³)
1	947.15	47
2	892.15	45
3	947.12	47
4	921.75	46
5	892.15	45
Media	920.07	27.51

Cuadro 30. Determinación del porcentaje de piezas metálicas presentes en las cenizas.

Corrida No.	Porcentaje de piezas metálicas	Incertidumbre
1	54%	0.01%
2	44%	0.01%
3	50%	0.01%
4	51%	0.01%
Media		50%
Desviación estándar		4%

Cuadro 31. Determinación de la granulometría con los tamices mencionados en el cuadro a continuación. Corrida 1.

No. Tamiz	Pasante	Incertidumbre	Retenido	Incertidumbre
20	34.74%	9.19%	100.00%	16%
30	3.16%	0.84%	65.26%	8%
45	5.26%	1.39%	62.11%	8%
60	3.16%	0.84%	56.84%	7%
80	4.21%	1.11%	53.68%	7%
100	2.11%	0.56%	49.47%	6%
finos	47.37%	12.53%	47.37%	8%

Cuadro 32. Determinación de la granulometría con los tamices mencionados en el cuadro a continuación. Corrida 2.

No. Tamiz	Pasante	Incertidumbre	Retenido	Incertidumbre
20	27.41%	7.25%	100.00%	7.25%
30	3.92%	1.04%	72.59%	5.32%
45	5.32%	1.41%	68.67%	3.78%
60	3.11%	0.82%	63.35%	2.45%
80	4.12%	1.09%	60.24%	1.61%
100	2.01%	0.53%	56.12%	0.95%
finos	54.12%	14.32%	54.12%	7.77%

Cuadro 33. Determinación de la granulometría con los tamices mencionados en el cuadro a continuación. Corrida 3.

No. Tamiz	Pasante	Incertidumbre	Retenido	Incertidumbre
20	32.59%	8.62%	100.00%	8.62%
30	3.86%	1.02%	67.41%	5.85%
45	5.37%	1.42%	63.55%	3.83%
60	3.27%	0.87%	58.18%	2.28%
80	4.44%	1.17%	54.91%	1.41%
100	1.75%	0.46%	50.47%	0.75%
finos	48.71%	12.89%	48.71%	6.29%

Cuadro 34. Determinación de la granulometría con los tamices mencionados en el cuadro a continuación. Corrida 4.

No. Tamiz	Pasante	Incertidumbre	Retenido	Incertidumbre
20	32.80%	8.68%	100.00%	8.68%
30	4.08%	1.08%	67.20%	5.88%
45	5.47%	1.45%	63.12%	3.82%
60	3.28%	0.87%	57.65%	2.26%
80	4.17%	1.10%	54.37%	1.37%
100	1.79%	0.47%	50.20%	0.73%
finos	48.41%	12.81%	48.41%	6.21%

Cuadro 35. Determinación de la granulometría promedio y desviación estándar de las 4 corridas.

No. Tamiz	Abertura (mm)	Media (\bar{x})	Desviación estándar (σ)
No. 20	0.85	100.00%	0.00%
No. 30	0.60	68.11%	3.14%
No. 45	0.36	64.36%	2.94%
No. 60	0.25	59.01%	2.95%
No. 80	0.18	55.80%	3.00%
No. 100	0.15	51.57%	3.07%

Cuadro 36. Costo de transporte de las cenizas de acería desde la planta SIDEGUA hasta planta San Miguel Petapa.

Producción mensual de cenizas de acería (ton)	900
Costo total de un viaje ida y vuelta	GTQ1,477.77
Viajes mensuales	45
Costo mensual	GTQ66,499.65

Cuadro 37. Costo de reactivos necesarios para una tonelada de concreto geopolimérico.

Reactivo	Costo unitario (Q/kg)	Cantidad (kg)	Costo total
Hidroxido de sodio	3.84	47	GTQ 181.67
Silicato de sodio	3.12	224	GTQ 700.05
		Total	GTQ 271.68

Nota 30. El costo unitario de los reactivos se obtuvo de Corado, (2021).

Nota 31. La cantidad de los reactivos se determinó a partir de la cantidad requerida para preparar 1 tonelada de la mezcla geopolimérica con una relación Solución alcalina/ceniza de 0.4.

G. Anexo 7: normas

1. Norma ASTM C 618

Figura 18. Norma ASTM C 618: Especificación estándar para ceniza volante de carbón y puzolanas naturales calcinadas o no para su uso en concreto.



Designation: C 618 – 05

Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete¹

This standard is issued under the fixed designation C 618; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This specification covers coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete where cementitious or pozzolanic action, or both, is desired, or where other properties normally attributed to fly ash or pozzolans may be desired, or where both objectives are to be achieved.

NOTE 1—Finely divided materials may tend to reduce the entrained air content of concrete. Hence, if a fly ash or natural pozzolan is added to any concrete for which entrainment of air is specified, provision should be made to ensure that the specified air content is maintained by air content tests and by use of additional air-entraining admixture or use of an air-entraining admixture in combination with air-entraining hydraulic cement.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.3 The text of this standard references notes and footnotes, which provide explanatory information. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of the standard.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates

C 311 Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete

3. Terminology

3.1 *Definitions:*

3.1.1 The terms used in this specification are defined in Terminology C 125.

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.24 on Supplementary Cementitious Materials.

Current edition approved July 1, 2005. Published July 2005. Originally approved in 1968. Last previous edition approved in 2003 as C 618–03.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

3.1.2 *fly ash*—the finely divided residue that results from the combustion of ground or powdered coal and that is transported by flue gasses.

NOTE 2—This definition of fly ash does not include, among other things, the residue resulting from: (1) the burning of municipal garbage or any other refuse with coal; (2) the injection of lime directly into the boiler for sulfur removal; or (3) the burning of industrial or municipal garbage in incinerators commonly known as “incinerator ash.”

4. Classification

4.1 *Class N*—Raw or calcined natural pozzolans that comply with the applicable requirements for the class as given herein, such as some diatomaceous earths; opaline cherts and shales; tuffs and volcanic ashes or pumicites, calcined or uncalcined; and various materials requiring calcination to induce satisfactory properties, such as some clays and shales.

4.2 *Class F*—Fly ash normally produced from burning anthracite or bituminous coal that meets the applicable requirements for this class as given herein. This class of fly ash has pozzolanic properties.

4.3 *Class C*—Fly ash normally produced from lignite or subbituminous coal that meets the applicable requirements for this class as given herein. This class of fly ash, in addition to having pozzolanic properties, also has some cementitious properties.

NOTE 3—Some Class C fly ashes may contain lime contents higher than 10 %.

5. Ordering Information

5.1 The purchaser shall specify any supplementary optional physical requirements.

5.2 The purchaser shall indicate which procedure, A or B, shall be used when specifying requirements for effectiveness in contribution to sulfate resistance under Table 3.

