



Mineral de la Reforma, Hgo., a 22 de mayo de 2023

Número de control: ICBI-D/762/2023

Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
 DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

El Comité Tutorial de la tesis titulada "Efecto de la adición de ceniza volante y/o residuos mineros en la evolución estructural y desempeño mecánico del concreto (0 a 28 días)" realizado por el sustentante **Hugo García Ortiz** con número de cuenta 133600 perteneciente al programa de **Doctorado en Ciencias de los Materiales (tradicional)**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
 "Amor, Orden y Progreso"

El Comité Tutorial


 Dr. Julio César Juárez Tapia
 Director de tesis


 Dr. Miguel Pérez Labra
 Codirector


 Dr. Martín Reyes Pérez
 Titular


 Dr. Edgar Cardoso Legorreta
 Suplente


 Dr. Otilio Arturo Acevedo Sánchez
 Director del ICBI



0045/00

Comité del Conocimiento
 Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia
 Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo
 México, C.P. 42184
 Teléfono: 771 71 720 00 ext. 2231 Fax 2109
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx





Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI)

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales
(AACT y M)

“Efecto de la adición de ceniza volante y/o residuos mineros en la evolución estructural y desempeño mecánico del concreto (0 a 28 días)”

Área de investigación: “Caracterización de Materiales”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

PRESENTA

MCM. HUGO GARCIA ORTIZ

DIRECTORES DE TESIS

DR. JULIO CESAR JUÁREZ TAPIA
DR. MIGUEL PÉREZ LABRA

Mineral de la Reforma, Hidalgo,

Junio 2023

Contenido

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE GRÁFICAS	11
DEDICATORIA.....	12
AGRADECIMIENTOS	13
CAPÍTULO 1	14
INTRODUCCIÓN	14
Justificación	18
Hipótesis	19
Objetivos.....	20
Objetivo general.....	20
Objetivos específicos.....	20
CAPÍTULO II	21
ANTECEDENTES	21
Ceniza volante	21
Generación de ceniza volante	21
Proceso de la quema de carbón	23
Obtención de ceniza volante.....	24
Relaves mineros	25
Hidrometalurgia extractiva	26
Producción de relaves mineros.....	28
Orígenes del cemento.....	30
Aplicaciones generales.....	32
Proceso de fabricación	34
Tipos de cemento portland y composición química	35
Cemento Portland Ordinario (CPC) para la fabricación de mortero.....	37
Constituyentes del cemento portland y su hidratación.....	38
Hidratación del cemento portland	40
Materiales pétreos empleados en la fabricación de mortero.....	43
Aditivos	45

Relación agua-cemento	45
Concreto	46
Normativa aplicable para la fabricación de morteros	48
Procedimiento para muestreo de agregados NMX-C-030-ONNCCE-2004	48
Procedimiento para reducción de muestras al tamaño requerido de las pruebas NMX-C-170-ONNCCE-1997	49
Procedimiento para cálculo de masa volumétrica NMX-C-073-ONNCCE-2004	50
Procedimiento para análisis granulométrico NMX-C-077-ONNCCE-1997.....	51
Procedimiento para análisis de pérdida por lavado NMX-C-084-ONNCCE-2006.....	53
Procedimiento para determinar contenido de impurezas orgánicas NMX-C-088-ONNCCE-1997	53
Procedimiento para prueba de absorción de agua y masa específica de los agregados fino NMX-C-165-ONNCCE-2014	55
Procedimiento para la prueba de revenimiento	56
Procedimiento para ensayo a la compresión sobre bloques de concreto seco NMX-C-036-ONNCCE-2004	57
CAPÍTULO III	60
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	60
Diseño experimental	61
Caracterización de materias primas.....	62
Proceso de fabricación de morteros con adición de ceniza volante.....	62
Preparación de los moldes	63
Mezclado	64
Preparación de los cubos	65
Desmolde y almacenamiento de los especímenes.....	66
Evaluación de la resistencia a la compresión	67
Procedimiento de prueba a la compresión.....	68
Fabricación de morteros con adición de “jal”	70
Difracción de Rayos X (DRX).....	75
Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).....	76
Espectroscopia de rayos X de Energía Dispersiva. (XEDS)	77
CAPÍTULO 4	78

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	78
Cemento	78
Ceniza volante	83
Relaves mineros	88
Morteros con ceniza volante	90
Evaluación de resistencia a la compresión	90
Evolución estructural de los morteros	92
Evolución morfológica de los morteros	95
Morteros con relaves mineros.....	98
Evaluación de resistencia a la compresión	98
CONCLUSIONES.....	100
BIBLIOGRAFÍA	102

RESUMEN

El uso de agregados en la fabricación de concretos tiene como finalidad aumentar la resistencia a la compresión. Entre los agregados utilizados, principalmente por su actividad puzolánica, destaca la ceniza volante, residuo de la combustión del carbón mineral en las plantas termoeléctricas donde se generan cantidades de entre 80 y 250 kg de ceniza volante/tonelada de carbón quemado (Robayo et al., 2016). Por su alto contenido de óxidos de calcio, dióxido de silicio y óxidos de aluminio, este residuo puede utilizarse como aditivo en la fabricación de morteros y de esta manera sustituir parte del cemento portland. En este trabajo se evaluó la resistencia mecánica a los 3, 7, 14 y 28 días de fabricación para probetas de morteros fabricados con la sustitución de 10 y 15% de cemento portland por ceniza volante y relaves mineros. Los valores de resistencia mecánica se correlacionaron en primer lugar con la etapa temprana (3 y 7 días) y madura (14 y 28 días) de su fabricación, así como con la caracterización física mediante difracción de rayos X, tamaño de partícula y microscopía electrónica de barrido. Los resultados mostraron que, a edades tempranas, la adición de ceniza volante no aumentó la resistencia a la compresión, en cambio, para la edad madura a los 28 días de fabricación, la resistencia a la compresión tuvo un incremento sustancial, por lo que de esta manera se demostró que la ceniza volante debe considerarse como materia prima de valor agregado y utilizarse como aditivo para sustituir parte del cemento en la fabricación de morteros así mismo las resistencias a la compresión en los morteros adicionados con jal se ven negativamente afectadas, a los tres días hay una diferencia con el mortero estándar con los morteros de 10 y 15% y a los 28 días esta diferencia se incrementa.

ABSTRACT

The use of aggregates in the manufacture of concrete is intended to increase the resistance to compression. Among the aggregates used, mainly due to its pozzolanic activity, fly ash stands out, a residue from the combustion of mineral coal in thermoelectric plants where quantities of between 80 and 250 kg of fly ash/ton of coal burned are generated (Robayo et al. 2016). Due to its high content of calcium oxides, silicon dioxide and aluminum oxides, this residue can be used as an additive in the manufacture of mortars and thus replace part of the Portland cement. In this work, the mechanical resistance was evaluated at 3, 7, 14 and 28 days of manufacture for mortar specimens manufactured with the substitution of 10 and 15% of portland cement by fly ash and mine tailings. The mechanical resistance values were firstly correlated with the early (3 and 7 days) and mature (14 and 28 days) stage of its manufacture, as well as with the physical characterization by means of X-ray diffraction, particle size and electron microscopy. sweep. The results showed that, at early ages, the addition of fly ash did not increase the compressive strength, on the other hand, for the mature age the compressive strength had a substantial increase, thus it was demonstrated that the ash Flywheel should be considered as a value-added raw material and used as an additive to replace part of the cement in the manufacture of mortars. Likewise, the compressive strengths in mortars added with jal are negatively affected, after three days there is a difference with the standard mortar with the 10 and 15% mortars and after 28 days this difference increases.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sistema de combustión del carbón pulverizado (Niksa, 2020).....	22
Figura 2 Combustión de una partícula de carbón (Pedro Fernández Díez, 2008).	23
Figura 3 Principios fundamentales del quemador (Pedro Fernández Díez, 2008)	24
Figura 4 Banco de almacenamiento de relaves mineros.....	29
Figura 5 Comparativa de resistencia a la compresión de CPO 40 y CPO 30	38
Figura 6 Polimorfos del C3S en función de la temperatura	39
Figura 7 Polimorfos del C2S en función de la temperatura	40
Figura 8 Evolución de calor durante las etapas de hidratación del cemento Portland.	43
Figura 9 Tipos de materiales pétreos (Universidad de Granada, 2012).....	44
Figura 10 Componentes del concreto	46
Figura 11 Muestreo de materiales pétreos en mina	49
Figura 12 Cuarteo de muestras para agregados pétreos (NMX-C-170-1997- ONNCCE, 1997).....	50
Figura 13 torre de tamices normalizados	52
Figura 14 Comparativo de colores respecto de una muestra.....	54
Figura 15 Secado de materiales pétreos.....	56
Figura 16 Procedimiento para cálculo de revenimiento.....	57
Figura 17 Diseño experimental.....	61
Figura 18 Molde para especímenes	64
Figura 19 Proceso de mezclado.....	64
Figura 20 Orden de compactación	65
Figura 21 Preparación de cubos	66
Figura 22 Desmolde de cubos.....	66
Figura 23 Curado de especímenes de 5 x 5 x 5 cm	67
Figura 24 Máquina de compresión simple.....	68
Figura 25 Especímenes para prueba de resistencia a la compresión	68
Figura 26 Prueba de resistencia a la compresión de cubos de mortero.....	69
Figura 27 Muestra de mortero en alcohol isopropílico.....	69
Figura 28 Almacén a cielo abierto de jal y tamizado	71

Figura 29 Cuarteador JONES	71
Figura 30 Proceso de molienda.....	73
Figura 31 Mezclador mecánico	74
Figura 32 Equipo para Difracción de Rayos X.....	75
Figura 33 Microscopio Electrónico de Barrido.....	76
Figura 34 Microscopio Electrónico de Barrido con la técnica acoplada de (XEDS)	77
Figura 35 micrografías del cemento CPC	78
Figura 36 Análisis elemental del CPO por (XEDS) imagen y espectro.	80
Figura 37 Difractograma del cemento (CPC)	81
Figura 38 ATP de cemento portland compuesto	82
Figura 39 a, b, c y d Micrografía electrónica de barrido de la microestructura de la Ceniza volante.....	84
Figura 40 Análisis elemental de la ceniza volante por (XEDS) imagen y espectro.	85
Figura 41 Curva de proporción porcentual en volumen del diámetro de la ceniza volante.....	86
Figura 42 Difractograma de Ceniza Volante	87
Figura 43 Micrografías de relaves mineros	88
Figura 44 Espectroscopia de energía dispersiva de relaves mineros	88
Figura 45 Difractograma de relave minero	89
Figura 46 Difractograma de mortero estándar a los 3, 7, 14 y 28 días de fabricación y evolución de las fases de C Calcita ($C Ca O_3$), D Dolomita ($CCa_{0.5}Mg_{0.5}O_3$), P Portlandita hidróxido de calcio (CaH_2O_2) y Cr Cristobalita (O_2Si).....	93
Figura 47 . Difractograma de mortero con 10% de sustitución de CV a los 3, 7, 14 y 28 días de fabricación y evolución de las fases de C Calcita ($C Ca O_3$), D Dolomita ($CCa_{0.5}Mg_{0.5}O_3$), P Portlandita hidróxido de calcio (CaH_2O_2) y Cr Cristobalita (O_2Si)	93
Figura 48 Difractograma de mortero con 15% de sustitución de CV a los 3, 7, 14 y 28 días de fabricación y evolución de las fases de C Calcita ($C Ca O_3$), D Dolomita	

(CCa _{0.5} Mg _{0.5} O ₃), P Portlandita hidróxido de calcio (CaH ₂ O ₂) y Cr Cristobalita (O ₂ Si	94
Figura 49 Difractograma a los 28 días del mortero estándar, con 10% y 15% de sustitución de CV a los 3, 7, 14 y 28 días de fabricación y evolución de las fases de C Calcita (C Ca O ₃), D Dolomita (CCa _{0.5} Mg _{0.5} O ₃), P Portlandita hidróxido de calcio (CaH ₂ O ₂) y Cr Cristobalita (O ₂ Si	94
Figura 50 Micrografía del mortero estándar, 10 y 15% de sustitución de cemento portland con ceniza volante a los 28 días de fabricación	96
Figura 51 SEM de: a), b) muestras de morteros sin ceniza volante. b), c) muestras de morteros en sustitución del cemento Portland al 10% de cenizas volantes. d), e) muestras de morteros en los que se sustituya el cemento Portland por un 15% de ceniza volante.	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación del cemento (NMX-C-414-ONNCCE-2017 2017).....	36
Tabla 2 Composición química del cemento (CEMEX 2017).....	37
Tabla 3 Clasificación de una mezcla de acuerdo a su revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE-2010 2010).	56
Tabla 4 Diseño de mezclas con adición de ceniza volante	62
Tabla 5 Diseño de mezclas con adición de jal.....	73
Tabla 6 Características de la técnica (DRX).....	75
Tabla 7 Características de la técnica (SEM)	76
Tabla 8 Características de la técnica (XEDS)	77
Tabla 9 Análisis elemental del CPO por (XEDS).....	80
Tabla 10 Análisis elemental de ceniza volante por (XEDS).	85
Tabla 11 Resistencia a la compresión en MPa de morteros con adición de ceniza volante.....	90
Tabla 12 Resistencia a la compresión en MPa de morteros con adición de jal.....	98

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Resistencia a la compresión en MPa de morteros con ceniza volante ..	91
Gráfica 2 Resistencia a la compresión en MPa de morteros con jal	99

DEDICATORIA

A nuestro Padre Eterno y la Virgencita de San Juan de los Lagos, a mis papas Javier y Elodia, a mi pequeña hija María Elena, y a mi esposa, compañera y cómplice de nuestras historias, Wendy.

Esta tesis está escrita para mi padre, quien me ha enseñado y sigue enseñándome que la mejor recompensa que se puede tener es la que se gana uno mismo trabajando con pasión. A mi madre, quien día a día de su trabajo me enseña con el ejemplo que inclusive la tarea más compleja y difícil se puede lograr si se hace poco a poco, como la hormiga que lleva su sustento a su hogar.

A mi esposa y mi hija que, con su apoyo incondicional, amor y confianza, pese a cada una de las pruebas que se nos presentan me impulsan a desarrollarme como un ser humano con las capacidades intelectuales, emocionales y profesionales.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la hermosa virgencita de Guadalupe por bendecir mi vida y la de mi familia, por ser guía y fe a lo largo de nuestra existencia, ser la fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad donde nos abrazamos a nuestro amor.

A mi esposa Wendy, por su apoyo y ánimos que me brinda día con día para alcanzar nuevas metas, tanto profesionales como personales.

A mi hija María Elena, a quien siempre amaré y cuidaré para verla hecha una persona hábil y que pueda valerse por sí misma.

A mis papas, quienes son mi ejemplo.

A las autoridades y personal que hacen la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por confiar en mis habilidades y aptitudes; abrirme las puertas y permitirme realizar el proceso de investigación dentro de su institución.

A mi director de tesis Dr. Julio Cesar Juárez Tapia principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y motivación me orientó en la investigación. A mi comité revisor integrado por: el Dr. Miguel Pérez Labra, el Dr. Martin Reyes Pérez y el Dr. Edgar Cardoso Legorreta por sus aportaciones, enseñanzas y apoyo

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su gestión, apoyo y patrocinio para la beca otorgada.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El origen del concreto se remonta a 2 siglos A. de C., en Roma, cuando utilizaron mezclas de caliza calcinada, tobas volcánicas y piedras, para construir algunas de las estructuras que hoy todavía subsisten, por ejemplo, el panteón o la iglesia de Santa María de los Mártires, cuya cúpula, de más de 44 metros de claro, es de concreto simple; y está aligerada por medio de casetones (Simonnet, 2009).

Sin embargo, durante el siglo 7 de nuestra era, con la caída del imperio Romano su uso fue disminuyendo, y fue hasta el siglo XVIII que vuelve a hacer utilizado por los ingleses, cuando en 1756, John Smeaton lo aplica en la reconstrucción del Faro de Adystone, en la costa sur de Inglaterra (Gombrich et al., 1997).

En 1817, Vicat, propuso por primera vez el procedimiento de fabricación del cemento, que en términos generales se sigue utilizando hoy en día. Sin embargo, fue hasta 1824 cuando Joseph Aspdin, obtuvo la patente para fabricarlo (Sánchez, 2002).

El prototipo del cemento moderno fue producido en 1845 por Isaac Johnson, quien por primera vez utilizó una temperatura suficientemente elevada, para formar clinker de la arcilla y la piedra caliza, utilizadas como materia prima. En ese mismo año, Lambot, comenzó a construir en el sur de Francia, objetos en los que combinaba el concreto y el acero, dando origen al concreto reforzado. Pero tuvieron que pasar 16 años para que Francois Coignet publicará en París por primera vez, el papel que corresponde al concreto y al acero como partes del nuevo material.

Joseph Monier fue el primero en darse cuenta de la importancia industrial del concreto reforzado, por lo que, tomando sus ideas, se construyó en 1875, el primer puente de concreto reforzado cerca de Chazete en Francia, con un claro de 16.5 metros. Sin embargo, en este país el concreto no tuvo un impacto tan favorable; y la patente de Monier fue adquirida por la casa Wayss de Berlín, donde se impulsó

su desarrollo. Sin embargo, el concreto reforzado se debe principalmente al francés Freyssinet, quien empezó fabricando postes para transmisión de energía eléctrica, a principios de 1933 (Gombrich et al., 1997).

La definición dada por la American Society for Testing and Materials (ASTM) en su norma (ASTM-C-125, 2011) define el término de concreto a “un material compuesto que consiste esencialmente de un medio conglomerante dentro del cual están embebidas las partículas o fragmentos del agregado; en el concreto de cemento hidráulico, el conglomerante está formado por una mezcla de cemento hidráulico y agua”, en esta misma norma también se define el término de agregado como “material granular, como arena, grava, triturado piedra o escoria de alto horno de hierro, utilizada con un medio para formar hormigón o mortero de cemento hidráulico” sin embargo la diferencia entre concreto y hormigón es meramente dialectal. A su vez en la norma (ASTM-C-270, 2011) hace mención sobre la confusión que puede presentarse al referirse a un mortero o concreto ya que por la norma ASTM-C-125 un mortero puede considerarse como un concreto, no obstante la norma ASTM-C-270 menciona que las principales diferencias entre concreto y mortero es la consistencia y método de colocación.

En la actualidad la producción de cemento y la combustión de combustibles fósiles, es considerado por Gregg y colaboradores como el principal impulsor antropogénico del cambio climático (Gregg et al., 2008)

Una de las alternativas para llevar a cabo el reciclaje de los relaves y de la ceniza volante, consiste en incorporarlos en la construcción como sustitutos del cemento Portland, para la fabricación de concreto utilizado en estructuras que resistan los efectos ambientales, como por ejemplo losas, muros de contención, cimientos, presas, etc. Siendo el material ideal para este propósito el concreto.

La ceniza volante es un subproducto de la industria eléctrica, esta se genera por la quema de carbón finamente molido, que es empleado como combustible para la generación de calor. La actividad puzolánica de las cenizas volantes se define como la actitud del material para fijar la cal (CaO) a temperatura ambiente y formar

compuestos que tengan propiedades hidráulicas. Esta característica ya ha sido estudiada en el año 2000 por Santaella (Santaella, 2000), entendiéndose por propiedad hidráulica la aptitud de dicho producto para endurecer en presencia de agua.

Debido a este estudio también se ha propuesto a la ceniza volante como un aditivo o como sustituto del cemento portland en bajos porcentajes, concluyendo que esta ceniza tiene propiedades cementantes, es decir que favorece la resistencia a la compresión por las interacciones químicas con el cemento y el agua (Siddique, 2004)., además que está directamente relacionada con la resistencia que puede alcanzar el concreto al utilizarse como un sustituto de cemento, pues se ha comprobado que reduce la porosidad del hormigón (Erdoğdu & Türker, 1998).

En la minería moderna uno de los principales problemas de los subproductos de la recuperación de minerales llamados comúnmente “jales” o “relaves” es su disposición y almacenaje, una característica de estos jales provenientes de una planta de beneficio que utiliza un proceso físico químico de separación de minerales finamente molidos, es el tamaño de partícula pues esto favorece la actividad puzolánica de estos materiales.

Es plenamente conocido que el concreto en la construcción es utilizado para resistir esfuerzos de compresión, a los 28 días de manera internacional se acepta como su resistencia última, por esta razón en el presente estudio se estudia la evolución estructural y desempeño mecánico del concreto sin adición (estándar) y adicionado con ceniza volante y relaves mineros de 0 a 28 días, considerando el día 0 cuando inicia la hidratación del cemento.

Cuando se inicia la hidratación del cemento este reacciona químicamente, el cemento está compuesto principalmente de silicato tricálcico (alita), silicato dicálcico (belita), aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico (ferroaluminato) (Bullard et al., 2011) al reaccionar con el agua se inicia una transformación de fases mineralógicas las principales son el silicato cálcico hidratado (C-S-H) e hidróxido de

calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CH), estas son las responsables de las propiedades mecánicas del cemento endurecido.

El desempeño mecánico se lleva a cabo por prueba de resistencia a la compresión siguiendo la normativa ONNCCE a los 3, 7, 14 y 28 días, la evolución estructural se realiza por técnicas de caracterización por medio de Difracción de rayos X (DRX), Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) en los mismos días que se realiza la prueba de resistencia a la compresión.

Aunque existen diversas normativas y legislaciones aplicables vigentes en México en relación a la fabricación de concreto, su aplicación es escasa y en algunos casos nula. De este gran abanico de normas elaboradas por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., (ONNCCE, 2019) así mismo se dan a conocer brevemente las más relevantes enfocadas a la producción de concreto.

Dichas normativas se pueden clasificar en dos vertientes categorías, la primera describe al análisis y parámetros de los agregados, esto implica el estado en que los materiales están antes de ser mezclados; y en cuanto a la segunda mostrará los análisis y parámetros del concreto como tal. Es necesario mencionar, que esta lista puede ampliarse hasta tener control de todos y cada uno de los procesos que intervienen dentro de la fabricación de concreto.

Por lo antes descrito la presente investigación propone el uso de relaves y ceniza volante como aditivo para el concreto, considerando que se pueden obtener las fases estructurales y propiedades mecánicas adecuadas, que lo convertirían en un material ideal y para la construcción de estructuras que resistan los efectos ambientales, como por ejemplo losas, muros de contención, cimientos, presas, entre otros.

Justificación

El estudio sobre el efecto que produce la ceniza volante y residuos mineros (jales), usados como sustitutos del cemento Portland, sobre la resistencia a la compresión y la evolución microestructural dentro de un periodo de 28 días. Permitirá a la industria de la construcción reducir el uso de cemento lo cual beneficia económicamente al reducir los costos de fabricación de concreto y disminuir los volúmenes acumulados de estos sub-productos, aumentando la vida útil de los depósitos destinados a su almacenamiento.

Es bien conocido que el cemento Portland es uno de los materiales más antiguos usados en la construcción, sin embargo, después de casi un siglo de estudios de sus propiedades, todavía quedan algunas cosas que debido a su complejidad no se han podido resolver, por ejemplo la caracterización de los productos de hidratación, especialmente con respecto a su estructura interna y el efecto de ésta y de otros componentes sobre las propiedades y comportamiento del cemento.

El cemento Portland se fabrica por el calentamiento de una mezcla de caliza y arcilla a temperaturas alrededor de los 1450 °C provocando una fusión parcial, este producto es llamado Clinker, después de su calcinación se muele y se mezcla con un pequeño porcentaje de yeso. El Clinker contiene cuatro fases principales: silicato tricálcico (alita), silicato dicálcico (belita), aluminato tricálcico y ferro-aluminato tetracálcico (ferroaluminato) (Bullard et al., 2011), siendo las dos primeras las que constituyen alrededor del 75% en peso del cemento (Lea et al., 2019).

Las propiedades mecánicas del concreto inician una vez que el cemento es hidratado, los componentes del clinker reaccionan con el agua formando una pasta de cemento que está conformada por las fases silicato cálcico hidratado (C-S-H), hidróxido de calcio Ca(OH)_2 y sulfoaluminato de calcio hidratado.

Destacando que la fase C-S-H es el producto de hidratación del cemento portland que se ha convertido actualmente en un reto para su estudio, debido a que es la responsable de proporcionar las principales características del cemento endurecido.

Por lo que el desarrollo del presente estudio es viable y factible debido a que se estudiará la evolución estructural de las fases, (C-S-H), Ca(OH)_2 por la hidratación del cemento adicionado con ceniza volante y residuos mineros, en un periodo de 28 días, mediante la caracterización por DRX, MEB y EDS a concretos a distintas edades, deteniendo el proceso de hidratación a los 3, 7, 14, 21 y 28 días lo que permitirá también revelar los cambios en la resistencia a la compresión.

Hipótesis

En anteriores investigaciones el uso de ceniza volante y relaves han sido utilizados, obteniendo resultados muy positivos, por lo cual su uso a nivel industrial actualmente es una realidad, sin embargo, se debe continuar investigando acerca de sus características micro estructurales desde su fabricación hasta determinado tiempo. Por lo que la presente propuesta de investigación está orientada a utilizar “La adición de ceniza volante y residuos mineros, debido a que favorecen la formación de fases silicato cálcico hidratado (C-S-H), las cuales estarán en función de las concentraciones de los residuos propuestos, esperando además que, a partir de los 21 días posteriores a su fabricación estas fases alcancen su mayor incremento.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el efecto de la adición de ceniza volante y/o residuos mineros en la evolución estructural y resistencia a la compresión, de morteros en un periodo de 28 días, mediante la caracterización química, estructural, morfológica y mecánica con la finalidad de relacionar las diferencias de las fases formadas a distintas concentraciones de los aditivos con un estándar de comparación.

Objetivos específicos

Recolectar y caracterizar las materias primas empleadas para la fabricación de los especímenes de morteros y concretos, por medio de las técnicas de Difracción de rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), para conocer de manera precisa su composición, morfológica, tamaño de partícula y estructura.

Fabricar 4 mezclas de mortero con máximo 15%, de sustitución de ceniza volante y relaves mineros, respecto al cemento portland, para evaluar la resistencia a la compresión dentro de los 28 días de fabricación y comparar los valores obtenidos con los diferentes porcentajes.

Realizar la caracterización mecánica, química, morfológica y microestructural de los distintos especímenes de mortero y concreto, por medio de las técnicas analíticas y resistencia a la compresión, para conocer su evolución estructural y mecánica con cada porcentaje de adición.

Correlacionar los resultados de la evolución estructural y resistencia a la compresión en función de los porcentajes de adición de los especímenes de mortero y concreto.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

Ceniza volante

De acuerdo con la norma (ASTM C618 - 03, 2003) la ceniza volante se define como: “El residuo finamente dividido que resulta de la combustión del carbón mineral o finamente molido y que es transportado en el flujo gaseoso”.

Para evitar algunas confusiones también menciona que no son: (1) la quema de basura municipal o algún otro tipo de basura con carbón; (2) la inyección de cal directamente dentro del calentador para remover azufre; o (3) la quema de basura industrial o municipal en incineradores comúnmente llamados “incineradores de ceniza.

Partiendo de lo anterior, se define la ceniza volante como un subproducto que se origina de la quema de carbón finamente molido, utilizado en termoeléctricas para la generación de electricidad.

Generación de ceniza volante

Teniendo la materia prima, inicia todo un proceso que empieza con la pulverización, esto se aprecia en la figura 1, donde se percibe el modelo de una central carboeléctrica. El método que se utiliza en la actualidad en la quema del carbón es el denominado sistema de combustión en hogar de carbón pulverizado, el cual consiste en inflamar el carbón finamente molido y manteniéndolo en una suspensión de polvo fino en un hogar abierto, (García Ortiz, 2019). Los recientes quemadores de carbón pulverizado (PC) permiten lograr una alta eficiencia de ignición y unas bajas emisiones de gases. El régimen de quema del carbón se controla, en gran medida, por la superficie global que ofrece el conjunto de las partículas de combustible, (García Ortiz, 2019); con una pulverización del carbón equivalente a partículas con diámetro de 50 micras o menos, el carbón de cada partícula se puede consumir por completo en 1 o 2 segundos, aproximadamente.

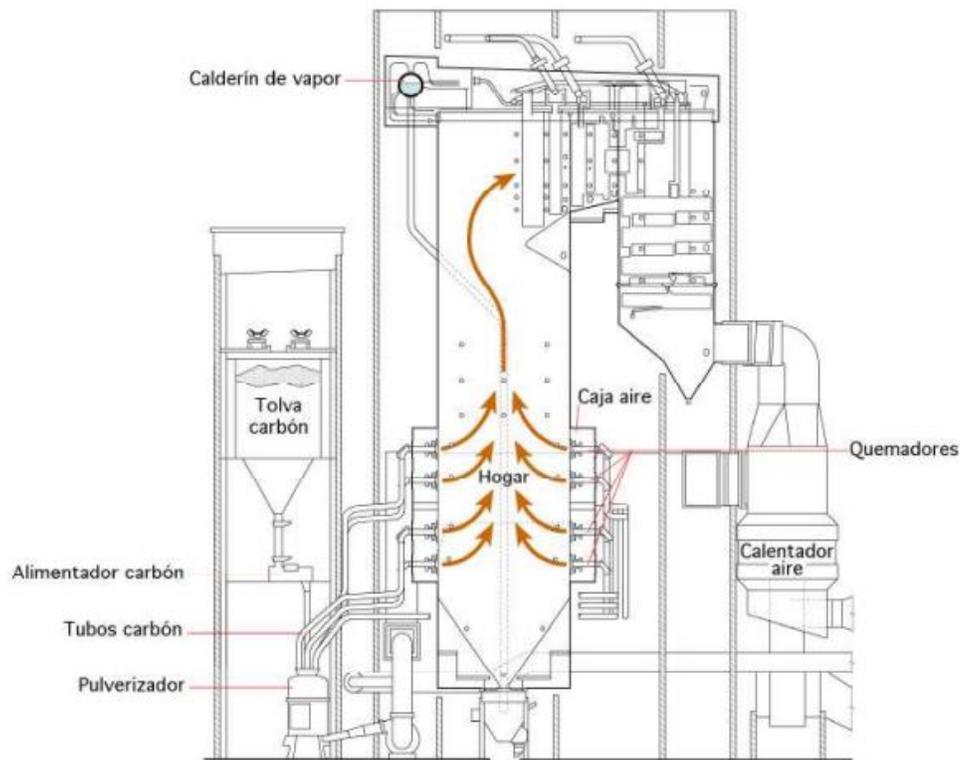


Figura 1 Sistema de combustión del carbón pulverizado (Niksa, 2020)

La manera de quemar el carbón pulverizado estriba de la categoría y propiedades del mismo, y de las particulares condiciones del hogar. En el momento en que una partícula de carbón entra en el hogar, su temperatura superficial aumenta debido a la transferencia de calor por radiación y convección, desde los dos tipos de fuentes:

- Gases (humos) del hogar
- Otras partículas que se encuentran en combustión

Conforme aumenta la temperatura de la partícula, la humedad de la misma vaporiza y las materias volátiles se desprenden, inflaman (ignición) y queman casi inmediatamente, aumentando la temperatura de la partícula residual, identificada normalmente como subcoque (char), que se consume a alta temperatura, dejando como residuo el contenido en ceniza y una pequeña parte de carbono no quemado (inquemado) como lo podemos ver en la figura 2.

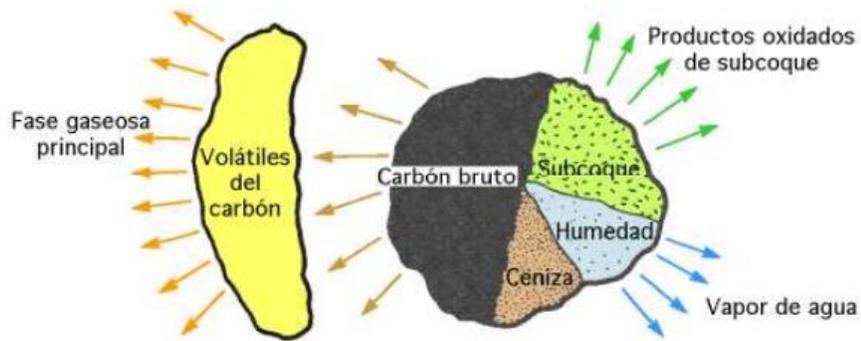


Figura 2 Combustión de una partícula de carbón (Pedro Fernández Díez, 2008)

Proceso de la quema de carbón

El aire primario, se caracteriza por tener temperaturas entre 130 y 200°F (54 ÷93°C), lo cual provoca que transporte el carbón pulverizado directamente desde el pulverizador hasta los quemadores, esto a un régimen de velocidad que fija el adecuado control de combustión, de acuerdo a los requisitos de la demanda.

Por otra parte, el aire secundario se abastece por los ventiladores de tiro forzado y se precalienta hasta unos 600°F, como consecuencia, la mayor parte se suministra a las cajas de aire que envuelven a los quemadores.

Además, el aire secundario suministrado a los quemadores se mezcla con el carbón pulverizado (aire primario de transporte), en la garganta del quemador, lo que permite que el carbón haga ignición, por lo tanto, comienza a quemarse iniciándose el proceso de la combustión continua, los gases y el combustible no quemado se mueven desde la boca del quemador hacia el eje vertical del hogar de la caldera, por el que ascienden, (García Ortiz, 2019). El quemado final del subcoque depende de: las propiedades del carbón, la finura de las partículas, el exceso de aire, la mezcla aire + combustible y el medio ambiente térmico, (García Ortiz, 2019)

Por último, los productos de la combustión dejan el hogar y penetran en el paso de convección de la caldera, una vez que se han enfriado lo suficiente para minimizar el ensuciamiento de las superficies de convección.

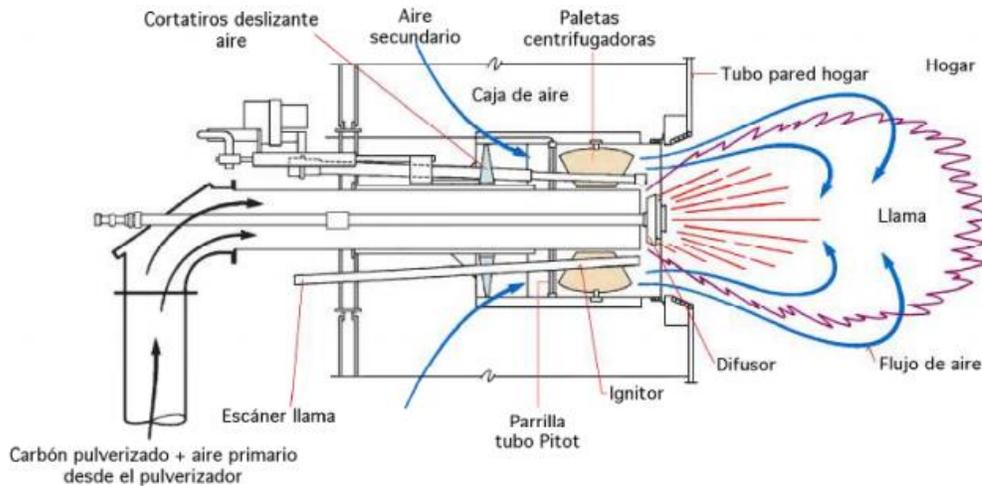


Figura 3 Principios fundamentales del quemador (Pedro Fernández Díez, 2008)

Obtención de ceniza volante

Una de las principales características de los combustibles fósiles es que todos, con excepción del gas natural, tiene un porcentaje de materia no combustible también conocido como ceniza, esta es transportada por los gases producidos por la quema de los combustibles, en este caso del carbón.