6. Chemical Composition

6.1 Fly ash and natural pozzolans shall conform to the requirements as to chemical composition prescribed in Table 1.

NOTE 4—The chemical component determinations and the limits placed on each do not predict the performance of the fly ash or natural pozzolan

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

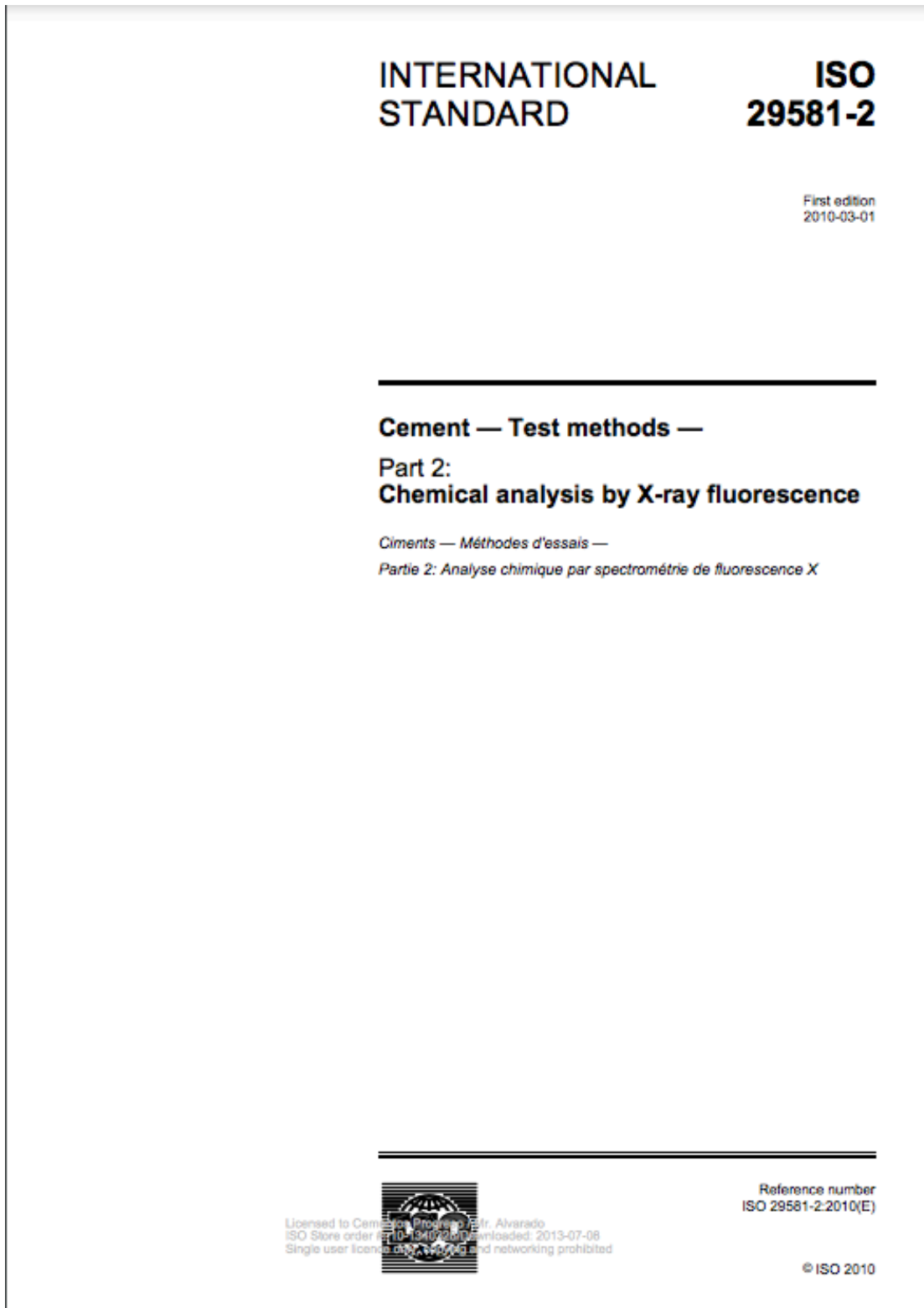
Copyright ASTM International
Provided by IHS under license with ASTM Int'l (all rights reserved);
No reproduction or networking permitted without license from IHS.

Licensee=Purdue University/5923082001
Not for Resale, 09/24/2007 13:27:41 MDT

reproduction authorized per License Agreement with Kathe Hooper (9/25/2007), Mon Jul 25 12:29:21 EDT 2005

2. Norma ISO 29581-2

Figura 19. Norma ISO 29581-2 análisis químico por fluorescencia de rayos X.



3. Método interno de CEMPRO para la difracción de rayos X.

Figura 20. Método interno para análisis de difracción de rayos X, desarrollado por Panalytical.

	INSTRUCCIÓN TÉCNICA	Código:	SGL-CT-QC-IT-08
	OPERACIÓN DEL SOFTWARE Y EQUIPO DIFRACCIÓN DE RAYOS X	Revisión:	0
		Fecha de emisión:	2017-06-15
		Página:	1 de 7

1. OBJETO

Describir los pasos para la operación básica del software DATA COLLECTOR y preparación de muestra para el equipo EMPYREAN, PANalytical.

2. ALCANCE

La presente instrucción aplica para la operación del software DATA COLLECTOR y preparación de muestra para el equipo EMPYREAN, PANalytical., partiendo desde el encendido, preparación de muestras, operación, hasta el apagado del mismo.

3. RESPONSABILIDADES

Coordinador de Laboratorio	Asegurar la aplicación, ejecución y buen desarrollo del presente documento, brindando todos los recursos necesarios.
Analista de Laboratorio	Ejecutar el método descrito, informar sobre cualquier anomalía o defecto en el equipo usado, en esta instrucción que afecten la calidad de los resultados y seguridad de las personas

4. MATERIAL Y EQUIPO

- Casete metálico
- Prensa Manual
- Paño humedecido con etanol
- Cuchilla
- Difractor de rayos X, Emphyrean, PANalytical
- Cilindro apisonador
- Pincel
- Espátula
- Chiller



Toda copia impresa se constituye como copia no controlada. El documento oficial está en Entropy. No puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de la Dirección de Calidad.

4. Norma C114

Figura 21. Norma C 114: Métodos estándar para el análisis químico del cemento hidráulico.



Designation: C 114 – 07

Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement¹

This standard is issued under the fixed designation C 114; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the chemical analyses of hydraulic cements. Any test methods of demonstrated acceptable precision and bias may be used for analysis of hydraulic cements, including analyses for referee and certification purposes, as explained in Section 3. Specific chemical test methods are provided for ease of reference for those desiring to use them. They are grouped as Reference Test Methods and Alternative Test Methods. The reference test methods are long accepted classical chemical test methods which provide a reasonably well-integrated basic scheme of analysis for hydraulic cements. The alternative test methods generally provide individual determination of specific components and may be used alone or as alternates and determinations within the basic scheme at the option of the analyst and as indicated in the individual method.