Se debe considerar que debido a que estas partículas de ceniza están consideradas como un contaminante para el medio ambiente, los humos producidos deben ser filtrados para quitar estas cenizas, que son conocidas con el nombre de volante por ser transportadas por los humos, (García Ortiz, 2019). Existen distintos tipos de filtros para sustraer estas partículas del flujo gaseoso, estos pueden ser:

- Precipitadores electrostáticos
- Filtros de tela o cámaras de sacos
- Colectores mecánicos
- Depuradores Venturi

Los filtros más utilizados con el objetivo de recuperar las cenizas volantes son los precipitadores electrostáticos, estos se caracterizan por usar placas sobre las cuales circulan los humos producidos de la quema de carbón para cargar las

partículas electrostáticamente, esto trae como consecuencia que la ceniza puede adherirse a una superficie de contacto, para su posterior recolección.

Diariamente se generan cantidades considerables de ceniza volante debido al alto consumo de carbón, la combustión de 1 Ton de carbón genera un promedio de entre 80 a 250 Kg de residuos, esto depende del tipo de carbón así como de las condiciones de ignición (Robayo et al., 2016).

Relaves mineros

Los relaves, también llamados vertederos de minas, limos, colas, desechos, residuos de lixiviación y/o lodos, son los materiales que quedan después del proceso de separación de la fracción valiosa de la fracción no económica (ganga) de un mineral. Los relaves son distintos de la sobrecarga, que es la roca de desecho u otro material que recubre un mineral o cuerpo mineral y se desplaza durante la minería sin ser procesado (Pérez, 2012).

La extracción de minerales se puede hacer de dos maneras: la extracción de placer, que utiliza agua y la gravedad para concentrar los minerales valiosos, o la extracción de roca dura, que pulveriza la roca que contiene el mineral y luego se basa en reacciones químicas para concentrar el material de interés. En este último, la extracción de minerales requiere trituración, es decir, moler el mineral en partículas finas para facilitar la extracción de los elementos de interés. Debido a esta trituración, los relaves consisten en una suspensión de partículas finas, que van desde el tamaño de un grano de arena hasta unos pocos micrómetros. Los relaves de las minas se producen generalmente en el molino en suspensión, que es una mezcla de finas partículas minerales y agua (Valenzuela & Rossani, 2019).

Las operaciones mineras tempranas a menudo no toman medidas adecuadas para hacer que las áreas de relaves fueran seguras para el medio ambiente después del cierre. Las minas modernas, particularmente aquellas en jurisdicciones con regulaciones mineras bien desarrolladas y aquellas operadas por compañías mineras responsables, a menudo incluyen la rehabilitación y el cierre adecuado de las áreas de relaves en sus costos y actividades.

El relave de minería no es en principio un residuo tóxico, sino fundamentalmente roca molida y agua, por lo que no es considerado un material tóxico. La toxicidad puede aparecer en estados posteriores, cuando ciertos relaves reaccionan con agua y solubilizan tóxicos que se pueden transportar disueltos en agua. Para aquellos relaves que contienen elementos que pueden ser considerados tóxicos para el ser humano, como arsénico, cianuro, cobre, cinc, cromo, plomo, entre otros. Las empresas mineras deben resguardar, de acuerdo con la ley, que dichos relaves tóxicos no entren en contacto con la población, para proteger la salud humana y el medio ambiente (Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), 2019).

Hidrometalurgia extractiva

La hidrometalurgia es la rama de la Metalurgia Extractiva que estudia todos los procesos extractivos que ocurren en medios acuosos, que permiten la extracción y obtención de metales y/o compuestos desde sus minerales o materiales de reciclaje (chatarras, escorias, cementos metálicos, barros anódicos, etc).

La hidrometalurgia se desarrolla en general en tres etapas sucesivas:

- La primera etapa es conocida como “lixiviación” y consta de la disolución selectiva de los metales en una solución acuosa, desde los minerales que los contienen.
- En la segunda etapa se realiza el procesamiento y transformación de los metales disueltos en el medio acuoso producido en la etapa anterior, mediante agentes externos que permiten la “purificación y/o concentración” de los metales que se busca producir.
- En la tercera etapa se recuperan selectivamente las especies metálicas disueltas en el medio acuoso generado. Esta etapa es conocida como “precipitación”, la cual genera como producto final el metal, ya sea en forma pura o como parte de un compuesto que lo contiene.

En general en hidrometalurgia se llevan a cabo reacciones del tipo sólido-líquido, salvo en el caso de la extracción por solventes, donde se produce un intercambio

líquido-líquido, pero con líquidos inmiscibles. Existen también algunos casos en que las reacciones se producen entre gas y líquido. Se trata en consecuencia siempre de reacciones heterogéneas.

En líneas generales las principales ventajas de los procesos hidrometalúrgicos son:

- Sus procesos tienen un menor impacto ambiental
- Bajos costos de inversión para un tamaño de planta dado
- Posibilidad de expansión desde una operación pequeña a otra de tamaño mediano
- Algunos procesos hidrometalúrgicos permiten un ahorro considerable de combustible
- Existe un gran control sobre las reacciones químicas
- Es posible una gran automatización.

La Lixiviación es la operación unitaria fundamental de la hidrometalurgia y su objetivo es disolver en forma parcial o total un sólido con el fin de recuperar algunas especies metálicas contenidas en él. El método de lixiviación corresponde a la forma en que se contactan las soluciones lixiviantes con las menas con contenidos metálicos de interés. Los métodos más conocidos son:

- 1.- Lixiviación In Situ, lixiviación en botaderos (dump leaching).
- 2.- Lixiviación en pilas (heap leaching).
- 3.- Lixiviación por percolación o en Bateas (vat leaching)
- 4.- Lixiviación por agitación
- 5.- Lixiviación a presión.

Aunque estos tipos de lixiviación se puede aplicar en forma muy eficiente a la mayoría de los metales que están contenidos en menas apropiadas para este

proceso, tales como cobre (minerales sulfurados y oxidados), oro (nativo), plata (nativa), aluminio (óxidos), zinc (óxidos y sulfuros), níquel (sulfuros y óxidos) y las formas minerales de los metales cobalto, zirconio, hafnio, etc; en esta oportunidad se hará referencia solamente a la técnica de Lixiviación en Pilas como la más usada actualmente.

La lixiviación en pilas es similar a la operación que se lleva a cabo con los botaderos, a diferencia de que en este caso el mineral tiene una ley más alta y, por ello, económicamente paga mejor su procesamiento, incorporando una planta de chancado previa, con etapas de chancado primario, secundario y terciario. En este caso al construir las pilas con mineral chancado se hace necesario aglomerar los finos generados, de forma de restituir la permeabilidad al lecho de mineral a una similar a la que tiene el mineral sin chancar que se usa en los botaderos.

La secuencia combinada de lixiviación de mineral chancado, aglomerado con agua y curado con ácido concentrado se conoce como Proceso de Lixiviación TL y su uso está generalizado para minerales de cobre tanto oxidados como sulfurados. Para el tratamiento de los minerales de oro también se usa este tipo de pilas de lixiviación con aglomeración, carguío, impermeabilización de la base y regadío, pero agregando una etapa previa de acondicionamiento y aglomeración con agua, cal y cemento de forma de lograr acondicionar a pH alcalino el lecho de la pila, dando así una buena rigidez a los finos aglomerados. El resto de los sistemas tanto de riego como de recolección de soluciones son similares al caso de la lixiviación con ácido.

Producción de relaves mineros

La producción de relaves es una parte integral de la industria minera. Los desechos son los residuos que quedan después de que los minerales valiosos se extraen de la roca en un proceso conocido como concentrado. Este residuo consiste en una mezcla de agua, roca triturada y productos químicos utilizados en el proceso de extracción.

La generación de residuos mineros se inicia con la trituración y molienda del mineral extraído de la mina. Este paso reduce el tamaño del mineral en partículas más

pequeñas, lo que facilita la liberación de minerales valiosos. Después de triturar el mineral, se agrega agua y productos químicos para formar una lechada llamada pulpa.

El lodo es transportado por tubería a la planta de tratamiento de relaves, donde se realiza la separación sólido-líquido. En estas instalaciones, el desmonte pasa por una serie de etapas para separar el agua de los sólidos. Esto se consigue mediante diferentes métodos como la sedimentación, la filtración o la flotación. Durante la separación, los sólidos más pesados se hundirán en el fondo del estanque o en el espesador, mientras que el agua se recupera y recicla durante la extracción. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el agua reciclada puede contener residuos y productos químicos, por lo que debe tratarse adecuadamente antes de ser reutilizada o liberada al medio ambiente. Luego de que se lleva a cabo la separación sólido-líquido, los sólidos restantes, conocidos como desechos, se depositan en una estructura de almacenamiento adecuada. Esta estructura puede ser una represa de desechos o una instalación de almacenamiento de desechos, diseñada para almacenar desechos de manera segura durante largos períodos de tiempo.



Figura 4 Banco de almacenamiento de relaves mineros

En la figura 4 se observa un banco de almacenamiento de relaves mineros (jales), la gestión de desechos es un aspecto esencial de la producción minera porque los

desechos pueden contener sustancias peligrosas o contaminantes que presentan riesgos para el medio ambiente y la salud humana. Por ello, es necesario poner en marcha medidas de control y seguimiento para minimizar los impactos negativos. Uno de los desafíos asociados con la producción de relaves es la estabilidad de la estructura de almacenamiento.

Las presas y las instalaciones de almacenamiento de desechos deben diseñarse y construirse de manera segura para evitar fallas que puedan provocar la liberación de grandes cantidades de desechos y causar un daño ambiental significativo.

Orígenes del cemento

Desde que el ser humano superó la época de las cavernas, ha aplicado sus mayores esfuerzos a delimitar su espacio vital, satisfaciendo primero sus necesidades de vivienda y después levantando construcciones con requerimientos específicos.

De acuerdo con algunas investigaciones, los hallazgos más antiguos de los que se tiene conocimiento sobre el uso de mezclas cementantes datan de los años 7000 y 6000 a. C. cuando en las regiones de Israel y la antigua Yugoslavia respectivamente, se encontraron vestigios de los primeros pisos de concreto a partir de calizas calcinadas (*History of cement*).

Posteriormente, cerca al año 2500 a. C., se emplearon mezclas de calizas y yesos calcinados para pegar los grandes bloques de piedra que se utilizaron para la construcción de las pirámides de Giza en Egipto. En el año 1950 a. C. se emplearon mezclas similares para rellenar muros de piedra, así se construyó el mural de Tebas en Egipto; años después estas mezclas empezaron a ser utilizadas como material estructural. En el Mediterráneo occidental, cerca al año 500 a. C., los antiguos griegos adoptaron el arte de hacer concreto y más tarde, en el año 300 a. C. la civilización romana copió algunas técnicas para construir varias de sus obras, entre ellas el Foro Romano. Durante el siglo 11 a. C. en la población de Puzzolin n n n n n n n n , mezclando caliza calcinada con finas arenas de origen volcánico se desarrolló el cemento puzolánico. Esta mezcla fue empleada para la construcción del Teatro de Pompeya en el año 75 a. C. También se sabe que, utilizando rocas

de origen volcánico como agregado liviano y jarrones de barro incrustados para aligerar el concreto, se construyó el Coliseo Romano y el domo del Panteón con 50 metros de diámetro. Con la caída del Imperio Romano, el uso del concreto desapareció y fue recuperado por los ingleses hacia el año 700 a. C. En el siglo XVIII el concreto cobró gran importancia cuando el ingeniero John Smeaton aceptó el encargo de reconstruir el Faro de Edystone con un material resistente al viento, al fuego y al oleaje. Así, empezó a investigar diferentes mezclas de mortero hasta desarrollar un cemento hidráulico.

El 21 de octubre de 1824, Joseph Aspdin (*Standard Specifications for Architectural Cast Stone.pdf*) patenta el primer cemento portland, llamado así por su color grisáceo, similar al color de las rocas explotadas en la bahía de Portland en Inglaterra. La primera fábrica de cemento se instaló dos años después en Wakefield, Inglaterra. Más tarde, Isaac Johnson mejoró el proceso de producción incrementando la temperatura de calcinación, por lo que se le conoce como el padre moderno del cemento Portland.

Desde entonces y hasta ahora, el cemento se ha consolidado como el material de construcción por excelencia y su importancia queda constatada por el hecho de ser el material que más se produce en el mundo con cerca de 800 millones de toneladas al año. El crecimiento del cemento está directamente relacionado con el aumento de la población mundial y con el desarrollo de los países (obras de ingeniería civil, infraestructura, etc.). Se puede pensar que al menos en el corto plazo, el concreto y el mortero de cemento, seguirán siendo los medios más económicos de construir y su consumo continuará incrementándose en función del crecimiento de la población mundial, debido a sus principales características:

- Resistencia y durabilidad.
- Versatilidad.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Asequible.
- Resistente al fuego.

- Altamente disponible.

Este material no solo es impulsor de industrias como la de productos de cemento, sino también es fuente demandante de servicios y productos de otras industrias, como pueden ser empresas de transporte, las suministradoras de combustible y energía eléctrica, las proveedoras de sacos para envasar el cemento, las productoras de maquinaria y refacciones dentro y fuera de los países de origen.

En México las primeras fábricas de cemento iniciaron a principios del siglo XX; actualmente México posee la séptima empresa más importante del mundo en la producción de cemento, siendo Francia el primer productor más grande del mundo¹⁶

Aplicaciones generales

El concreto es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo debido a sus propiedades únicas y versatilidad. Es una mezcla de cemento, agregados (como arena y grava), agua y, en algunos casos, aditivos químicos. La capacidad de adaptación y las propiedades superiores del concreto lo convierten en un material de elección en una amplia gama de aplicaciones de construcción. En esta tesis, exploramos las aplicaciones generales del concreto y su importancia en la industria de la construcción.

El concreto es ampliamente utilizado en la construcción de edificios debido a su resistencia, durabilidad y capacidad de soportar cargas pesadas. Se utiliza en la construcción de cimientos, columnas, losas, muros y vigas. La versatilidad del concreto permite la creación de diseños estructurales complejos y la capacidad de resistir fuerzas sísmicas. Además, el concreto puede ser moldeado en diferentes formas y texturas, lo que brinda flexibilidad en el diseño arquitectónico.

Otra aplicación importante del concreto se encuentra en la construcción de infraestructura vial. El concreto se utiliza para pavimentos de carreteras, puentes y túneles. Los pavimentos de concreto ofrecen una superficie duradera y resistente al desgaste causado por el tráfico intenso y las condiciones climáticas adversas. Además, el concreto tiene una capacidad de carga alta y una vida útil prolongada,

lo que lo convierte en una opción ideal para estructuras viales que requieren resistencia y durabilidad a largo plazo.

El concreto es ampliamente utilizado en la construcción de estructuras hidráulicas, como presas, canales, acueductos y embalses. Estas estructuras requieren resistencia al agua y durabilidad, y el concreto es capaz de proporcionar estas propiedades. El concreto puede resistir la acción corrosiva del agua y brindar una barrera efectiva contra las fugas. Además, la capacidad de construir estructuras de concreto de gran escala permite la gestión eficiente del agua y el suministro de agua potable a las comunidades.

El concreto también encuentra aplicaciones en obras marítimas, como muelles, rompeolas y puertos. Estas estructuras están expuestas a condiciones marinas agresivas, como la acción de las olas y la corrosión del agua salada. El concreto marino, que contiene aditivos especiales para mejorar su resistencia a la corrosión, es utilizado para garantizar la durabilidad y la integridad estructural de estas construcciones en ambientes marinos adversos.

El concreto es ampliamente utilizado en la fabricación de elementos estructurales prefabricados, como paneles de pared, vigas, pilares y losas. Estos elementos se fabrican en fábricas bajo condiciones controladas y luego se transportan e instalan en el lugar de construcción. Las estructuras prefabricadas de concreto ofrecen ventajas significativas, como una mayor eficiencia en la construcción, una mayor calidad del producto final y una reducción en los plazos de construcción. Además, las estructuras prefabricadas de concreto son altamente versátiles y se adaptan a una amplia gama de aplicaciones en la construcción de viviendas, edificios comerciales e industriales.

El concreto también se utiliza ampliamente en la construcción de estructuras subterráneas, como túneles, estaciones de metro y alcantarillas. El concreto se utiliza para revestir las paredes y techos de estas estructuras subterráneas, brindando resistencia estructural, impermeabilidad y protección contra filtraciones de agua y suelos. Además, el concreto proyectado, también conocido como

concreto lanzado, se utiliza para estabilizar y reforzar el terreno en la construcción de túneles y excavaciones subterráneas.

El concreto tiene una amplia gama de aplicaciones en la industria de la construcción debido a su resistencia, durabilidad, versatilidad y capacidad de adaptación. Desde la construcción de edificios y estructuras viales hasta infraestructura hidráulica y obras marítimas, el concreto desempeña un papel fundamental en el desarrollo de proyectos de construcción seguros y sostenibles. Su uso en estructuras prefabricadas, construcciones subterráneas, agrícolas, de energía y obras de arte muestra la diversidad de aplicaciones y la importancia continua del concreto en la industria de la construcción.

Proceso de fabricación

Debe señalarse que es conocido que el cemento es producto de la calcinación de materiales silico calcáreos, finamente triturados que son calcinados a temperaturas entre los 1400 y 1600 °C, TESIS HUGO; para producir el famoso “Clinker” que por último es molido finamente en presencia de yeso, es en este momento que recibe el nombre de Cemento Portland. El proceso de fabricación del cemento se divide en tres grandes etapas (Duda, 2013):

1. Extracción, molienda y mezcla de materiales crudos

En esta fase se extraen los minerales necesarios, estos serán usados como materia prima, cabe recalcar que principalmente se necesitan materiales calcáreos que aporten óxido de calcio (CaO) así como materiales arcillosos que serán fuente de silicio (Si), aluminio (Al) y Hierro (Fe), los cuales serán molidos y mezclados.

2. Proceso de calcinación

En esta segunda fase, las materias primas son sometidas a temperaturas entre 1400 y 1600 °C, para que se lleven a cabo las reacciones químicas que otorgan las propiedades características al cemento, (García Ortiz, 2019); cuyo producto obtenido recibe el nombre de “Clinker”

Calizas + Arcillas $\xrightarrow[1400 \text{ a } 1600 \text{ }^\circ\text{C}]{\Delta^\circ\text{C}}$ Clinker

3. Molienda

Finalmente, al Clinker obtenido en la etapa dos se le agrega de un 3 a 5% de yeso con el fin de controlar la velocidad de hidratación (proceso en el cual se pone en contacto el agua con cemento), posteriormente es finamente molido y empacado, comercialmente en sacos de 50 kg con el nombre de cemento portland.

Clinker + Yeso $\xrightarrow{\text{Molienda}}$ Cemento Portland

Tipos de cemento portland y composición química

Básicamente existen cinco tipos de cemento que principalmente se distinguen por su composición y son determinados por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials o ASTM International) en la norma (ASTM C150/C150M-09, 2007).

Tipo I: es el cemento portland ordinal y el más usado en la construcción de viviendas, edificios, puentes, etc. Y este es usado cuando en el diseño de construcción no se especifica el uso de un cemento especial, (ASTM C150/C150M-09, 2007)

Tipo II: este cemento se distingue por tener cierta tolerancia a los sulfatos (sales), su uso más común es en tuberías de drenaje o puentes, (ASTM C150/C150M-09, 2007)

Tipo III: la principal característica de este cemento es que su resistencia a la compresión a los tres días es igual o similar a la que se obtendría con un cemento del tipo I o II, este cemento se usa cuando en la pieza que se desea fabricar se requiere desmoldar (retirar del molde) en un corto tiempo, (ASTM C150/C150M-09, 2007)

Tipo IV: es usado principalmente en sitios donde el concreto en estado fresco estará bajo temperaturas ambientales altas y se requiera un bajo calor de hidratación (calor producido al combinar el cemento con el agua), generalmente se utiliza en piezas donde se requiere un gran volumen de concreto, (ASTM C150/C150M-09, 2007)

Tipo V: principalmente se usa para la fabricación de estructuras portuarias, por su alta tolerancia a los sulfatos, (ASTM C150/C150M-09, 2007)

En este sentido, los cementos pueden clasificarse por acrónimo, el cual describe su composición o especificaciones de uso, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1 Clasificación del cemento (NMX-C-414-ONNCCE-2017 2017)

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

En la tabla 2, se exponen los dos principales compuestos de óxido de calcio CaO y óxido de silicio SiO₂; estos representan el 85 % de la totalidad de óxidos presentes en el cemento, es necesario resaltar que estos porcentajes pueden cambiar dependiendo de las proporciones con las que se mezclen las materias primas para la fabricación.

Tabla 2 Composición química del cemento (CEMEX 2017)

Óxido	% Peso	Nombre
CaO	63	Óxido de Calcio
SiO₂	22	Óxido de Silicio
Al₂O₃	6	Óxido de Aluminio
Fe₂O₃	2.5	Óxido Férrico
MgO	2.6	Óxido de Magnesio
K₂O	0.6	Óxido de Potasio
Na₂O	0.3	Óxido de Sodio
SO₃	2	Anhídrido Sulfúrico

Cemento Portland Ordinario (CPC) para la fabricación de mortero

El cemento portland ordinario tipo I, cumple básicamente los mismos principios que los otros tipos de cemento, sin embargo, es reconocible que este cemento tiene una baja tolerancia a los sulfatos y un calor de hidratación considerable, sin embargo, esto no significa que el concreto donde sea empleado no pueda tener tolerancia a los sulfatos y baja temperatura de hidratación, esto se lograría con el uso de aditivos que beneficien dichas propiedades, (García Ortiz, 2019)

El cemento más popular en la albañilería es el cemento portland ordinal en la clasificación 30 R, por otra parte, existe un 40R; se debe precisar que la principal diferencia es el comportamiento en la prueba de resistencia a la compresión. Es por ello, que como se puede ver en la figura 5, se grafica la resistencia a la compresión contra la edad de los morteros, estos tienen un distinto comportamiento en las curvas de resistencia, esto es porque mientras en un CPO-30R a los 7 días, alcanza

30 N/mm²; en el CPO-40R, a los mismos 7 días alcanza 40 N/mm², (García Ortiz, 2019)

Ahora bien, en lo que respecta la fabricación de los morteros de concreto se utiliza cemento CPC-30R, esto es porque en los procesos de producción y el tipo de fraguado al que son expuestos es ideal; porque el hecho de que la resistencia a la compresión la alcance en una menor cantidad de tiempo.

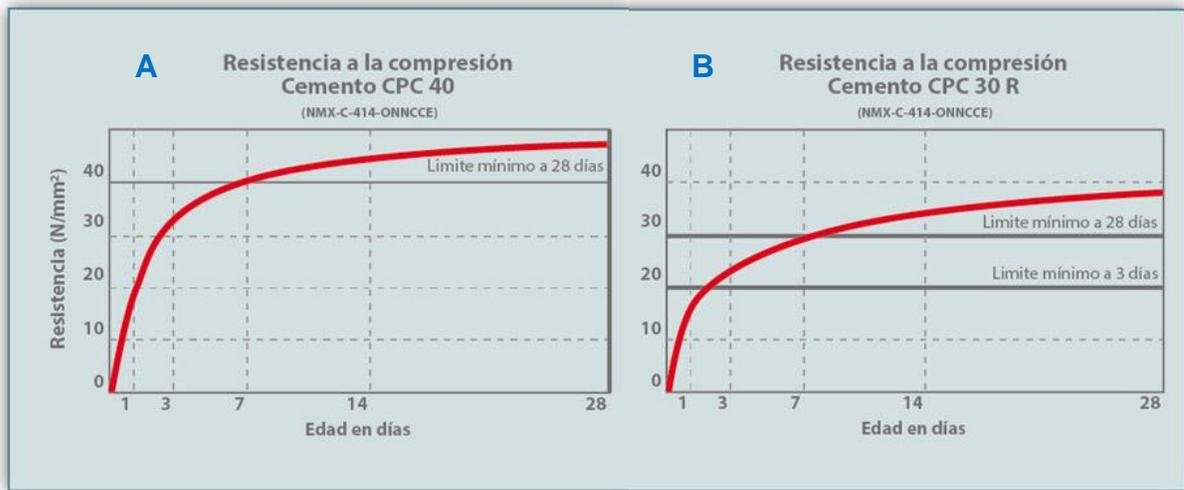


Figura 5 Comparativa de resistencia a la compresión de CPO 40 y CPO 30

En la figura 5 se aprecia la comparación entre resistencia a la compresión respecto de la edad de los especímenes, como se observa en el apéndice A, donde se aprecia al CPO 40 y en el B el CPO 30; es visible que el CPO 40 alcanza mayor resistencia a los 7 días respecto al CPO 30 a los mismos 7 días, (García Ortiz, 2019)

Constituyentes del cemento portland y su hidratación

Silicato Tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C3S)

El silicato tricálcico es un componente esencial de todos los cementos Portland. En su estructura cristalina contiene iones Ca^{+2} en combinación con los aniones de SiO^{-4} y O^{-2} en una relación de 3:1.1. Durante el calentamiento o enfriamiento, el C3S experimente una serie de transformaciones de fases reversibles, como se observa en la Figura 6:

diferentes iones, exhiben distinta reactividad y pueden ser encontrados en algunos cementos especiales (Giraldo & Tobón, 2006a).

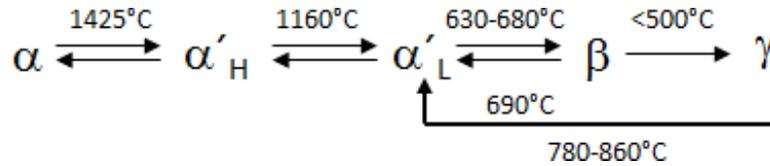


Figura 7 Polimorfos del C₂S en función de la temperatura

Aluminato Tricálcico (3CaO·Al₂O₃, C₃A).

En los cementos Portland, el aluminato tricálcico existe en su forma cúbica, sin embargo, en presencia de un contenido elevado de álcalis en la harina cruda, las modificaciones mineralógicas, ortorrómbica o incluso la forma monoclinica puede ser obtenida. La estructura del C₃A se compone de anillos de seis tetraedros de AlO₄ y de iones calcio. Todas las modificaciones del C₃A se hidratan de la misma manera, sin embargo, su reactividad puede variar dependiendo del tipo y la cantidad de iones extraños incorporados en su estructura cristalina (Giraldo & Tobón, 2006b).

Ferroaluminato de calcio, fase ferrita (2CaO(Al₂O₃,Fe₂O₃) o C₂(AF), C₄AF)

La composición del ferroaluminato de calcio puede variar entre C₂(A_{0.7},F_{0.3}) y C₂(A₃,F_{0.7}) y esta variación puede ser expresada con la fórmula C₂(A,F). En la escala nanométrica, la estructura de esta fase consiste de iones Ca⁺², cada uno de ellos rodeado de 7 iones de O₂, combinado con iones Al⁺³ y Fe⁺³ distribuidos entre sitios octaédricos y tetraédricos. En los clinker industriales, la fase ferrita también contiene iones extraños, parte de los iones Fe⁺³ está sustituido por Mg⁺² e iguales cantidades de iones Si⁺⁴ y/o Ti⁺⁴.

Hidratación del cemento portland

Químicamente, el proceso de hidratación del cemento Portland consiste de una serie de reacciones que ocurren entre los minerales individuales del clinker, el

sulfato de calcio y el agua, las cuales suceden de manera simultánea a diferentes velocidades. El progreso del proceso depende de:

-La velocidad de disolución de las fases involucradas.

-La velocidad de nucleación y el crecimiento de los cristales de los hidratos a formarse.

-La velocidad de difusión del agua y la disolución de los iones a través del material hidratado ya formado.

El mecanismo de hidratación de una pasta de cemento a temperatura ambiente se caracteriza por diferentes etapas y son descritas en las siguientes secciones del presente capítulo.

Etapa I, Período de pre-inducción (primeros minutos)

Inmediatamente al tener contacto el cemento con el agua ocurre una rápida disolución de las especies iónicas en la fase líquida y la formación de las fases hidratadas da comienzo. Los sulfatos alcalinos presentes en el cemento, se disuelven completamente en segundos. El sulfato de calcio se disuelve hasta saturación contribuyendo también con iones Ca^{+2} . El silicato tricálcico se disuelve congruentemente y una capa de silicato cálcico hidratado (C-S-H) precipita en la superficie de las partículas de cemento. Al mismo tiempo, los iones de silicato entran en la fase líquida, aunque su concentración es muy baja. La fracción de silicato tricálcico (C3S) hidratado en la fase de pre-inducción permanece en niveles de 2 y 10%.

El Aluminato tricálcico (C3A) se disuelve y reacciona con los iones Ca^{+2} y SO^{-2} presentes en la fase líquida formando ettringita (AFt) que también precipita en la superficie de la partícula de cemento. El contenido de C3A que se hidrata en el periodo de pre-inducción puede variar entre 5% y 25%. Solo una ínfima fracción de Silicato dicálcico (C2S) reacciona en esta fase.

Etapa II, Período de inducción o periodo durmiente (a las pocas horas)

Justo después del periodo inicial de hidratación acelerada, la velocidad de las reacciones de hidratación de todos los minerales del clinker se desarrolla a una velocidad muy baja. En este periodo el consumo de agua y la cantidad de hidratos formados es mínimo, lo que explica que el cemento adquiera plasticidad y sea trabajable durante un determinado tiempo. La concentración de hidróxido de calcio (CH) presente en la fase líquida alcanza su máximo e inicia a disminuir, el pH alcanza valores de 12.5. Hay indicios de que la terminación del periodo de inducción y el inicio de la reacción principal se debe principalmente a la nucleación de una segunda etapa de formación de C-S-H proveniente de la fase líquida.

Etapa III, Periodo de aceleración (3-12 horas después del mezclado)

Después de 1-3 horas, es decir, al final del período de inducción, empieza la solidificación o fraguado inicial. En este periodo, la reacción de hidratación se acelera nuevamente y está controlada por la nucleación y crecimiento de los productos de hidratación. La velocidad del C3S se acelera y el C-S-H de la segunda fase comienza a formarse. En este periodo se inicia también la hidratación del C2S. Una vez que cierto valor crítico de iones Ca^{+2} e hidroxilo se alcanzan, comienza la precipitación de C-S-H y CH. El fraguado final se alcanza al finalizar esta etapa 23.

Etapa IV y V, Periodo de desaceleración

En este periodo hay una continua formación de productos de hidratación. A partir de este momento, mientras el espesor de la capa sigue creciendo y el movimiento a través de la capa C-S-H determina la velocidad de la reacción y la hidratación queda controlada por la velocidad de difusión dentro de la capa. Posteriormente, la velocidad de reacción empieza a disminuir hasta alcanzar un estado estable (etapa V) después de 12 a 24 horas.

A relaciones de agua/cemento altas, el proceso de hidratación continuará hasta que todo el cemento sea consumido. Sin embargo, residuos de partículas grandes de cemento pueden persistir aún en pastas endurecidas. A relaciones agua/cemento bajas, las reacciones pueden detenerse aún en presencia de grandes porcentajes

de material sin reaccionar, esto debido al agua insuficiente para llevar a cabo las reacciones de hidratación.

La hidratación, como otras reacciones químicas, es sensible con respecto a la temperatura. La velocidad de reacción aumenta con la temperatura. Pero la dependencia entre la velocidad y la temperatura está relacionada con el grado de reacción. La etapa en la que la temperatura tiene más importancia es en el período de aceleración (etapa III) donde la velocidad de reacción es controlada químicamente.

En la Figura 8, se presentan las 5 etapas de la hidratación del cemento Portland determinadas por la calorimetría de conducción.

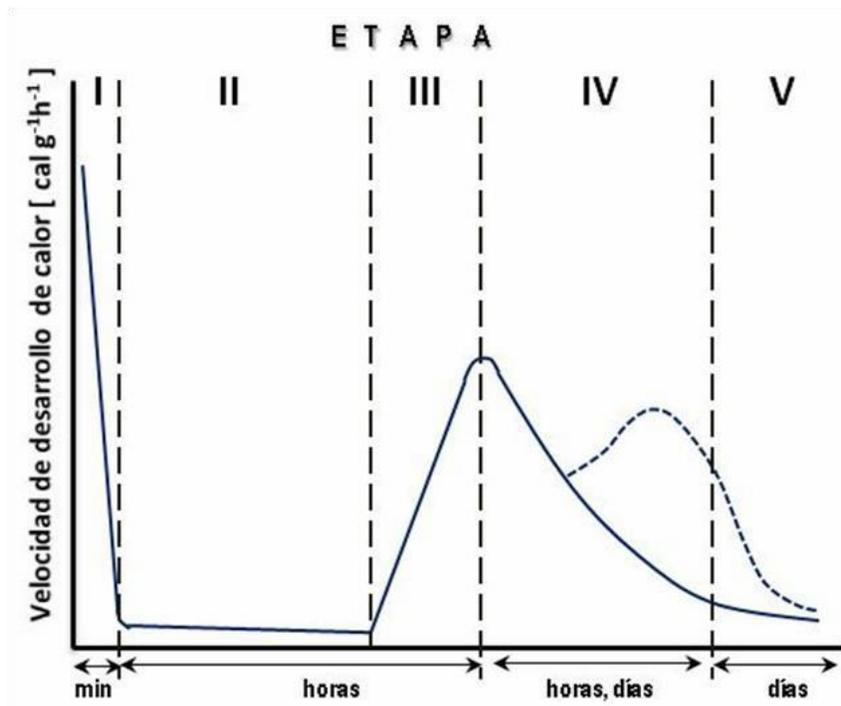


Figura 8 Evolución de calor durante las etapas de hidratación del cemento Portland.

Materiales pétreos empleados en la fabricación de mortero

Los materiales pétreos empleados con frecuencia en la construcción son variados, van desde los más comunes, como pueden ser arenas y gravas, a los más lujosos

como granitos y mármoles, estos son empleados mayormente como un elemento estético.

Este tipo de materiales tiene características que facilitan su uso tales como una alta tolerancia a la oxidación, temperaturas de fusión altas, de un costo relativamente bajo y en su mayoría son inertes (no tóxicos).

En el caso de los morteros de concretos, son usadas la arena y grava; son clasificadas como rocas de sedimentaria figura 9, esto implica que este material ha sido arrastrado por distintos factores atmosféricos y se depositaron en determinadas zonas; este tipo de rocas se presenta en forma de estratos, otra característica importante es que pueden fracturarse con relativa facilidad.