1.2 Contents:

Section	Subject
2	Referenced Documents
3	Number of Determinations and Permissible Variations
3.1	Referee Analyses
3.2	Optional Analyses
3.3	Performance Requirements for Rapid Test Methods
3.4	Precision and Bias
4	General
4.1	Interferences and Limitations
4.2	Apparatus and Materials
4.3	Reagents
4.4	Sample Preparation
4.5	General Procedures
4.6	Recommended Order for Reporting Analyses
5	Insoluble Residue
6	Silicon Dioxide
6.2	Cements with Insoluble Residue Less Than 1 %
6.3	Cements with Insoluble Residue Greater Than 1 %
7	Ammonium Hydroxide Group
8	Ferric Oxide
9	Phosphorus Pentoxide
10	Titanium Dioxide
11	Zinc Oxide
12	Aluminum Oxide
13	Calcium Oxide
14	Magnesium Oxide

15	Sulfur
15.1	Sulfur Trioxide
15.2	Sulfide
16	Loss On Ignition
16.1	Portland Cement
16.2	Portland Blast-Furnace Slag Cement and Slag Cement
17	Sodium and Potassium Oxides
17.1	Total Alkalis
17.2	Water-Soluble Alkalis
18	Manganic Oxide
19	Chloride
20	Chloroform-Soluble Organic Substances
	Alternative Test Methods
21	Calcium Oxide
22	Carbon Dioxide
23	Magnesium Oxide
24	Loss on Ignition
24.1	Portland Blast-Furnace Slag Cement and Slag Cement
25	Titanium Dioxide
26	Phosphorus Pentoxide
27	Manganic Oxide
28	Free Calcium Oxide
	Appendices
	Title
Appendix X1	Example of Determination of Equivalence Point for the Chloride Determination
Appendix X2	CO ₂ Determinations in Hydraulic Cements

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. See 6.3.2.1 and 14.4.1 for specific caution statements.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- C 25 Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime
- D 1193 Specification for Reagent Water
- E 29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications
- E 275 Practice for Describing and Measuring Performance of Ultraviolet, Visible, and Near-Infrared Spectrophotometers

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee C01 on Cement and are the direct responsibility of Subcommittee C01.23 on Compositional Analysis.

Current edition approved July 15, 2007. Published August 2007. Originally approved in 1934. Last previous edition approved in 2006 as C 114 – 06¹.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

Copyright ASTM International
Provided by IHS under license with ASTM
No reproduction or networking permitted without license from IHS

1
Licensee=Purdue University/5923082001
Not for Resale, 07/21/2008 12:15:30 MDT

5. ASTM C311

Figura 22. Norma C 114: Métodos estándar para la prueba de cenizas volantes o puzolanas naturales para su uso en concreto con cemento Portland.



Designation: C 311 – 05

Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete¹

This standard is issued under the fixed designation C 311; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 These test methods cover procedures for sampling and testing fly ash and raw or calcined pozzolans for use in portland-cement concrete.

1.2 The procedures appear in the following order:

Sampling		Sections 7
	CHEMICAL ANALYSIS	
Reagents and apparatus		10
Moisture content		11 and 12
Loss on ignition		13 and 14
Silicon dioxide, aluminum oxide, iron oxide, calcium oxide, magnesium oxide, sulfur trioxide, sodium oxide, and potassium oxide		15
Available alkali		16 and 17
Ammonia		18
	PHYSICAL TESTS	
Density		19
Fineness		20
Increase of drying shrinkage of mortar bars		21-23
Soundness		24
Air-entrainment of mortar		25 and 26
Strength activity index with portland cement		27-30
Water requirement		31
Effectiveness of Fly Ash or Natural Pozzolan in Controlling Alkali-Silica Reactions		32
Effectiveness of Fly Ash or Natural Pozzolan in Contributing to Sulfate Resistance		34

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are provided for information purposes only.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.5 The text of this standard references notes and footnotes that provide explanatory information. These notes and footnotes (excluding those in tables) shall not be considered as requirements of this standard.

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and are the direct responsibility of Subcommittee C09.24 on Supplemental Cementitious Materials.

Current edition approved Dec. 15, 2005. Published January 2006. Originally approved in 1953. Last previous edition approved in 2004 as C 311 – 04.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

- C 33 Specification for Concrete Aggregates
- C 109/C 109M Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)
- C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement
- C 150 Specification for Portland Cement
- C 151 Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement
- C 157/C 157M Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete
- C 185 Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar
- C 188 Test Method for Density of Hydraulic Cement
- C 204 Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus
- C 226 Specification for Air-Entraining Additions for Use in the Manufacture of Air-Entraining Hydraulic Cement
- C 227 Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)
- C 430 Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-µm (No. 325) Sieve
- C 441 Test Method for Effectiveness of Pozzolans or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction
- C 618 Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
- C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials
- C 778 Specification for Sand
- C 1012 Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution
- C 1157 Performance Specification for Hydraulic Cement
- C 1437 Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar
- D 1426 Test Methods for Ammonia Nitrogen In Water

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

Copyright ASTM International
 Provided by IHS under license with ASTM Int'l by ASTM Int'l (all rights reserved);
 No reproduction or networking permitted without license from IHS.

1

Licensee=Purdue University/5923082001
 Not for Resale, 01/09/2008 08:13:54 MST.
 Not for Resale, 01/09/2008 08:13:54 MST. Mon Jan 30 13:07:53 EST 2006

6. ASTM C29

Figura 23. Norma C 29: Método estándar para la determinación de densidad de agregados.



Designation: C 29/C 29M – 97 (Reapproved 2003)

American Association of State
Highway and Transportation Officials Standard
AASHTO No.: T19/T19M

Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate¹

This standard is issued under the fixed designation C 29/C 29M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of bulk density (“unit weight”) of aggregate in a compacted or loose condition, and calculated voids between particles in fine, coarse, or mixed aggregates based on the same determination. This test method is applicable to aggregates not exceeding 5 in. [125 mm] in nominal maximum size.

NOTE 1—Unit weight is the traditional terminology used to describe the property determined by this test method, which is weight per unit volume (more correctly, mass per unit volume or density).

1.2 The values stated in either inch-pound units or SI units are to be regarded separately as standard, as appropriate for a specification with which this test method is used. An exception is with regard to sieve sizes and nominal size of aggregate, in which the SI values are the standard as stated in Specification E 11. Within the text, SI units are shown in brackets. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore each system must be used independently of the other, without combining values in any way.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards:*
C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates²
C 127 Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate²
C 128 Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate²
C 138/C 138M Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete²
C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements

- for Test Methods for Construction Materials²
C 702 Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size²
D 75 Practice for Sampling Aggregates³
D 123 Terminology Relating to Textiles⁴
E 11 Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes⁵
2.2 *AASHTO Standard:*
T19/T19M Method of Test for Unit Weight and Voids in Aggregate⁶

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Definitions are in accordance with Terminology C 125 unless otherwise indicated.

3.1.1 *bulk density, n—of aggregate*, the mass of a unit volume of bulk aggregate material, in which the volume includes the volume of the individual particles and the volume of the voids between the particles. Expressed in lb/ft³ [kg/m³].

3.1.2 *unit weight, n—weight (mass) per unit volume*. (Deprecated term used—preferred term **bulk density**.)

3.1.2.1 *Discussion*—Weight is equal to the mass of the body multiplied by the acceleration due to gravity. Weight may be expressed in absolute units (newtons, pounds) or in gravitational units (kgf, lbf), for example: on the surface of the earth, a body with a mass of 1 kg has a weight of 1 kgf (approximately 9.81 N), or a body with a mass of 1 lb has a weight of 1 lbf (approximately 4.45 N or 32.2 pounds). Since weight is equal to mass times the acceleration due to gravity, the weight of a body will vary with the location where the weight is determined, while the mass of the body remains constant. On the surface of the earth, the force of gravity imparts to a body that is free to fall an acceleration of approximately 9.81 m/s² (32.2 ft/s²). **D 123.**

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *voids, n—in unit volume of aggregate*, the space between particles in an aggregate mass not occupied by solid mineral matter.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.20 on Normal Weight Aggregates.

Current edition approved July 10, 1997. Published September 1997. Originally approved in 1920. Last previous edition approved in 1991 as C 29/C 29M – 91a.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.03.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 07.01.

⁵ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

⁶ Available from American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St. NW, Suite 225, Washington, DC 20001.

Designation: D422 – 63 (Reapproved 2007)^{e1}

Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils¹

This standard is issued under the fixed designation D422; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

^{e1} NOTE—Editorial changes made throughout in February 2014.

1. Scope

1.1 This test method covers the quantitative determination of the distribution of particle sizes in soils. The distribution of particle sizes larger than 75 μm (retained on the No. 200 sieve) is determined by sieving, while the distribution of particle sizes smaller than 75 μm is determined by a sedimentation process, using a hydrometer to secure the necessary data (Note 1 and Note 2).

NOTE 1—Separation may be made on the No. 4 (4.75-mm), No. 40 (425- μm), or No. 200 (75- μm) sieve instead of the No. 10. For whatever sieve used, the size shall be indicated in the report.

NOTE 2—Two types of dispersion devices are provided: (1) a high-speed mechanical stirrer, and (2) air dispersion. Extensive investigations indicate that air-dispersion devices produce a more positive dispersion of plastic soils below the 20- μm size and appreciably less degradation on all sizes when used with sandy soils. Because of the definite advantages favoring air dispersion, its use is recommended. The results from the two types of devices differ in magnitude, depending upon soil type, leading to marked differences in particle size distribution, especially for sizes finer than 20 μm .

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

D421 Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants

E11 Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves

E100 Specification for ASTM Hydrometers

2.2 ASTM Adjuncts:

Air-Jet Dispersion Cup for Grain-Size Analysis of Soil³

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D18 on Soil and Rock and is the direct responsibility of Subcommittee D18.03 on Texture, Plasticity and Density Characteristics of Soils.

Current edition approved Oct. 15, 2007. Published October 2007. Originally approved in 1935. Last previous edition approved in 2002 as D422 – 63 (2002)¹. DOI: 10.1520/D0422-63R07E01.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from ASTM International Headquarters. Order Adjunct No. ADJD0422.

3. Apparatus

3.1 *Balances*—A balance sensitive to 0.01 g for weighing the material passing a No. 10 (2.00-mm) sieve, and a balance sensitive to 0.1 % of the mass of the sample to be weighed for weighing the material retained on a No. 10 sieve.

3.2 *Stirring Apparatus*—Either apparatus A or B may be used.

3.2.1 Apparatus A shall consist of a mechanically operated stirring device in which a suitably mounted electric motor turns a vertical shaft at a speed of not less than 10 000 rpm without load. The shaft shall be equipped with a replaceable stirring paddle made of metal, plastic, or hard rubber, as shown in Fig. 1. The shaft shall be of such length that the stirring paddle will operate not less than $\frac{3}{4}$ in. (19.0 mm) nor more than 1 $\frac{1}{2}$ in. (38.1 mm) above the bottom of the dispersion cup. A special dispersion cup conforming to either of the designs shown in Fig. 2 shall be provided to hold the sample while it is being dispersed.

3.2.2 Apparatus B shall consist of an air-jet dispersion cup (see drawing ³) (Note 3) conforming to the general details shown in Fig. 3 (Note 4 and Note 5).

NOTE 3—The amount of air required by an air-jet dispersion cup is of the order of 2 ft³/min; some small air compressors are not capable of supplying sufficient air to operate a cup.

NOTE 4—Another air-type dispersion device, known as a dispersion tube, developed by Chu and Davidson at Iowa State College, has been shown to give results equivalent to those secured by the air-jet dispersion cups. When it is used, soaking of the sample can be done in the sedimentation cylinder, thus eliminating the need for transferring the slurry. When the air-dispersion tube is used, it shall be so indicated in the report.

NOTE 5—Water may condense in air lines when not in use. This water must be removed, either by using a water trap on the air line, or by blowing the water out of the line before using any of the air for dispersion purposes.

3.3 *Hydrometer*—An ASTM hydrometer, graduated to read in either specific gravity of the suspension or grams per litre of suspension, and conforming to the requirements for hydrometers 151H or 152H in Specifications E100. Dimensions of both hydrometers are the same, the scale being the only item of difference.

3.4 *Sedimentation Cylinder*—A glass cylinder essentially 18 in. (457 mm) in height and 2 $\frac{1}{2}$ in. (63.5 mm) in diameter, and

8. ASTM C 33

Figura 25. Norma C 33: Especificaciones de agregados para concreto.



Designation: C 33 – 03

Standard Specification for Concrete Aggregates¹

This standard is issued under the fixed designation C 33; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This specification defines the requirements for grading and quality of fine and coarse aggregate (other than lightweight or heavyweight aggregate) for use in concrete.²

1.2 This specification is for use by a contractor, concrete supplier, or other purchaser as part of the purchase document describing the material to be furnished.

NOTE 1—This specification is regarded as adequate to ensure satisfactory materials for most concrete. It is recognized that, for certain work or in certain regions, it may be either more or less restrictive than needed. For example, where aesthetics are important, more restrictive limits may be considered regarding impurities that would stain the concrete surface. The specifier should ascertain that aggregates specified are or can be made available in the area of the work, with regard to grading, physical, or chemical properties, or combination thereof.

1.3 This specification is also for use in project specifications to define the quality of aggregate, the nominal maximum size of the aggregate, and other specific grading requirements. Those responsible for selecting the proportions for the concrete mixture shall have the responsibility of determining the proportions of fine and coarse aggregate and the addition of blending aggregate sizes if required or approved.

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.5 The text of this standard references notes and footnotes which provide explanatory material. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of this standard.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

C 29/C 29M Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate³

C 40 Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete³

C 87 Test Method for Effect of Organic Impurities in Fine Aggregate on Strength of Mortar³

C 88 Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate³

C 117 Test Method for Material Finer than 75- μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing³

C 123 Test Method for Lightweight Particles in Aggregate³

C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates³

C 131 Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine³

C 136 Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates³

C 142 Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates³

C 150 Specification for Portland Cement⁴

C 227 Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)³

C 289 Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)³

C 294 Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates³

C 295 Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete³

C 311 Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete³

C 330 Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete³

C 331 Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units³

C 332 Specification for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete³

C 342 Test Method for Potential Volume Change of Cement-Aggregate Combinations⁵

C 441 Test Method for Effectiveness of Mineral Admixtures or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.20 on Normal Weight Aggregates.