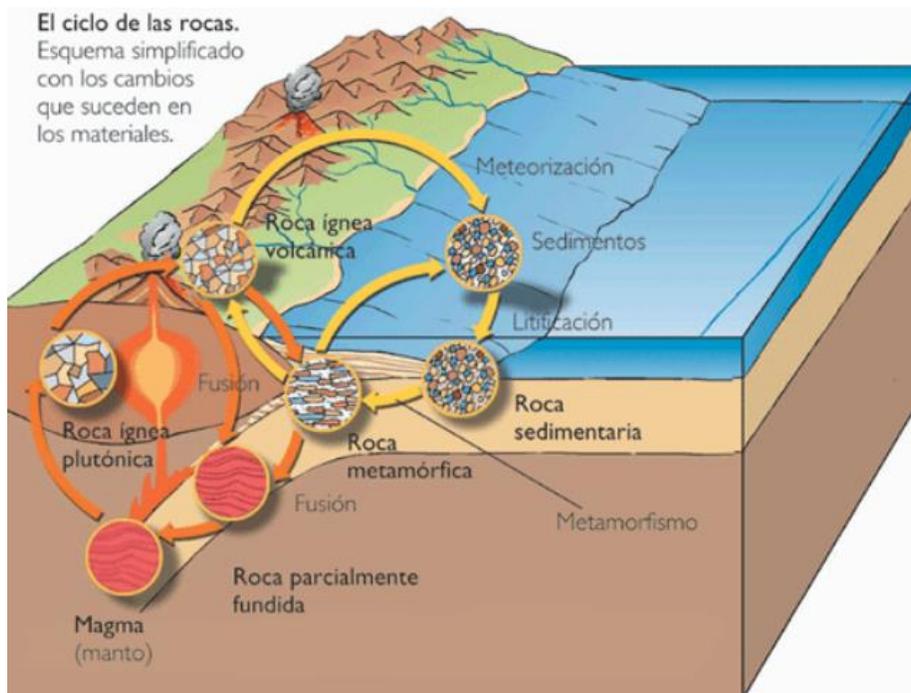


Figura 9 Tipos de materiales pétreos (Universidad de Granada, 2012)

Los materiales pétreos empleados principalmente para la fabricación de morteros en plantas de mediana y gran producción son directamente comprados en los yacimientos, evitando así los intermediarios para la adquisición de estos materiales, la ubicación de estos determina la calidad de los mismos (García Ortiz, 2019).

Aditivos

Los aditivos para el concreto se pueden definir como sustancias que se clasifican en orgánicas o inorgánicas, estas tienen el objetivo de modificar las propiedades del concreto en cualquiera de sus posibles estados (fresco, fraguado y endurecido), la presentación de ellos puede darse en líquido o polvos.

Es preciso detallar que los aditivos a diferencia de los materiales pétreos, cemento y agua, no son fundamentales para fabricar un concreto, sin embargo, su uso se amplía cada vez más, porque con la ayuda de estos, el concreto puede adaptarse y acoplarse a las condiciones de la obra sin hacer mayores modificaciones a las proporciones de las materias primas.

Por otra parte, los tipos de modificaciones que se puede percibir en el concreto son el cambio de color y la inclusión de aire; este tipo de agentes en el sentido estricto no se consideran aditivos, es importante mencionarlos, pues su presencia cambia sustancialmente las características del concreto.

Las razones para el uso de aditivos son:

1. Reduce los costos que involucran la fabricación de concreto.
2. En el caso que para obtener cierta propiedad en el concreto resulta más económico con el uso de un aditivo.
3. Garantiza las especificaciones del concreto en sus diversos estados (fresco, fraguado y endurecido).
4. Existencia de la necesidad de prever contratiempos en el transporte o colocación del concreto.

Relación agua-cemento

Esta relación se puede conceptualizar como “la razón entre la cantidad efectiva de agua y cemento, la cantidad efectiva de agua es la diferencia entre el total de agua contenida en la mezcla y la absorbida por los materiales pétreos”, (García Ortiz, 2019)

Por otra parte, la relación agua cemento es “la que determina la resistencia a la compresión de los morteros, pero por el tipo de proceso esta relación es muy baja pues se requiere de una mezcla seca, lo que provoca que la cantidad de agua que se agrega en la mezcla sea muy específica, pues un exceso de esta daría a la mezcla un incremento en la plasticidad, lo que impediría que el mortero en estado fresco o inicial mantenga la forma determinada por el molde usado, y si la cantidad de agua es inferior a la requerida el cemento no tendrá con quien hidratarse dando como resultado morteros de baja resistencia a la compresión”, (García Ortiz, 2019)

Concreto

El concreto es una mezcla de cemento, materiales pétreos, agua y aditivos, como se puede observar en la gráfica de la figura 10, en la cual, se presentan los componentes del concreto, así como los porcentajes más comunes en los que se usan, cabe mencionar que algunos autores también toman en cuenta la cantidad de aire en el concreto como parte de su composición, pues al igual que las materias primas ocupa un espacio dentro del mismo.

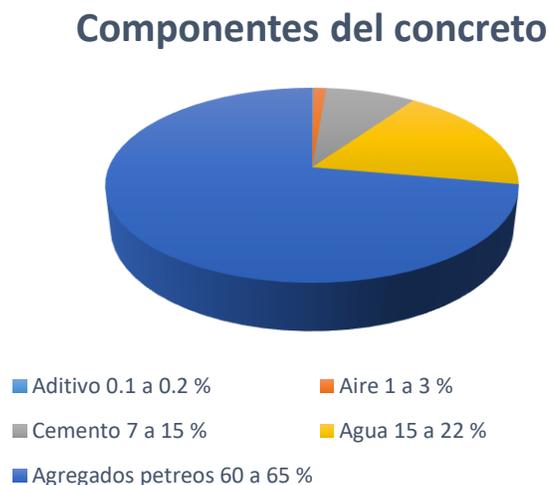


Figura 10 Componentes del concreto

En 2016 el Instituto Mexicano del cemento y el concreto (IMCyC) (IMCyC, 2016), elabora una clasificación dependiendo del uso y de los materiales presentes en la mezcla, la cual se presenta a continuación:

- Concreto Simple: la principal característica de este concreto es que no contiene en su interior ningún tipo de acero ya sea de refuerzo o de presfuerzo, su uso es para la fabricación de piezas de baja resistencia, (IMCyC, 2016)
- Concreto Ciclópeo: al igual que el concreto simple no contiene acero, pero lo que destaca a este tipo de concreto es el uso de rocas de gran tamaño, su uso más común es en cimentaciones, (IMCyC, 2016)
- Concreto Armado: es aquel que contiene en su interior acero que le dará una mayor resistencia a la compresión, generalmente se emplea en piezas estructurales, es decir que estará sometidas a grandes cargas.
- Concreto Premezclado: lo que distingue a este concreto es el lugar donde se realiza su mezclado, pues este no se encuentra donde será su disposición final del concreto. Con este método se tiene un mayor control sobre la mezcla, (IMCyC, 2016)
- Concreto Prefabricado: cuando se habla de este tipo de concreto, significa que el elemento fue fabricado en una planta de producción, donde el control de calidad es más riguroso, (IMCyC, 2016)

También se pueden definir los estados del concreto según IMCyC (IMCyC, 2004) en:

- Estado fresco. Es cuando el concreto puede ser moldeable, es blando y puede ser trabajado con facilidad, (IMCyC, 2004)
- Estado fraguado. Cuando el concreto ya no es blando comienza la etapa de fraguado, aunque puede seguir trabajándose superficialmente, es decir

puede darse los acabados estéticos superficiales deseados en esta etapa, (IMCyC, 2004)

- Estado endurecido. El concreto ya tiene resistencia, es totalmente duro y ya no permitirá ninguna modificación de forma, (IMCyC, 2004)

Normativa aplicable para la fabricación de morteros

Procedimiento para muestreo de agregados NMX-C-030-ONNCCE-2004

Se debe tomar una muestra representativa para la prueba unitaria. Esto nos permite evaluar materiales pétreos en una cantera, almacén o camión.

Esta norma mexicana especifica la selección de unidades que se utilizarán para la investigación preliminar de posibles fuentes de suministro; control de unidades en la fuente de abastecimiento; control de operaciones en el punto de uso y aceptación o rechazo de unidades. El muestreo es tan importante como las pruebas, por lo que los técnicos deben tomar todas las precauciones

La Norma Mexicana enmarca que las muestras para la investigación preliminar deben ser obtenidas por el responsable de la explotación, (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2004). Para obtener muestras representativas de un determinado yacimiento figura 11, es de mucha importancia efectuar la operación de muestreo, de acuerdo con las recomendaciones, para los diferentes tipos de yacimiento que establece la norma, (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2004)



Figura 11 Muestreo de materiales pétreos en mina

Procedimiento para reducción de muestras al tamaño requerido de las pruebas NMX-C-170-ONNCCE-1997

Para iniciar la realización de las pruebas a los agregados es menester obtener una muestra representativa y esta debe tener una cantidad específica para cada prueba, por lo cual este procedimiento permite reducir las muestras a esta cantidad.

La Norma Mexicana enmarca los métodos para la reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo hasta el tamaño apropiado para la prueba; empleando en cada caso, una técnica para minimizar las variaciones en características medibles entre la muestra probada y la muestra de campo; estos métodos se designan con las letras “A” y “B”, (García Ortiz, 2019)

El método establece en el procedimiento 2 métodos: Método “A” Cuarteo Mecánico y Método “B” Cuarteo manual como lo podemos observar en la figura 12; así como la selección del método y el tamaño de la muestra para establecer los métodos para reducir las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas y que se conserven representativas como la muestra de campo. (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 1997)

A pesar del gran uso del cuarteo, algunos investigadores desconocen que es un método normado el cual permite la estandarización de mismo así mismo la obtención de una correcta muestra representativa, (García Ortiz, 2019)

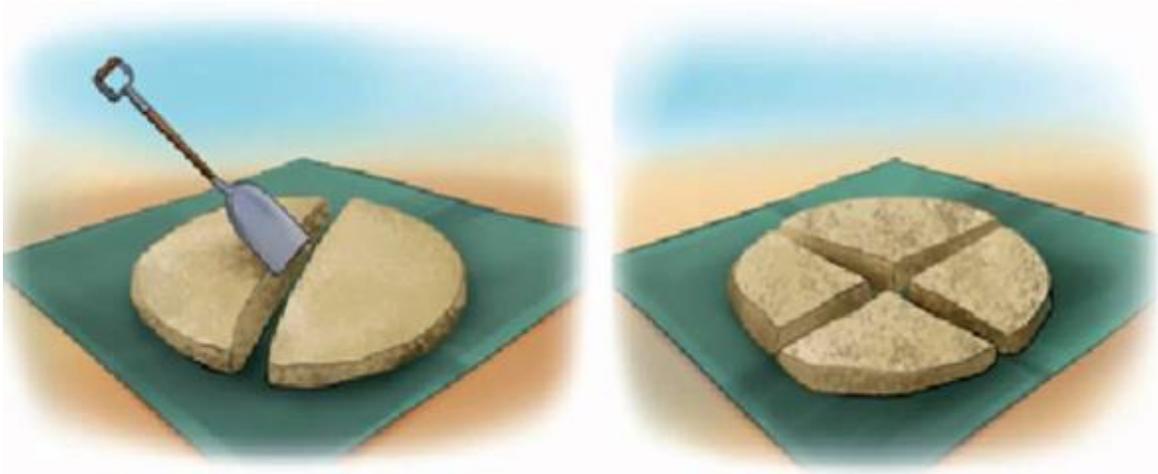


Figura 12 Cuarteo de muestras para agregados pétreos (NMX-C-170-1997-ONNCCE, 1997)

Procedimiento para cálculo de masa volumétrica NMX-C-073-ONNCCE-2004

El conocer la masa volumétrica de nuestros agregados es de vital importancia en el momento de realizar la mezcla, ya que las cantidades para la dosificación se estandarizan en litros lo que facilita el proceso.

Es preciso recordar que la norma mexicana establece y describe el método de prueba para la determinación de la masa volumétrica de los agregados finos y gruesos o de una combinación de ambos; este método es aplicable a agregados cuyo tamaño máximo nominal no excedan de 150 mm, (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2004)

El método establece tomar una muestra de agregado de acuerdo con el método de muestreo descrito en la NMX-C-030-ONNCCE (muestreo), y se reduce a un volumen de aproximadamente 1,5 veces la capacidad del recipiente que se va a emplear, de acuerdo con la NMX-C-170 ONNCCE (reducción de muestra), (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y

Edificación, S.C., 2004) La muestra de agregados debe secarse hasta que la masa sea constante, para lo cual la muestra del material que se va a secar se introduce en el horno a una temperatura constante y periódicamente se seca, se deja enfriar y se pesa, (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2004)

Para efectos de realizar la prueba se requiere de una báscula, estufa para secado, placa de vidrio, recipiente, regla metálica (enrasador) y equipo de uso general.

Las fórmulas empleadas son las siguientes:

$$F = \frac{MU}{MA}$$

Donde:

F= Factor en metro cúbico

MU= Masa unitaria del agua tomando en cuenta la temperatura de la misma

MA= Masa del agua que se ocupa para llenar el recipiente (kg)

$$MV = (MN - MR)F$$

Donde:

MV= Masa volumétrica (kg/m³)

MN= Masa neta (kg)

MR= Masa del recipiente (kg)

Factor= Factor (1/m³)

[Procedimiento para análisis granulométrico NMX-C-077-ONNCCE-1997](#)

Efectuar la prueba granulométrica es esencial para poder conocer el tamaño de cada una de las partículas que contienen los materiales pétreos, es preciso recalcar que, por las características de cada concreto, estas determinan el tamaño máximo de agregado, el cual limita el uso de partículas que rebasen este límite.

El método establece que la muestra del agregado que se va a emplear para el análisis granulométrico debe tomarse de acuerdo con la NMX-C-030-ONNCCE

(muestreo) y reducirse de acuerdo con lo indicado en la NMX-C-170-ONNCCE (reducción de muestra), (García Ortiz, 2019)

El agregado fino debe humedecerse antes de iniciar la reducción del tamaño de la muestra para evitar la segregación, siendo el objetivo del método determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños por medio de cribas, las cuales son sometidas a una vigorosa agitación por un periodo de 15 minutos, posterior a esto se pesa el material retenido en cada criba, (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 1997)

Ya que se obtuvieron las masas de cada malla como se muestra en la figura 13, es posible calcular un módulo de finura o tamaño promedio, el cual sirve para diseñar las proporciones entre finos y gruesos. Es importante hacer hincapié que las minas de las cuales provienen los materiales pétreos no tienen un alto control de calidad respecto a los tamaños de partícula, por lo cual es indispensable la realización de esta prueba.



Figura 13 torre de tamices normalizados

Procedimiento para análisis de pérdida por lavado NMX-C-084-ONNCCE-2006

Los agregados tienen partículas que pueden pasar la malla 200, debemos recordar que el análisis granulométrico se hace por medio de una agitación vigorosa, pero en los materiales pétreo existen partículas muy finas que a pesar de esta agitación no logran pasar por la malla 200, también existen partículas que por su tamaño no pasan dicha malla, pero su composición las hace solubles en agua permitiéndoles pasar la malla; estos el porcentaje de estos dos tipos de partículas se puede determinar, (García Ortiz, 2019)

La Norma Mexicana específica el método de prueba para determinar el contenido de partículas más finas de la criba 0,075 mm (No. 200) por medio de lavado. Las partículas de arcilla y otras que se disgregan por el agua de lavado y las que son solubles en el agua son separadas durante esta prueba, (García Ortiz, 2019). La muestra del agregado que se va a ensayar debe tomarse de acuerdo con lo indicado en la NMX-C-030-ONNCCE (muestreo), y mezclarse completamente para reducirse de acuerdo con lo indicado en la NMX-C-170-ONNCCE (reducción de muestra), a un tamaño adecuado para el ensayo, (García Ortiz, 2019) La muestra de agregados se lava por agitación y el agua que contienen los materiales disueltos y en suspensión, se separa por decantación, pasándola por la criba 0,075 mm (No. 200), (HUGO TESIS). La pérdida de masa resultante del tratamiento de lavado se calcula como por ciento de la masa de la muestra original y se informa como el porcentaje del material más fino que la criba 0,075 mm (No. 200) obtenida por lavado, (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2006)

Procedimiento para determinar contenido de impurezas orgánicas NMX-C-088-ONNCCE-1997

Es importante conocer si la muestra de nuestros agregados contiene impurezas orgánicas, toda vez que este parámetro puede ser perjudicial para el concreto. Los resultados de las muestras darán un parámetro para evaluar el yacimiento del cual están siendo extraídos los materiales pétreos.

Esta norma establece el método de prueba para la determinación aproximada de la presencia de materia orgánica dañina en agregados finos utilizados en la fabricación de concretos. Esta prueba es un índice de contaminación y proporciona en su caso, una advertencia acerca de la necesidad de efectuar otras pruebas antes de su utilización. Para poder llevarse a cabo se introduce la muestra seca de agregado fino en una botella de vidrio. Se agrega la solución de hidróxido de sodio y se agita vigorosamente. Se tapa la botella y se deja reposar 24 h. Después de este tiempo de reposo, se determina el color de la solución que queda sobre el agregado, comparando si es más clara, igual o más oscura respecto de la solución normalizada como se muestra en la figura 14. Si el líquido que está sobre el agregado es más oscuro puede considerarse que las impurezas pueden ser perjudiciales para la fabricación de concreto. (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 1997)



Figura 14 Comparativo de colores respecto de una muestra

Procedimiento para prueba de absorción de agua y masa específica de los agregados fino NMX-C-165-ONNCCE-2014

Dentro del proceso de la fabricación del concreto la relación agua–cemento es quizá la parte más primordial, por esta razón es menester el conocer la cantidad de agua que es absorbida por los materiales pétreos, toda vez que este dato modificara directamente la cantidad de agua que debe agregarse a la mezcla.