Current edition approved June 10, 2003. Published July 2003. Originally approved in 1921. Last previous edition approved in 2002 as C 33 – 02a.

² For lightweight aggregates, see Specifications C 331, C 332, and C 330; for heavyweight aggregates see Specification C 637 and Descriptive Nomenclature C 638.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01.

⁵ Discontinued; see 2001 Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

9. EPA 3051a

Figura 26. Norma EPA 3051a: Digestión ácida asistida por microondas.

METHOD 3051A

MICROWAVE ASSISTED ACID DIGESTION OF
SEDIMENTS, SLUDGES, SOILS, AND OILS

SW-846 is not intended to be an analytical training manual. Therefore, method procedures are written based on the assumption that they will be performed by analysts who are formally trained in at least the basic principles of chemical analysis and in the use of the subject technology.

In addition, SW-846 methods, with the exception of required method use for the analysis of method-defined parameters, are intended to be guidance methods which contain general information on how to perform an analytical procedure or technique which a laboratory can use as a basic starting point for generating its own detailed Standard Operating Procedure (SOP), either for its own general use or for a specific project application. The performance data included in this method are for guidance purposes only, and are not intended to be and must not be used as absolute QC acceptance criteria for purposes of laboratory accreditation.

1.0 SCOPE AND APPLICATION

1.1 This microwave extraction method is designed to mimic extraction using conventional heating with nitric acid (HNO₃), or alternatively, nitric acid and hydrochloric acid (HCl), according to EPA Method 200.2 and Method 3050. Since this method is not intended to accomplish total decomposition of the sample, the extracted analyte concentrations may not reflect the total content in the sample. This method is applicable to the microwave-assisted acid extraction/dissolution[†] of sediments, sludges, soils, and oils for the following elements:

Element	CAS Registry No. ^a
*Aluminum (Al)	7429-90-5
*Antimony (Sb)	7440-36-0
Arsenic (As)	7440-38-2
*Barium (Ba)	7440-39-3
*Beryllium (Be)	7440-41-7
Boron (B)	7440-42-8
Cadmium (Cd)	7440-43-9
Calcium (Ca)	7440-70-2
*Chromium (Cr)	7440-47-3
Cobalt (Co)	7440-48-4
Copper (Cu)	7440-50-8
*Iron (Fe)	7439-89-6

Figura 27. Digestión asistida por microondas de matrices silíceas y orgánicas

METHOD 3052

MICROWAVE ASSISTED ACID DIGESTION OF SILICEOUS AND ORGANICALLY BASED MATRICES

1.0 SCOPE AND APPLICATION

1.1 This method is applicable to the microwave assisted acid digestion of siliceous matrices, and organic matrices and other complex matrices. If a total decomposition analysis (relative to the target analyte list) is required, the following matrices can be digested: ashes, biological tissues, oils, oil contaminated soils, sediments, sludges, and soils. This method is applicable for the following elements:

Aluminum	Cadmium	Iron	Molybdenum	Sodium
Antimony	Calcium	Lead	Nickel	Strontium
Arsenic	Chromium	Magnesium	Potassium	Thallium
Boron	Cobalt	Manganese	Selenium	Vanadium
Barium	Copper	Mercury	Silver	Zinc
Beryllium				

Other elements and matrices may be analyzed by this method if performance is demonstrated for the analyte of interest, in the matrices of interest, at the concentration levels of interest (see Sec. 8.0).

Note: This technique is not appropriate for regulatory applications that require the use of leachate preparations (i.e., Method 3050, Method 3051, Method 1311, Method 1312, Method 1310, Method 1320, Method 1330, Method 3031, Method 3040). This method is appropriate for those applications requiring a total decomposition for research purposes (i.e., geological studies, mass balances, analysis of Standard Reference Materials) or in response to a regulation that requires total sample decomposition.

1.2 This method is provided as a rapid multi-element, microwave assisted acid digestion prior to analysis protocol so that decisions can be made about the site or material. Digests and alternative procedures produced by the method are suitable for analysis by flame atomic absorption spectrometry (FLAA), cold vapor atomic absorption spectrometry (CVAA), graphite furnace atomic absorption spectrometry (GFAA), inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES), inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and other analytical elemental analysis techniques where applicable. Due to the rapid advances in microwave technology, consult your manufacturer's recommended instructions for guidance on their microwave digestion system and refer to this manual's "Disclaimer" when conducting analyses using Method 3052.

1.3 The goal of this method is total sample decomposition and with judicious choice of acid combinations this is achievable for most matrices (see Sec. 3.2). Selection of reagents which give the highest recoveries for the target analytes is considered the optimum method condition.

11. EPA 6010c

Figura 28. Espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inducido.

METHOD 6010C

INDUCTIVELY COUPLED PLASMA-ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY

SW-846 is not intended to be an analytical training manual. Therefore, method procedures are written based on the assumption that they will be performed by analysts who are formally trained in at least the basic principles of chemical analysis and in the use of the subject technology.

In addition, SW-846 methods, with the exception of required method use for the analysis of method-defined parameters, are intended to be guidance methods which contain general information on how to perform an analytical procedure or technique which a laboratory can use as a basic starting point for generating its own detailed Standard Operating Procedure (SOP), either for its own general use or for a specific project application. The performance data included in this method are for guidance purposes only, and are not intended to be and must not be used as absolute QC acceptance criteria for purposes of laboratory accreditation.

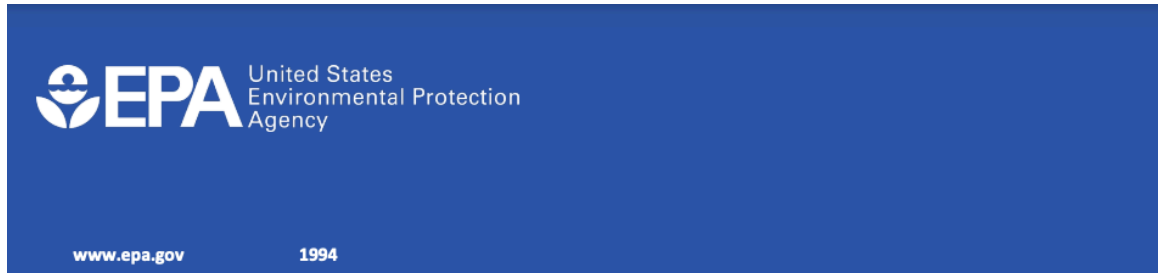
1.0 SCOPE AND APPLICATION

1.1 Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES) may be used to determine trace elements in solution. With the exception of groundwater samples, all aqueous and solid matrices need acid digestion prior to analysis. Groundwater samples that were prefiltered and acidified will not need acid digestion. Samples which are not digested need either an internal standard or should be matrix-matched with the standards. If either option is used, instrument software should be programmed to correct for intensity differences of the internal standard between samples and standards. Refer to Chapter Three, "Inorganic Analytes," for a listing of digestion procedures that may be appropriate. The following analytes have been determined by this method:

Element	Symbol	CAS Number	Element	Symbol	CAS Number
Aluminum	Al	7429-90-5	Mercury	Hg	7439-97-6
Antimony	Sb	7440-36-0	Molybdenum	Mo	7439-98-7
Arsenic	As	7440-38-2	Nickel	Ni	7440-02-0
Barium	Ba	7440-39-3	Phosphorus	P	7723-14-0
Beryllium	Be	7440-41-7	Potassium	K	7440-09-7
Boron	B	7440-42-8	Selenium	Se	7782-49-2
Cadmium	Cd	7440-43-9	Silica	SiO ₂	7631-86-9
Calcium	Ca	7440-70-2	Silver	Ag	7440-22-4
Chromium	Cr	7440-47-3	Sodium	Na	7440-23-5
Cobalt	Co	7440-48-4	Strontium	Sr	7440-24-6
Copper	Cu	7440-50-8	Thallium	Tl	7440-28-0
Iron	Fe	7439-89-6	Tin	Sn	7440-31-5
Lead	Pb	7439-92-1	Titanium	Ti	7440-32-6
Lithium	Li	7439-93-2	Vanadium	V	7440-62-2

12. EPA 200.7

Figura 29. Determinación de metales y elementos traza en agua y residuos por Espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inducido.



Method 200.7, Revision 4.4: Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry

H. Anexo 8: análisis en CEMPRO

Figura 30. Informe de ensayo de laboratorio químico de difracción de rayos X (10-09-2020).

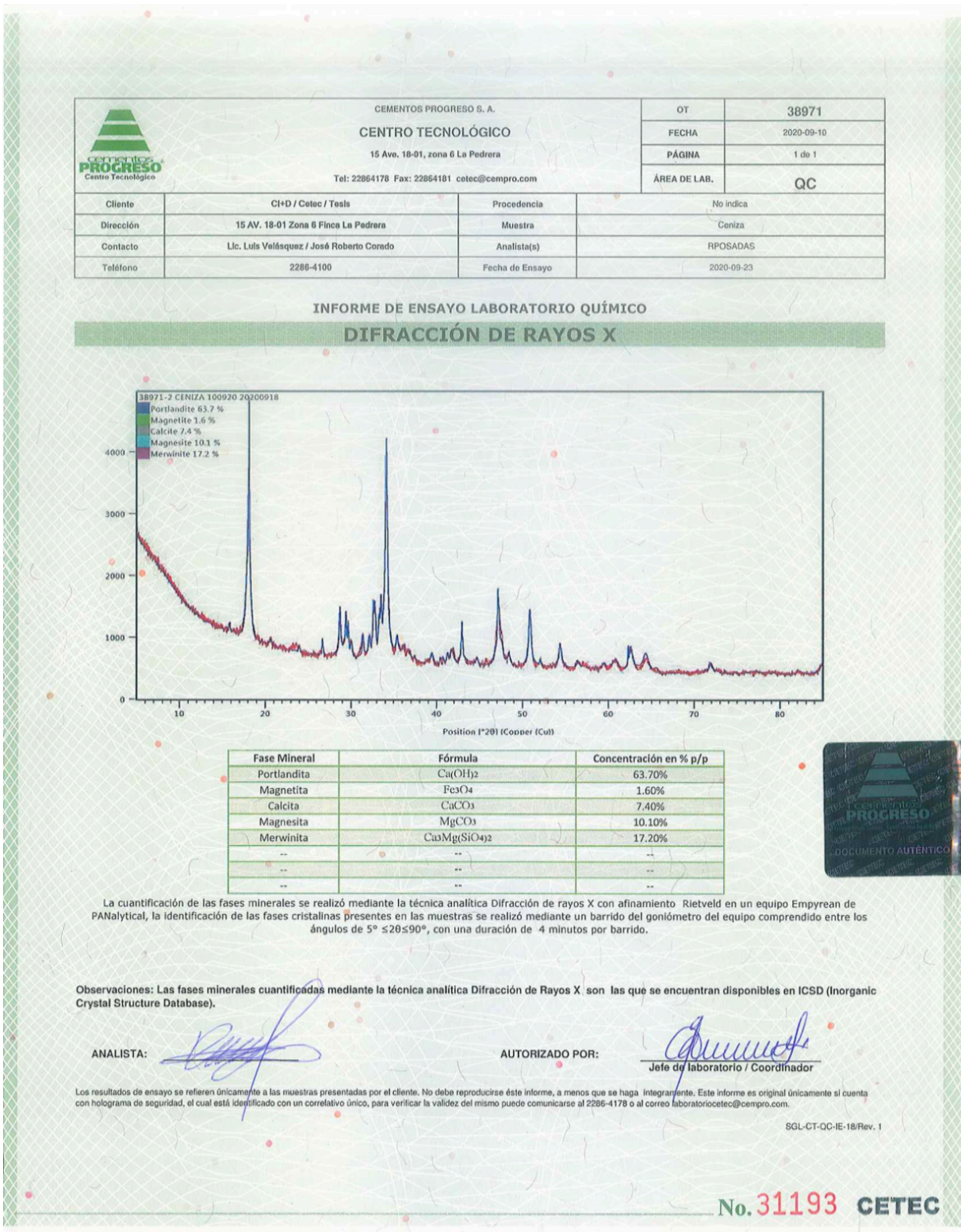
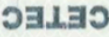



Figura 31. Informe de ensayo de laboratorio químico por fluorescencia de rayos X (10-09-2020)



No. 32821



CEMENTOS PROGRESO S. A.
CENTRO TECNOLÓGICO
 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera
 Tel: 22664178 Fax: 22664181 laboratorioCETEC@cempro.com

OT: 38971
 FECHA: 2020-09-10
 PÁGINA: 1 de 1
 ÁREA DE LAB. **QC**

Cliente	CHD / Cetec / Tesis	Procedencia	No indica
Dirección / Teléfono	15 AV. 18-01 Zona 6 Finca La Pedrera / 2286-4100	Muestra	Varias
Contacto	Lic. Luis Velásquez / José Roberto Corrado	Analista(s)	RPOSADAS
Proyecto	Escoria De Acero	Fecha de Ensayo	2020-09-29


INFORME DE ENSAYO

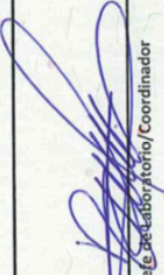
ANÁLISIS QUÍMICO

MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

* COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)												
Muestra	Al2O3	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SiO2	SO3	Total
1 Escoria	6.39	23.75	1.50	39.90	0.02	5.35	1.02	0.19	0.19	9.62	0.55	89.47
2 Ceniza	3.59	51.01	0.03	13.32	0.06	5.39	0.76	0.05	0.14	0.39	13.04	96.58
---Última Línea---												

* Expresada como porcentaje en masa (w/w).