Ahora bien, la Norma Mexicana establece el método de ensayo para la determinación de la densidad relativa aparente y la absorción del agregado fino y grueso en la condición saturada y superficialmente seca, (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2014); esta Norma Mexicana aplica a los agregados finos de un tamaño máximo de 4,75 mm (malla No 4) y gruesos con un tamaño máximo de 76 mm (3 pulgadas), (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2014)

Esta norma establece y describe los métodos para determinar la relación de la densidad del agregado a la masa del volumen de agua que desplaza al sumergirse en ella; también el aumento de masa del agregado seco debido al agua que se introduce en los poros del material, (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2014) Es necesario recordar que esta norma especifica el equipo a utilizar, la forma de preparar y acondicionar las muestras, las condiciones ambientales y el procedimiento del ensayo; y el cálculo, (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2014)



Figura 15 Secado de materiales pétreos

Procedimiento para la prueba de revenimiento

Acerca del concreto en estado fresco, en la tabla 3 se observan las diversas consistencias que puede tener este, según su revenimiento (asentamiento en relación al cono de Abrams), entre mayor sea el asentamiento respecto del cono mayor será la fluidez del concreto.

Tabla 3 Clasificación de una mezcla de acuerdo a su revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE-2010 2010).

Consistencia	Asiento en cono de Abrams (cm)
Seca	0 – 2
Plástica	3 – 5

Blanda	6 – 9
Fluida	10 – 15
Líquida	16 – 20

La prueba de revenimiento se lleva a cabo mediante el cono de Abrams, que es un instrumento troncónico que permitirá medir la fluidez del concreto en estado fresco.

El ensayo se lleva a cabo como se muestra en la figura 16, primeramente, el cono de Abrams es llenado parcialmente con mortero en tres capas, en seguida utilizando una varilla con punta de bala se realizan 25 penetraciones a cada capa, posteriormente se retira el cono y se coloca a un lado del concreto, para que se miden ambas alturas y la diferencia de estas, es conocida como el índice de revenimiento.

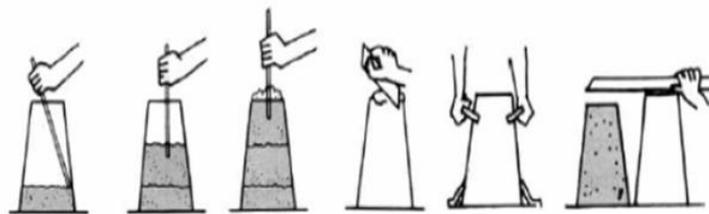


Figura 16 Procedimiento para cálculo de revenimiento.

[Procedimiento para ensayo a la compresión sobre bloques de concreto seco NMX-C-036-ONNCCE-2004](#)

El ensayo a la compresión en bloques de concreto seco generalmente se lleva a cabo para determinar la resistencia a la compresión del material. Este ensayo se realiza en un laboratorio utilizando una máquina de ensayo universal. Aquí se describe un procedimiento general:

Preparación de las muestras: Se seleccionan bloques de concreto representativos que cumplan con las especificaciones y características requeridas. Se deben tener en cuenta las dimensiones y condiciones de curado de las muestras, según lo establecido en la norma técnica aplicable. Las muestras deben estar secas antes de realizar el ensayo.

Medición de las dimensiones de las muestras: Se miden las dimensiones (longitud, ancho y altura) de cada bloque de concreto. Estas mediciones se utilizan posteriormente para calcular el área transversal de las muestras.

Preparación de las superficies de ensayo: Las superficies superior e inferior de las muestras se limpian de cualquier material suelto o partículas extrañas. Se asegura que las superficies sean planas y paralelas entre sí.

Colocación de las muestras en la máquina de ensayo: Se coloca una muestra de bloque de concreto en posición vertical, entre las placas de compresión de la máquina de ensayo. Las placas deben estar en contacto completo con las superficies superior e inferior de la muestra.

Aplicación de carga: Se aplica una carga axial de manera gradual y continua a una velocidad especificada (según la norma técnica) hasta que se produce la falla de la muestra. La carga se registra en función del desplazamiento o la deformación.

6. Registro de los datos: Durante el ensayo, se registran la carga aplicada y el desplazamiento o la deformación correspondiente. Estos datos se utilizan para trazar una curva de carga-deformación y para calcular la resistencia a la compresión del concreto.

Cálculo de la resistencia a la compresión: Se calcula la resistencia a la compresión del concreto dividiendo la carga máxima registrada durante el ensayo por el área transversal de la muestra. La resistencia a la compresión se expresa típicamente en unidades de presión, como MPa (megapascascales).

Es importante destacar que este es solo un procedimiento general y que los detalles específicos pueden variar según la norma técnica que estés utilizando. Es

fundamental seguir las instrucciones y directrices establecidas en la norma para asegurar la correcta ejecución del ensayo y obtener resultados confiables y precisos.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta la metodología experimental propuesta, para lograr el diseño de una mezcla de concreto que dé como resultado especímenes que cumplan con la normativa aplicable en México (ONNCCE, 2019). El proceso está dividido en cinco principales etapas como se muestra en la figura 17.

Diseño experimental

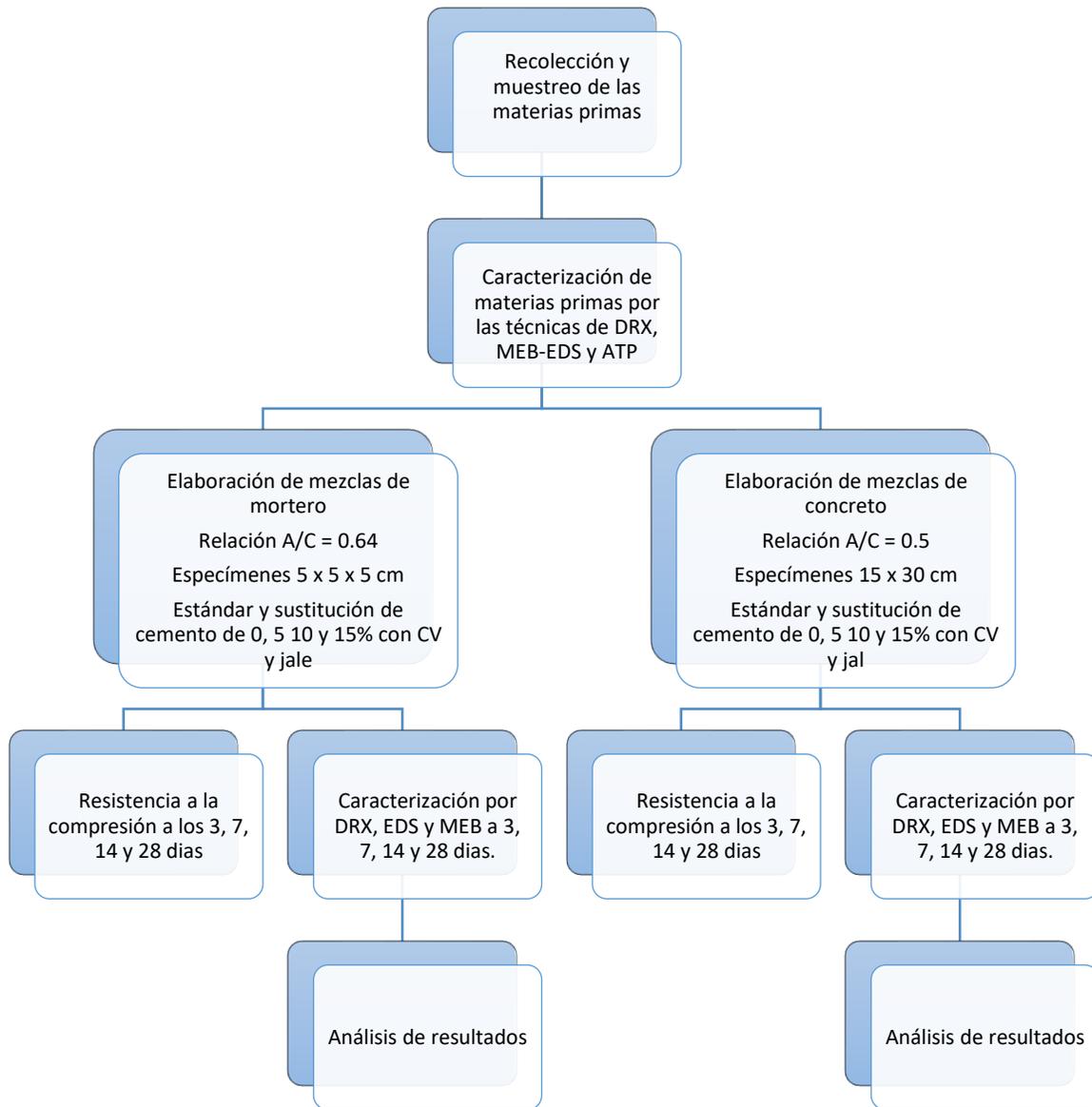


Figura 17 Diseño experimental

Caracterización de materias primas

Después de la recolección de ceniza volante se llevó a cabo la caracterización por medio de distintas técnicas como Difracción de rayos X (DRX), Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y analizador de tamaño de partículas por difracción láser (ATP).

Así mismo debe realizarse una caracterización química, estructural y morfológica por distintas técnicas como, Analizador de Tamaño de Partículas por difracción láser (ATP) Difracción de rayos X (DRX), Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), con los que podremos conocer la composición química, tamaño de partícula y mineralógica.

Proceso de fabricación de morteros con adición de ceniza volante

Una vez se tienen los componentes requeridos para fabricar los especímenes de mortero, se llevó a cabo la fabricación de estos con una sustitución de cemento en peso de del 10 y 15 % con ceniza volante en una mezcla de 1:2.75 con una relación de agua cemento del 0.64 bajo la norma NMX-C-061-ONNCCE (NMX-C-061-ONNCCE-2015, 2015), al mismo tiempo se elaboró el estándar de comparación esta no contara con ninguna alteración en la relación agua cemento, ni tendrá un sustituyente de cemento. El diseño de las mezclas se muestra en la tabla 4.

Tabla 4 Diseño de mezclas con adición de ceniza volante

	Estándar	10% de sust.	15% de sust.
Cemento (gr)	786	707	668
Ceniza volante (gr)	-	79	118
Total C + CV (gr)	786	786	786
Agua (ml)	500	500	500

Arena (gr)	2160	2160	2160
Relación A/C	0.64	0.64	0.64

En referencia a la norma anterior se debe cumplir con las siguientes ponderaciones tanto de los materiales usados para la fabricación y del proceso de esta.

Para poder cumplir con lo dicho en el párrafo anterior los moldes usados son de bronce, compuestos por dos piezas con paredes lisas y rígidas para evitar deformaciones; además de una base constituida por una placa de superficie plana y del mismo material. Las piezas estarán provistas de ensamble y sujeción firme entre sí y a su vez con la base para evitar fugas o filtraciones.

Las caras interiores de estos moldes deben ser superficies planas que formen cavidades cúbicas de 50 mm por lado, considerando que cada molde no podrá tener más de tres cavidades.

- Pisón de 13 x 25 mm de sección transversal y de 15 cm de largo
- Cuchara de albañil de acero, de 100 a 150 mm de largo y con extremos rectos
- Lubricante sintético

Preparación de los moldes

La superficie de contacto de los moldes se cubrió con una capa delgada de lubricante, las dos piezas de estos se ensamblan y se retira el exceso de lubricante de las caras. Los moldes ya ensamblados se colocaron y aseguraron a la placa base por medio de sujetadores como se muestra en la figura 18.



Figura 18 Molde para especímenes

Mezclado

Una vez definidas las cantidades a usar en cada experimento, se inició con la revoltura de los materiales pétreos y el 50% del agua, posteriormente se agregó el cemento y la ceniza volante y por último el otro 50% de agua hasta tener una mezcla homogénea. Parte del proceso se puede apreciar en la figura 19.



Figura 19 Proceso de mezclado

Preparación de los cubos

Se depositó en cada cavidad una capa de mortero de aproximadamente 25 mm de espesor, compactando con el pisón 32 veces en aproximadamente 10 s. Esta compactación se efectúa mediante cuatro ciclos de ocho golpes adyacentes repartidos sobre la superficie de mortero, aplicando cada ciclo en dirección perpendicular con respecto a la anterior, tal como se muestra en la Figura 20, completando los 32 golpes a un compartimiento antes de continuar con el siguiente.

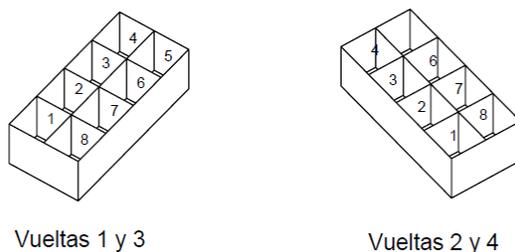


Figura 20 Orden de compactación

Terminada la primera capa, se procedió a llenar los moldes con el mortero sobrante, compactando en la forma descrita en el Inciso anterior. Durante esta segunda compactación, con las manos cubiertas con los guantes de hule, se reintegra al molde el mortero que sobresale después de cada ciclo de apisonado.

Concluido el último ciclo de compactación, el mortero sobresaliente se extiende suavemente con la cuchara de albañil, aplanando y regresando al interior el mortero que se encuentra en los bordes. Finalmente se enrasa la superficie en relación al borde superior del molde, pasando la cuchara una sola vez con una posición ligeramente inclinada, eliminando los excesos mediante un corte con la orilla de la cuchara, concluyendo este paso se puede observar como en la figura 21.



Figura 21 Preparación de cubos

Desmolde y almacenamiento de los especímenes

Los cubos permanecieron en los moldes un lapso de 20 a 24 h, período después del cual se retiraron del molde como se muestra en la figura 23, para sumergirlos en agua limpia, dentro de los depósitos de almacenamiento, donde permanecerán hasta el momento de la prueba figura 22. Durante esta operación, el agua de los tanques se mantendrá limpio, renovándose cada 72 horas.



Figura 22 Desmolde de cubos

Los morteros fabricados hasta el momento son en los que se realizó la sustitución de 10 y 15% y el testigo, faltando hacer la de 5% con ceniza volante y aquellos en los que se emplean los relaves mineros.

Los especímenes de concreto serán realizados con una mezcla de cemento, materiales pétreos gruesos y finos (grava y arena), con una relación agua cemento de 0.5, y la sustitución de cemento con ceniza volante será 0, 10 y 15 % para las distintas mezclas, para el concreto se emplean moldes cilíndricos de 15 x 30 cm

(NMX-C-159-ONNCCE-2016, 2016) y al igual que en los morteros se tendrá una muestra de referencia a la cual se le denominará “testigo” la cual no contará con ninguna alteración en la relación agua cemento, ni tendrá un sustituyente de cemento.



Figura 23 Curado de especímenes de 5 x 5 x 5 cm

Evaluación de la resistencia a la compresión

Después de la fabricación de los morteros anteriormente mencionados en la tabla 4, estándar, sustitución del 10 y 15% con ceniza volante, se realizaron las pruebas mecánicas bajo la norma NMX-C-486-ONNCCE (NMX-C-486-ONNCCE-2014, 2014) esta prueba se llevó a cabo a los 3, 7, 14 y 28 días después de su fabricación.

Las pruebas de resistencia a la compresión se llevaron a cabo en una máquina de compresión simple con una capacidad de 150 kN, equipada con un sistema hidráulico con un control de velocidad de aplicación de carga, sin producir impactos ni pérdidas de carga marca Controls Pilot, modelo 50 - C43C04, serie: 15000289, como se muestra en la figura 24.



Figura 24 Máquina de compresión simple

Procedimiento de prueba a la compresión

Cuando se cumplió la edad, 3, 7, 14 y 28 días, se llevó a cabo la prueba de compresión a los cubos de mortero de las distintas mezclas, estos se retiraron de los depósitos con agua al cumplir el tiempo de fabricación requerido.

Antes de realizar la prueba de resistencia, se eliminan los cubos que presenten defectos visuales como fisuras, malformaciones o desportilladuras, es decir, los que por diversas causas se considere que no cumplen con las características necesarias para obtener resultados confiables, los especímenes se dejaron secar en condiciones ambientales después de ser retirados del estanque de agua como se muestra en la figura 25.



Figura 25 Especímenes para prueba de resistencia a la compresión

Una vez se encuentran seco cada cubo se registra su masa y coloca en la máquina de compresión simple, las caras de contacto estos coincidieron de misma forma en que se fabricaron, es decir no se giraron de ninguna forma figura 26.



Figura 26 Prueba de resistencia a la compresión de cubos de mortero

Una vez realizada la prueba de compresión a cada espécimen de aproximadamente 1 x 1 x 1 cm se tomó una muestra de este, se toma una muestra del mismo y se sumerge en alcohol isopropílico durante 24 horas como se muestra en la figura 27.



Figura 27 Muestra de mortero en alcohol isopropílico

Pasado el tiempo se realizó el cambio del alcohol isopropílico solo por alcohol etílico, dejando el 25 % de este para evitar que la muestra al hacer el cambio se quede sin estar sumergida en alcohol se deja la muestra sumergida en esta mezcla por 1 hora. Una vez transcurrido este tiempo la muestra se muele en húmedo y se hasta que

pase por la malla #200 por último se agrega acetona para deshidratar la muestra (Echlin, 2011). Este proceso se realizó para poder realizar la prueba de Difracción de Rayos X. Con respecto a la caracterización mineralógica de los morteros a distintas edades aún se deben realizar Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS).