 Analista



 Jefe de Laboratorio/Coordinador

OBSERVACIONES [INGRESO ESPECIAL] Lectura realizada en Planta San Miguel. El análisis semicuantitativo-estiquimétrico de Difracción de Rayos X presentó un 6.74% de NiO el cual no puede ser cuantificado por la curva de Fluorescencia de Rayos X utilizado para la muestra 38971-1. Este informe sustituye al emitido con hoja número 31194 y holograma número 33304

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.

SGL-QC-IE-09/Rev. 1

Figura 32. Informe de ensayo de laboratorio químico de pérdida al fuego (LOI) (10-09-2020).

 <p>CEMENTOS PROGRESO Compartimos Sueños. Construimos Realidades.</p>	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	38971
			FECHA	2020-09-10
			PÁGINA	1 de 1
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CI+D / Cetec / Tesis	Procedencia	No indica	
Dirección	15 AV. 18-01 Zona 6 Finca La Pedrera	Muestra	Varias	
Contacto	Lic. Luis Velásquez / José Roberto Corado	Analista(s)	JLAZARO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2020-09-23	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

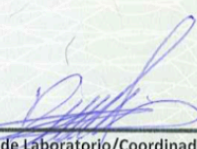
PÉRDIDAS AL FUEGO
NORMA ASTM C 114

* LOI (950 °C)		
No.	Id. De Muestra	%
1	Escoria	0.39
2	Ceniza	8.55
---Ultima Linea---		

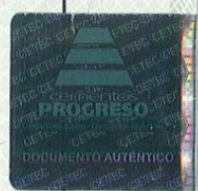
* Expresada como porcentaje en masa (w/w)



 Analista



 Jefe de Laboratorio/Coordinador





OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratoriocetec@cempro.com.

SGL-CT-QC-IE-09/REV 1

No. 31196 CETEC

Figura 33. Informe de ensayo de laboratorio químico de Residuos Insolubles (RI) (10-09-2020).


	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		 OGA ACREDITADO OGA-IE-013	OT	38971
				FECHA	2020-09-10
				PÁGINA	1 de 1
				ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CI+D / Cetec / Teals	Procedencia	No indica		
Dirección	15 AV. 18-01 Zona 6 Finca La Pedrera	Muestra	Varias		
Contacto	Lic. Luis Velásquez / José Roberto Corado	Analista(s)	JLAZARO		
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2020-09-23		

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

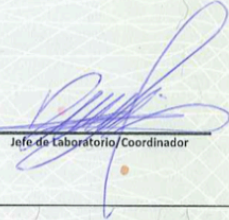
ANÁLISIS DE RESIDUO INSOLUBLE

ASTM C 114

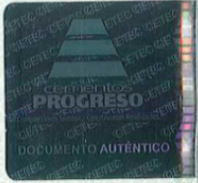
No.	IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS	% RI
1	Escoria	41.27
PROCEDENCIA	No indica	
2	Ceniza	7.88
PROCEDENCIA	No indica	
PROCEDENCIA	---Ultima Linea---	
PROCEDENCIA		
PROCEDENCIA		



 Analista



 Jefe de Laboratorio/Coordinador




OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratorio@cempro.com.

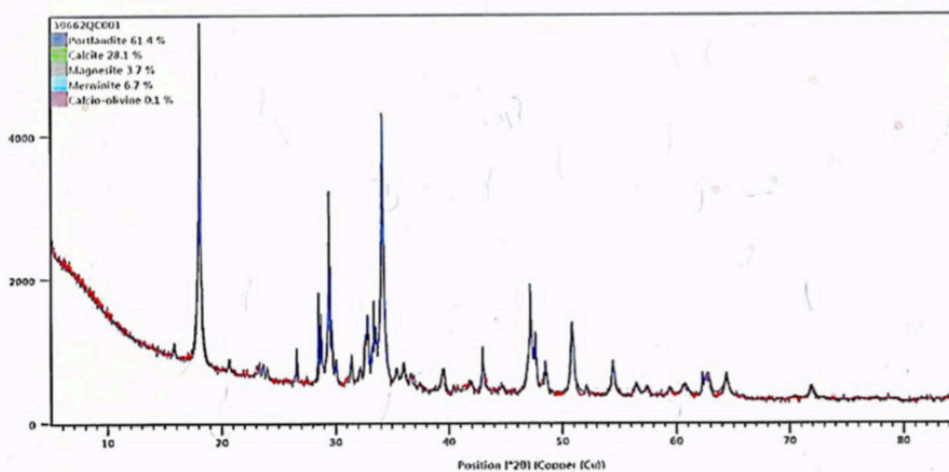
SQL-CT-QC-IE-23/REV 1

No. 31195 **CETEC**

Figura 34. Informe de ensayo de laboratorio químico de difracción de rayos X (25-01-2021)).

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	39662
			FECHA	2021-01-25
			PÁGINA	1 de 1
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	I+D Cemento	Procedencia	Sidagua	
Dirección	15 Av. 18-01 zona 6, Interior Finca La Pedrera	Muestra	CENIZA de SIDAGUA	
Contacto	Roberto Díaz / Carmen Pivarni	Analista(s)	CMORALES	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2021-01-28	

**INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO
DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

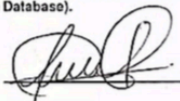


Fase Mineral	Fórmula	Concentración en % p/p
Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	61.40%
Calcita	CaCO_3	28.10%
Magnesita	MgCO_3	3.70%
Merwinita	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$	6.70%
Olivina	$(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$	0.10%
--	--	--
--	--	--
--	--	--

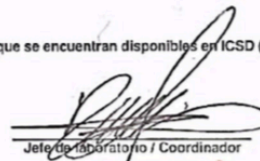
La cuantificación de las fases minerales se realizó mediante la técnica analítica Difracción de rayos X con alineamiento Rietveld en un equipo Empyrean de PANalytical, la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante un barrido del goniómetro del equipo comprendido entre los ángulos de $5^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$, con una duración de 4 minutos por barrido.

Observaciones: Las fases minerales cuantificadas mediante la técnica analítica Difracción de Rayos X son las que se encuentran disponibles en ICSD (Inorganic Crystal Structure Database).

ANALISTA:



AUTORIZADO POR:



Jefe de laboratorio / Coordinador

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratorio@cempro.com.

SGL-CT-QC-E-18/Rev. 1

No. 35542 CETEC


Figura 35. Informe de ensayo de laboratorio de agregados del análisis granulométrico (25-01-2021).



BOG-CI-40-E-01 Rev.02

No. 34752 **GETEC**

Figura 36. Informe de ensayo de laboratorio de Residuos insolubles (RI) y pérdida al fuego (LOI) (25-01-2021)

 CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com	OT	39662
	FECHA	2021-01-25
	PÁGINA	1 DE 1
	ÁREA DE LAB.	QC

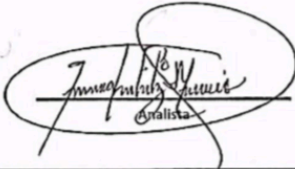
Cliente	ID Comento	Procedencia	Sidegua
Dirección	15 Av. 18-01 zona 6, Interior Finca La Pedrera	Muestra	Verias
Contacto	Roberto Díaz / Carmen Pivaral	Analista(s)	OSANTELIZ
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2021-01-25


INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS DE RESIDUO INSOLUBLE Y PÉRDIDA AL FUEGO

ASTM C 114

No.	IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS	% RI	% LOI (950°C)
1	CENIZA de SIDEGUA	11.80	9.56
2	---Ultima Linea---		
3			
4			
5			


 Analista


 Jefe de Laboratorio/Coordinador


OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratoriocetec@cempro.com.

SQL-CT-QC-IE-26/REV 9

No. 35544 CETEC

Figura 37. Informe de ensayo de laboratorio químico de fluorescencia de rayos X (25-01-2021).



PROGRESO

CEMENTOS PROGRESO S. A.
CENTRO TECNOLÓGICO
 18 Av. 18-21, zona 6 La Piedad
 Tel: 25544038 Fax: 25544039 Laboratorio: CETEC@progreso.com

Logo of CETA

CEMENTOS PROGRESO S. A.

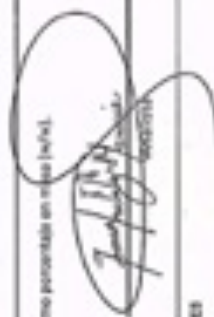
Cliente: BQ Compañía Dirección / Teléfono: 18 Av. 18-21 zona 6, sector zona La Piedad / 2251-4128 Contacto: Roberto Díaz / Carmen Pizaral Proyecto: Evaluación de calidad de Sotogua	Procedencia: Manera Análisis: Análisis Fecha de Ensayo: 2021-01-28	DT: 0942 Fecha: 2021-01-28 Página: 1 de 1 Área de Lab: QC	Tópicos: Veritas QUANTULOC 2021-01-28
---	--	--	--


INFORME DE ENSAYO

ANÁLISIS QUÍMICO

MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)													
Número	Al2O3	CaO	Cl2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SO3	SiO2	TOTAL	
1	4.39	69.72	0.43	11.57	0.05	6.72	1.95	0.26	0.19	0.37	15.07	0.33	9.98
--Última Oper--													
* Expresado como porcentaje en peso (p/p).													


 Roberto Díaz
 Analista


 Carmen Pizaral
 Ingeniera de Control de Calidad

OTERMINACIONES
 Los resultados de análisis en este informe son válidos para el cliente. No debe reproducirse sin el consentimiento del cliente.

MS-01-05-01-01 Rev. 1

Figura 38. Informe de resultados de contenido de metales pesados.

Laboratorio de Recursos Alternativos (AFR)
 TEL (502) 7952 8000 ext. 7554



INFORME DE RESULTADOS

CENIZA SIDEGUA 20210127-01		
PARAMETRO	mg/kg	METODO
Ag 328.068	< 0.1	EPA 3051a, EPA 3052, EPA 6010c, EPA 200.7
Al 396.153	12600	
As 197.197	ND	
Ba 233.527	671	
Be 313.051	ND	
Cd 226.502	33	
Co 228.616	< 0.1	
Cr 267.716	1343	
Cu 327.393	122	
Fe 238.204	61575	
Mn 403.075	10098	
Mo 204.597	ND	
Ni 231.604	ND	
Pb 220.353	276	
Sb 206.836	32	
Se 196.026	ND	
Sn 189.927	27	
Te 214.281	ND	
Tl 351.924	ND	
V 292.402	101	
W 207.912	ND	
Zn 206.200	4830	
B 249.772	318	
As 188.979	ND	
Hg	0.03	Horno combustión IR

Nota: ND = No detectado

XIII. GLOSARIO

- Acero:** En metalurgia, es una aleación de hierro con una proporción de carbono variable entre 0.1 y 2.1% m/m de su composición. La adición de carbono y de otros elementos, tanto metálicos como no metálicos, mejoran sus propiedades fisicoquímicas.
- Afino:** Proceso de eliminación de impurezas al que se somete el arrabio (hierro de primera fundición con alto porcentaje de carbono) para la obtención del acero.
- Agregado fino:** Consiste en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm.
- Aglutinante:** Material capaz de unir fragmentos de uno o más materiales para formar un conjunto compacto. Según la forma en que llevan a cabo a la unión, se denominan aglomerantes o conglomerantes.
- Aglomerante:** Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efectos de tipo exclusivamente físico.
- Aspecto ambiental:** Elemento de las actividades, productos o servicios de una organización que puede interactuar con el medio ambiente.
- Bioacumulación:** Cantidad total de un contaminante, que es absorbida y retenida por los organismos que es el resultado de la asimilación por diferentes mecanismos.
- Biomagnificación:** Incremento en la concentración de un contaminante con el aumento en el nivel trófico, donde los depredadores presentan mayores concentraciones que sus presas.

Ceniza volante:	Producto secundario de la combustión del carbón.
Concreto:	Mezcla diseñada con agregados fino y grueso inertes, cemento, agua y aditivos.
Conglomerante:	Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por transformaciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos
Chatarra:	Es el conjunto de trozos de metal de desecho, principalmente de hierro. La chatarra de hierro es utilizada en la producción de acero, cubriendo un 40% de las necesidades mundiales. La chatarra se divide en dos tipos: metales ferrosos y no ferrosos.
Electrodeposición:	Tratamiento electroquímico donde se aglomeran los cationes metálicos contenidos en una solución acuosa para ser sedimentados sobre un objeto conductor creando una capa.
Fundición:	Proceso de fabricación de piezas por fusión del acero a temperaturas elevadas con una fuente de energía.
Fundente:	Material que reacciona con las impurezas presentes y las remueve del hierro fundido como escoria.
Geopolímero:	Término acuñado por Joseph Davidovits para designar polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización.

- Impacto ambiental:** Cualquier cambio en el medio ambiente, ya sea adverso o beneficioso, como resultado total o parcial de los aspectos ambientales de una organización.
- Lixiviación:** Extracción sólido-líquido; es un proceso en el que un disolvente líquido se pone en contacto con un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de uno de los componentes del sólido.
- Menas de hierro:** Minerales naturales de los que se extrae el hierro por un proceso de reducción.
- Polvo de acería:** Es uno de los residuos generados de la fundición de acero en horno de arco eléctrico (EAF), constituido por las partículas volátiles.
- Refractario:** Material capaz de resistir las condiciones del medio en el que está inmerso sin alteraciones importantes en sus propiedades físicoquímicas.
- Residuo peligroso:** Aquellos residuos diferentes a los radioactivos que por razones de su reactividad química, toxicidad u otras características provocan un peligro o pueden causar peligro para la salud o el ambiente, ya sea por sí solos o cuando se ponen en contacto con otros residuos.
Se definen legalmente como peligrosos en el estado en el cual son generados o en el cual son eliminados o de la forma cómo son transportados.
- Sólido amorfo:** Las partículas que conforman el sólido carecen de una estructura ordenada.
- Sólido cristalino:** Aquellos en los que los átomos, iones o moléculas se repiten de forma ordenada y periódica en las tres direcciones.

Volatilización: Proceso que consiste en el cambio de estado de la materia sólida al estado gaseoso sin pasar por el estado líquido.