Para el estudio a las distintas edades del concreto por Difracción de rayos X (DRX), Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), permitirá identificar las distintas fases, morfología y composición química, producidas por la hidratación del cemento, así como la evolución de estas a través del tiempo y en comparación con los distintos porcentajes de ceniza volante utilizada y relaves mineros.

Para la caracterización de los morteros y concretos por DRX, MEB y EDS se debe realizar una preparación de las muestras (Echlin, 2011), a cada 3, 7, 14, y 28 días de edad (tiempo después de su fabricación). Se extraerán tres fragmentos de aproximadamente un centímetro cúbico, estas se preparan de manera que la hidratación del cemento se detenga y puedan ser analizadas por las distintas técnicas propuestas.

Fabricación de morteros con adición de “jal”

El jal utilizado para la fabricación de especímenes se recolectó de la mina Compañía Minera Y Beneficiadora Purísima, S. De R.L. Ubicada en el municipio de Zimapán del estado de Hidalgo; la que tiene como objetivo principal la producción de concentrado de cobre, plomo y zinc por medios físicoquímicos (flotación) para la separación de minerales finamente molidos que dan como subproducto el jal que se utilizó como aditivo para la fabricación de los especímenes, este fue secado y tamizado para retirar impurezas vegetales producidas por estar expuesto a cielo abierto como podemos ver en la figura 28.



Figura 28 Almacén a cielo abierto de jal y tamizado

Una vez encontrándose el jal en laboratorio este se redujo su tamaño de muestra con ayuda de un cuarteador jone que podemos en la figura 29, el dispositivo está diseñado para reducir el tamaño de la muestra a 2 porciones iguales para que cada porción mantenga la representatividad de la muestra, consta básicamente de 3 bandejas receptoras y un cajón guía de alimentación, lo que ayuda a mantener un material constante en toda la muestra, todas las aperturas están fabricadas con las mismas dimensiones y con el mismo material con el objetivo de homogeneizar la muestra que se encuentra en estudio.



Figura 29 Cuarteador JONES

La muestra resucita producto del cuarteo se redujo su tamaño de partícula con un molino de bolas (Denver), este molino de acero con una forma cilíndrica con una dimensión interna de 19.5 cm de diámetro, 21.35 cm de longitud, volumen de 6376 cm³, este cuenta con un cabezal de sellado y descarga que se ajusta con un tornillo; el molino se coloca en la unidad de rodillos para molienda que tiene como finalidad hacer girar el molino y permite el control de las revoluciones.

Las condiciones para la molienda son las siguientes:

$$\text{Velocidad crítica (Vc)} = \frac{54.2}{\sqrt{\text{radio}}} = \frac{54.2}{\sqrt{7.75}} = 95.83 \text{ rpm}$$

$$\text{Velocidad de trabajo (Vt)} = 0.75 \times \text{Vc} = 0.75 \times 98.83 = 71.8 \text{ rpm}$$

$$\begin{aligned} \text{Carga de bolas (Cb)} &= 0.2044 \times V \times \text{densidad Fe} = (0.2044 \times 6376 \text{ cm}^3 \times 7.85 \text{ g/cm}^3) \\ &= 10.23 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Carga de muestra (Cp)} &= 0.2956 \times V \text{ densidad de la muestra} \\ &= (0.2956 \times 6376 \text{ cm}^3 \times 1.64 \text{ g/cm}^3) = 3.09 \text{ Kg} \end{aligned}$$

La muestra fue molida por un tiempo de 4 horas con 71 revoluciones por minuto, con una carga de 10.23 kg de bolas de acero graduadas y una muestra 3.09 Kg como se muestra en la figura 30



Figura 30 Proceso de molienda

Una vez se tienen los componentes requeridos para fabricar los especímenes de mortero, se llevó a cabo la fabricación de estos con una sustitución de cemento en peso de del 10 y 15 % con jal en una mezcla de 1:2.75 con una relación de agua cemento del 0.48 bajo la norma NMX-C-061-ONNCCE (NMX-C-061-ONNCCE-2015, 2015), al mismo tiempo se elaboró el estándar de comparación esta no contara con ninguna alteración en la relación agua cemento, ni tendrá un sustituyente de cemento. El diseño de las mezclas se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 Diseño de mezclas con adición de jal

	Estándar	10% de sust.	15% de sust.
Cemento (gr)	1000	900	850
Jal (gr)	-	100	150
Total C + Jal (gr)	1000	1000	1000
Agua (ml)	484	484	484
Arena (gr)	2750	2750	2750
Relación A/C	0.48	0.48	0.48

El Mezclado de estos especímenes se llevó a cabo por medio de un mezclador mecánico impulsado eléctricamente de tipo elíptico que imparte un movimiento de traslación y rotación a una paleta colocada verticalmente dentro de un recipiente como se muestra en la figura 31.



Figura 31 Mezclador mecánico

La preparación de los cubos, desmoldeo y almacenamiento de los especímenes, caracterización a distintas edades de los especímenes y procedimiento de prueba a la compresión se realizan bajo las mismas condiciones descritas anteriormente con la fabricación de especímenes con adición de ceniza volante.

Difracción de Rayos X (DRX)

Tabla 6 Características de la técnica (DRX)

Características de técnicas	
Señal de perturbación o incidencia/fuente de excitación	Rayos X
Señal detectada	Rayos X
Fenómeno o proceso involucrado en la interacción señal de perturbación-material	Difracción
Tipo de técnica	No destructiva
Resultado de técnica	Patrón de difracción
Información obtenida	Estructura cristalina
Estado de agregación del material	Sólidos
Tipo de material que puede ser analizado por la técnica	Materiales cristalinos
Condiciones del material/fundamentos de la técnica	Material cristalino



Figura 32 Equipo para Difracción de Rayos X

Motivo: Es necesario reafirmar que el hecho de que una muestra siempre produce un patrón característico de difracción, ya sea que la sustancia esté presente en estado puro o que esté como un componente de una mezcla de sustancias; el patrón

de difracción de una sustancia es característico de dicha sustancia y puede considerarse como huellas digitales por las cuales la sustancia puede identificarse.

Ahora bien, fundamentado en este hecho se logra identificar dicha sustancia mediante la comparación del patrón obtenido.

Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Tabla 7 Características de la técnica (SEM)

Características de técnicas	
Señal de perturbación o incidencia/fuente de excitación	Electrones
Señal detectada	Electrones retro dispersos y electrones secundarios
Fenómeno o proceso involucrado en la interacción señal de perturbación-material	Retro dispersión y emisión para los electrones secundarios
Tipo de técnica	No destructiva
Resultado de técnica	Imagen
Información obtenida	Morfología y topografía analiza sólo la superficie
Estado de agregación del material	Sólidos
Tipo de material que puede ser analizado por la técnica	Todo tipo de material
Condiciones del material/ fundamentos de la técnica	Que sea conductor eléctrico o pueda hacerse conductor mediante el recubrimiento con grafito, oro, etc.



Figura 33 Microscopio Electrónico de Barrido.

Motivo: Con ayuda de esta técnica se obtienen imágenes que permiten conocer características, topográficas, morfológicas y de estructura cristalina, de los materiales usados en este proceso.

Espectroscopia de rayos X de Energía Dispersiva. (XEDS)

Tabla 8 Características de la técnica (XEDS)

Características de técnicas	
Señal de perturbación o incidencia/fuente de excitación	Electrones
Señal detectada	Rayos X
Fenómeno o proceso involucrado en la interacción señal de perturbación-material	Emisión
Tipo de técnica	No destructiva
Resultado de técnica	Espectro
Información obtenida	Análisis de superficie y composición elemental
Estado de agregación del material	Todo tipo de material sólido, muestras con alto grado de hidratación y geles
Tipo de material que puede ser analizado por la técnica	Todo tipo de material
Condiciones del material/fundamentos de la técnica	Ser conductor



Figura 34 Microscopio Electrónico de Barrido con la técnica acoplada de (XEDS)

Motivo: Partiendo de lo anterior se puede realizar un análisis de superficie, así como la composición elemental y conocer las valencias con que están trabajando los elementos que componen el material.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cemento

La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), que se realizó sobre cemento utilizando un equipo JOEL JSM-IT300 en las instalaciones de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, produjo tres micrografías de una muestra. Esta muestra, que es una característica del cemento portland compuesto cédula 30 (CPC-30), se tomó de un trozo de cemento (50 kg) y luego se recubrió con plasma de oro durante 15 segundos para producir imágenes de mayor calidad en el equipo DENTON VACUUM. Todas las micrografías se tomaron a 20 kV y una distancia de trabajo de 10.1 mm.

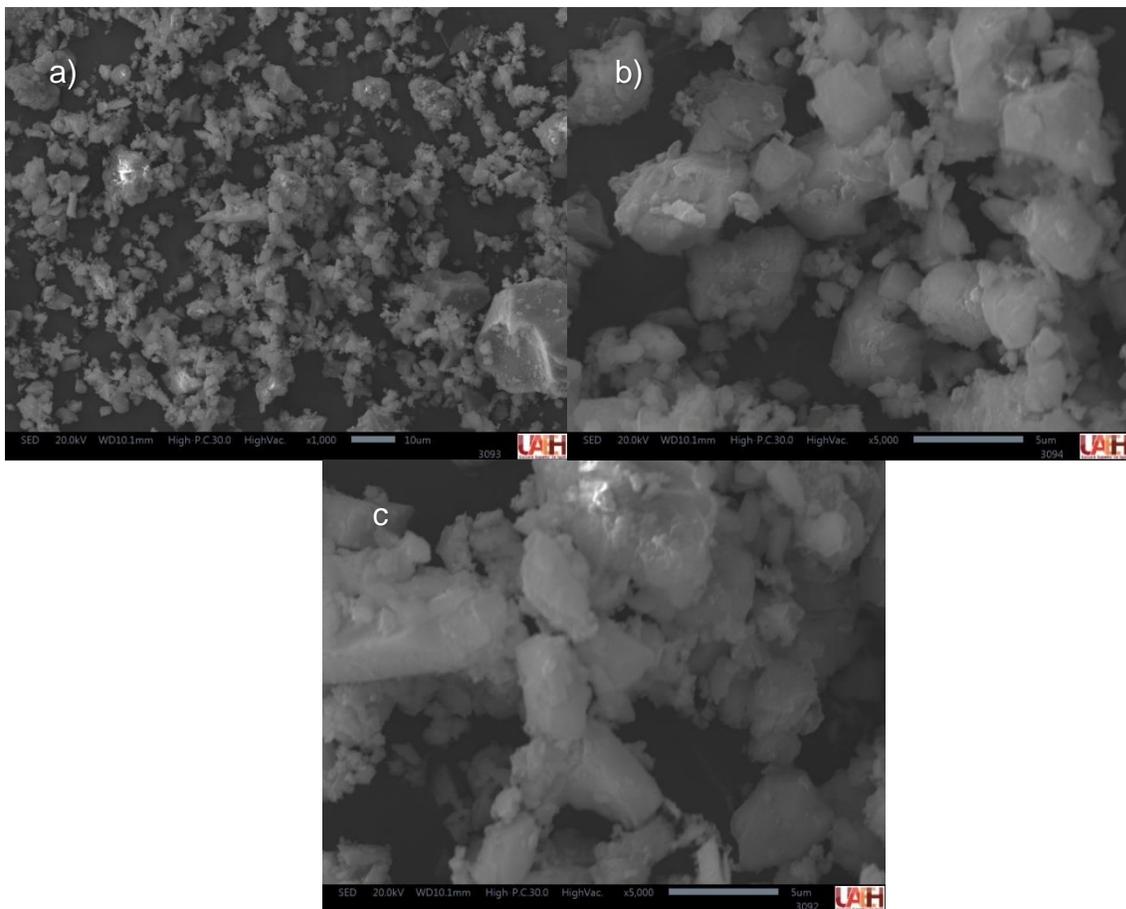


Figura 35 micrografías del cemento CPC

En la figura 35 a), se observa una micrografía del cemento (CPC) capturada por MEB a 1000 aumentos, se aprecia que la distribución de tamaños de partícula es relativamente uniforme, con estos aumentos se puede determinar el tamaño de partícula y se logra observar que son sólidos, angulosos y existen partículas algunas aglomeradas.

Como se aprecia en la figura 35 b) y c), la micrografía del cemento (CPC) capturada por MEB a 5000 aumentos, se distinguen partículas con un tamaño de entre 5 y 10 micras, estas tienen características sólidas, con caras lisas y angulares, rodeadas de partículas diminutas del orden de 1 a 2 micras; de las cuales se aprecian partículas con estas características, se logran distinguir otras partículas más diminutas, con un promedio estimado de 3 micras, una superficie muy irregular tipo, que prácticamente cubren toda la imagen, se aprecian algunos aglomerados de partículas del orden de 1 a 5 micras, estas tienen un aspecto esponjoso con forma irregular, hay otras partículas con una forma prismática de aproximadamente 2 x 5 micras, con caras definidas y sólidas.

Basado en el análisis de cada micrografía mostrada, se desglosa que el cemento CPO está compuesto por partículas del orden de 1 a 10 micras, dichas partículas se dividen en dos formas: en una se muestran con características completamente amorfas y constituyen casi en su mayoría al cemento, y las segundas son prismáticas y en menor cantidad.

La microscopía electrónica de barrido, brinda características físicas del cemento, también se llevó a cabo un análisis químico con la Espectroscopia de rayos X de Energía Dispersiva. (XEDS), está es una técnica acoplada del Microscopio Electrónico de Barrido, es decir este XEDS; el cual se efectuó con el equipo con un equipo JOEL JSM-IT300, que se encuentra en los laboratorios ubicados dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

A continuación, se muestra la espectroscopia de rayos X de Energía Dispersiva. (XEDS) del Cemento Portland CPC-30.

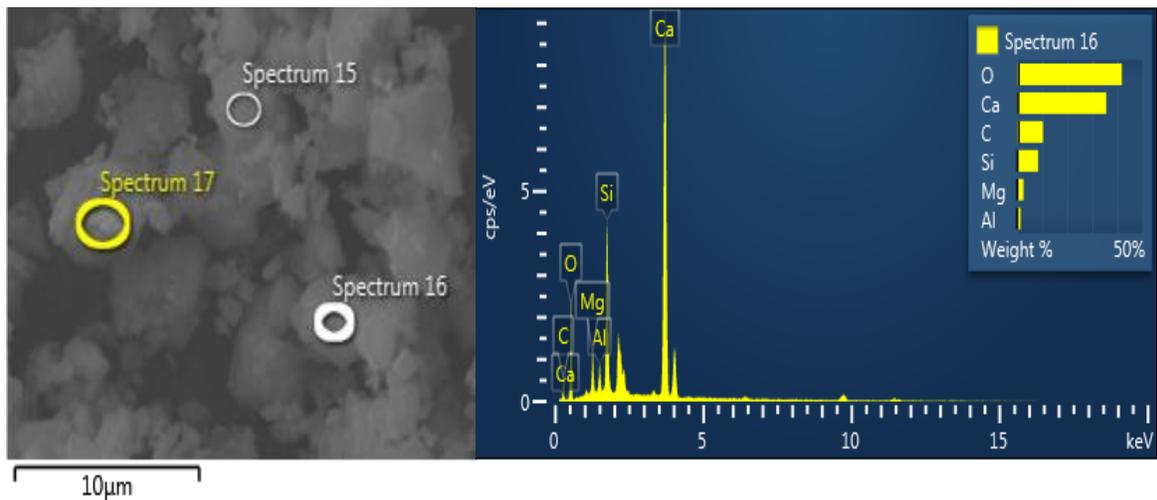


Figura 36 Análisis elemental del CPO por (XEDS) imagen y espectro.

Tabla 9 Análisis elemental del CPO por (XEDS).

Element	Wt %
O	41.77
C	10.33
Mg	2.52
Al	1.39
Si	8.35
Ca	35.64
Total:	100

En la figura 36 se aprecia la zona 16 que representa el área del análisis elemental del cemento por XEDS; a su lado se encuentra el espectrograma que deriva de dicho análisis, en el cual se percibe que el pico más representativo es correspondiente al calcio.

En lo que respecta a la tabla 9, están representados los porcentajes de masa y de óxidos presentes en la muestra de cemento CPC-30, en masa el oxígeno representa el 47.77% del total de la masa y con mayor porcentaje es el de calcio con un 35.64% lo que es característico de los cementos portland compuesto.

Es necesario precisar que para complementar una caracterización química es necesario utilizar complementariamente la técnica denominada Difracción de Rayos X, este permite conocer las fases presentes en el cemento. Es por ello que se ocupó el equipo Inel Equinox 2000, en un intervalo de 10° a 100° utilizando radiación de Cobalto (CoK α 1), dicho equipo fue prestado por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

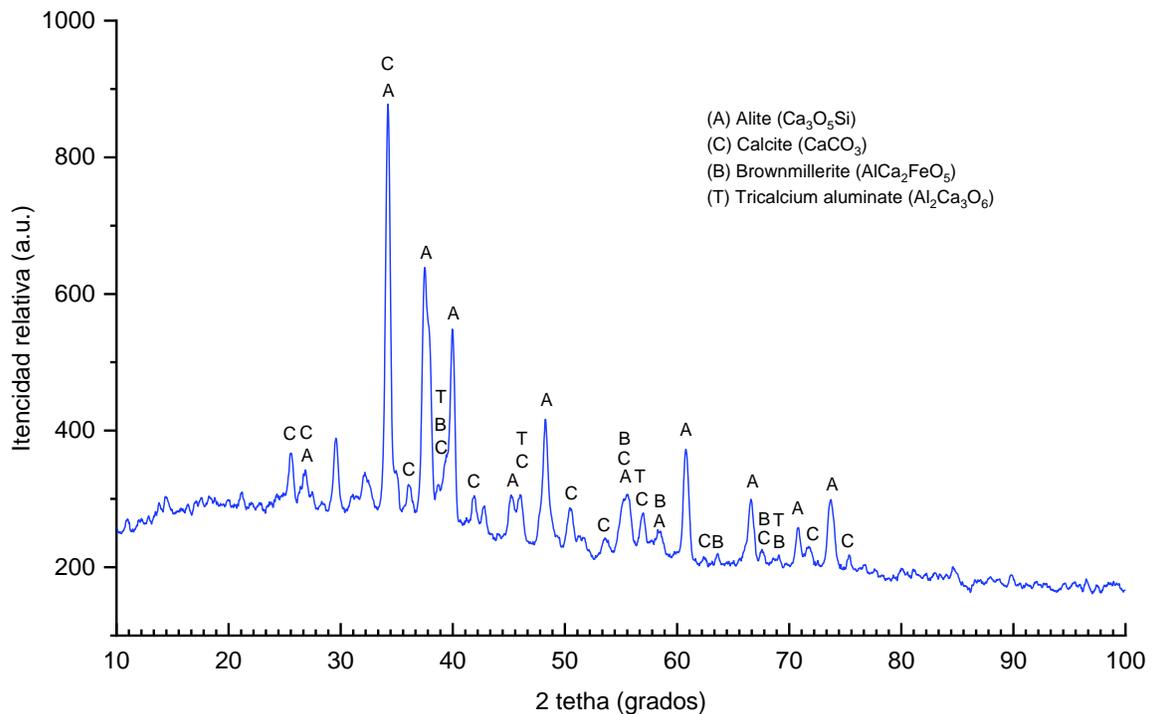


Figura 37 Difractograma del cemento (CPC)

En la figura 37 muestra el difractograma de difracción de rayos X del cemento Portland CPC-30. Las fases mineralógicas identificadas fueron: Alita ($\text{Ca}_3\text{O}_5\text{Si}$) (JCPDS 961540705), Calcita (CaCO_3) (PDF 969007690), Brownmillerita ($\text{AlCa}_2\text{FeO}_5$) (PDF 961008725) y Aluminato tricálcico ($\text{Al}_2\text{Ca}_3\text{O}_6$) (PDF 969014360), siendo la mayoría los primeros. Estas especies minerales coinciden con las reportadas por Young y Yang (Young & Yang, 2019) en estudios realizados sobre la caracterización del cemento Portland.

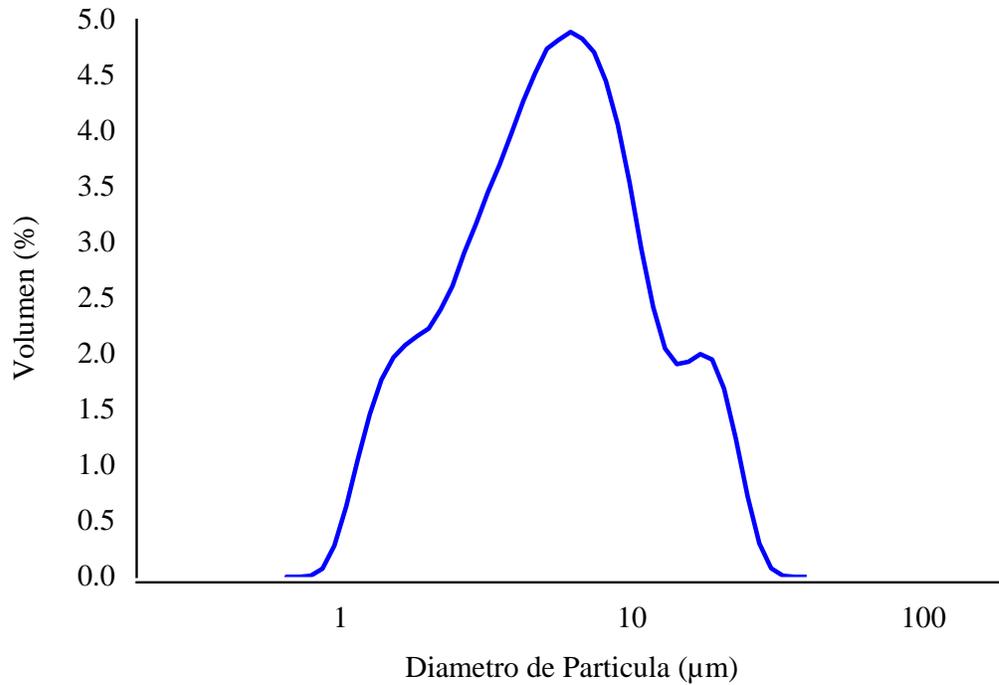


Figura 38 ATP de cemento portland compuesto

En la Figura 38 se observa que cemento portland compuesto tiene una distribución de tamaños de partícula en el intervalo de 0.868 μm - 85.6.9 μm y un tamaño promedio de 5.67 μm indicado en la figura 38. En la micrografía de la Figura 35, se observa que el cemento portlan compuesto estudiado en este trabajo tiene una amplia distribución de tamaños de partícula (5-10 μm), geometría angulosa y casi nula porosidad. Además, los espectros de rayos X de energía dispersiva evidencian la presencia de O y Ca como principales componentes.

Ceniza volante

En la Figura 39 a) se muestra una micrografía de la ceniza volante, tomada por MEB a 100 aumentos podemos observar cierta homogeneidad de los tamaños de partícula, así como una morfología esférica, aunque de igual manera son visibles algunas partículas angulosas, estas últimas resaltan por su tamaño que van de 20 a 100 micras, de las partículas más pequeñas no es posible determinar su tamaño a estos aumentos. En la Figura 39 b) se muestra una micrografía de la ceniza volante, tomada por MEB a 500 aumentos, en esta podemos identificar una partícula que destaca por su tamaño de 35 micras con caras angulosas con una superficie sólida y lisa, el resto de las partículas son en gran mayoría esféricas donde la más grande alcanza las 20 micras y el resto son de menor tamaño, se puede apreciar son totalmente esféricas con una superficie sólida y lisa. En la figura 39 c) se muestra una micrografía de la ceniza volante, tomada por MEB a 2000 aumentos, en esta imagen predominan las partículas totalmente esféricas, con un tamaño entre 1 y 15 micras, puede apreciarse que las partículas más pequeñas rodean las más grandes, no presentan poros ni protuberancias, son sólidas y lisas. En la figura 39 d) se muestra la superficie de la ceniza volante, esta presenta escamas. Las figuras de la 39 a) b) c) y d), son características de una ceniza volante y coinciden con lo publicado por Kutcho y colaboradores en el 2006, donde presentan una caracterización de ceniza volante clase (Kutcho & Kim, 2006), con excepción de la partícula angulosa de la figura 39 b), que podría atribuirse a una contaminación.

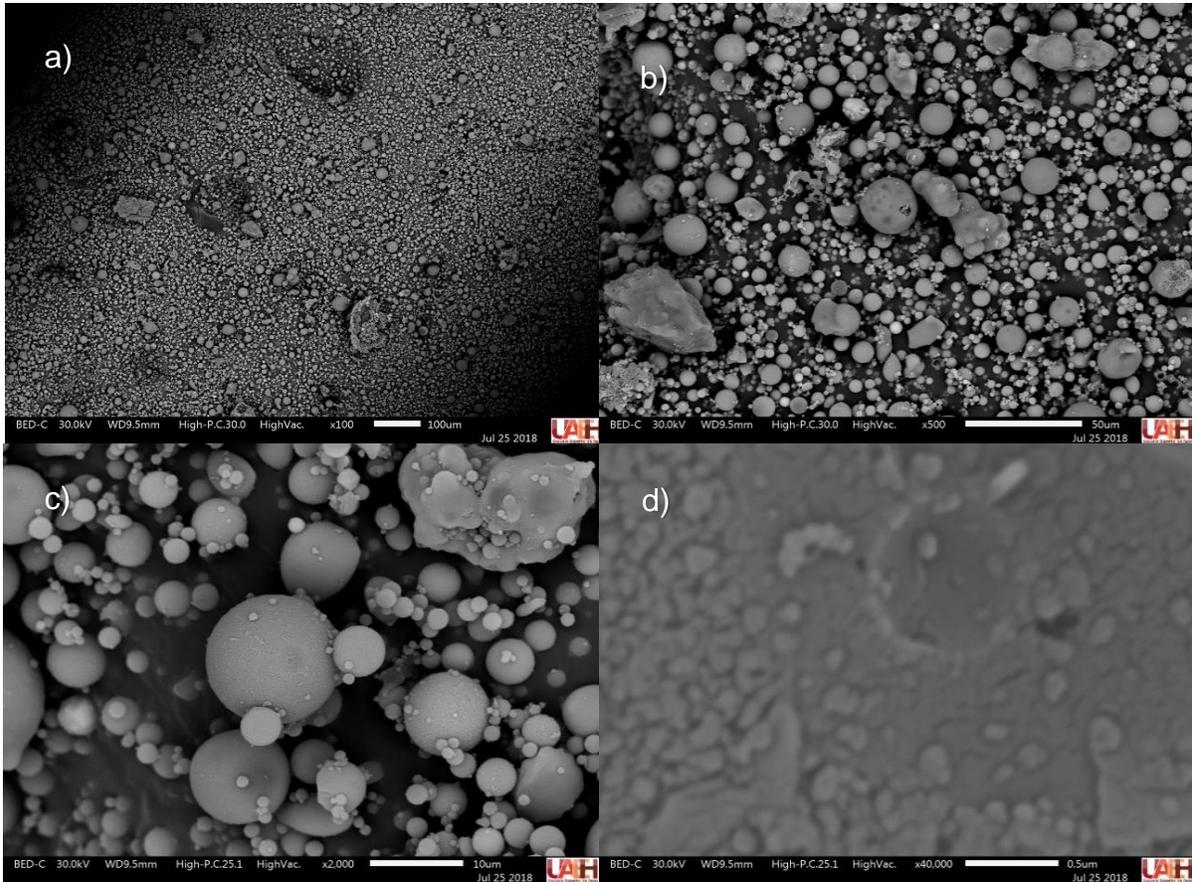


Figura 39 a, b, c y d Micrografía electrónica de barrido de la microestructura de la Ceniza volante

La microscopía electrónica de barrido, brinda características físicas de la ceniza volante, también se llevó a cabo un análisis químico con la Espectroscopia de rayos X de Energía Dispersiva. (XEDS), está es una técnica acoplada del Microscopio Electrónico de Barrido, es decir este XEDS; el cual se efectuó con el equipo con un equipo JOEL JSM-IT300, que se encuentra en los laboratorios ubicados dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

En la figura 40 se aprecia la zona 19 que representa el área del análisis elemental del cemento por XEDS; a su lado se encuentra el espectrograma que deriva de dicho análisis, en el cual se percibe que el pico más representativo es correspondiente al oxígeno.

En lo que respecta a la tabla 10, están representados los porcentajes de masa y de óxidos presentes en la muestra de la ceniza volante, en masa el oxígeno representa el 50.42% del total de la masa y con mayor porcentaje el carbono con un 23.34% lo que es característico de la ceniza volante.

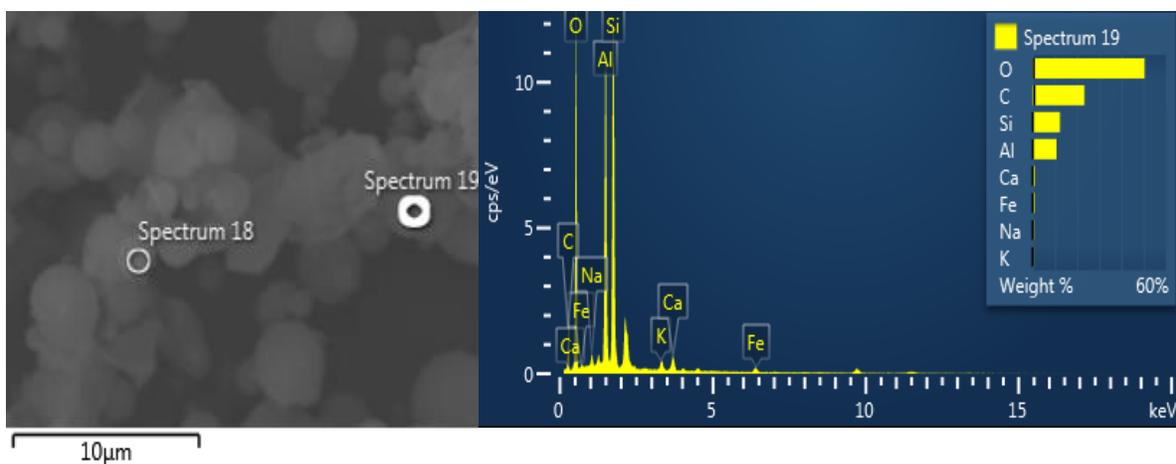


Figura 40 Análisis elemental de la ceniza volante por (XEDS) imagen y espectro.

Tabla 10 Análisis elemental de ceniza volante por (XEDS).

Element	Wt %
C	23.34
O	50.42
Na	0.66
Al	10.80
Si	12.39
K	0.55
Ca	0.97
Fe	0.86
Total:	100

En la Figura 41 se observa que la ceniza volante tiene una distribución de tamaños de partícula en el intervalo de 0.868 µm- 176.9 µm y un tamaño promedio de 13.07

μm . Esta distribución corresponde con los tamaños reportados por Kutchko y Kim (2006) los cuales se encuentran en el intervalo de 1-100 y 1-200 μm . De acuerdo con Yunpeng Company (2020) el tamaño de partícula tiene un efecto positivo en la resistencia a la compresión debido a que disminuye la porosidad del hormigón (Bicer, 2018; Cui et al., 2020; Felekoğlu et al., 2006). En la micrografía de la Figura 41, se observa que la ceniza volante estudiada en este trabajo tiene una amplia distribución de tamaños de partícula (1-15 μm), geometría esférica y casi nula porosidad. Además, los espectros de rayos X de energía dispersiva evidencian la presencia de O, Fe, Si y Al tal y como lo encontraron (Dai et al., 2010).

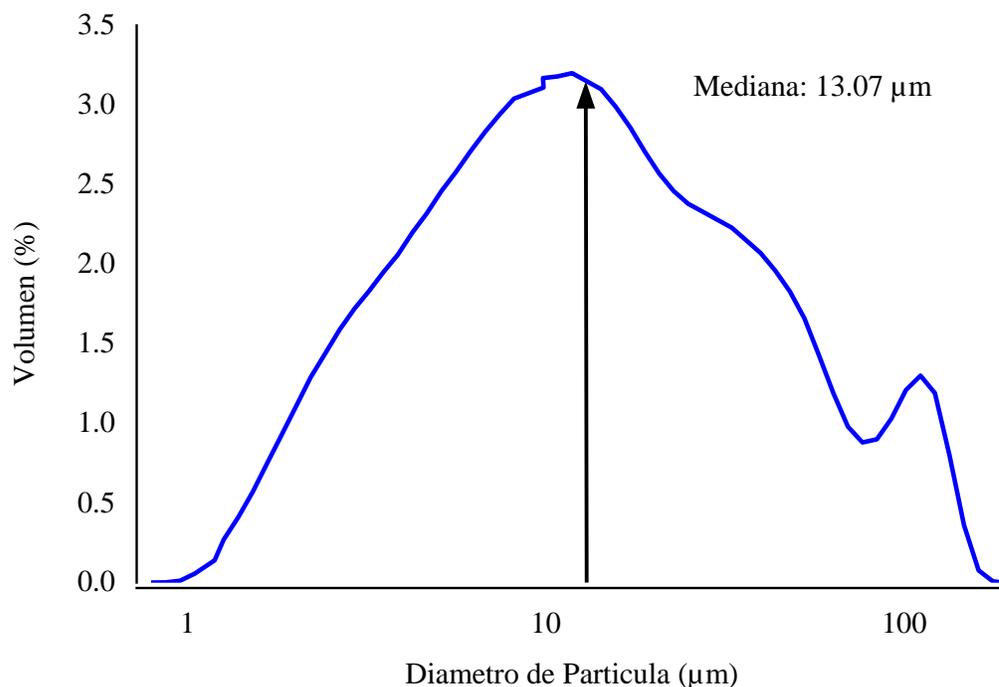


Figura 41 Curva de proporción porcentual en volumen del diámetro de la ceniza volante

En el difractograma de la figura 42, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización mineralógica de la ceniza volante a través de la técnica de difracción de rayos X, se pueden observar cuatro fases minerales presentes en forma de óxidos. Como era de esperarse la fase mayoritaria corresponde al cuarzo (Q) [(SiO₂)

(PDF 12-0708)] con el pico principal en $2\theta \approx 30.69^\circ$, seguido del óxido de hierro y calcio (C) [(Ca_{0.15}Fe_{2.85}O₄) (PDF 46-0291)] con el pico principal en $2\theta \approx 41.03^\circ$, hematita (I) [(Fe₂O₃) (PDF 16-0653)] con el pico principal en $2\theta \approx 38.28^\circ$ y óxido de aluminio (A) Al₂O₃ (PDF 35-0121) con el pico principal en $2\theta \approx 38.25^\circ$, es importante resaltar que estos resultados son característicos de una composición mineralógica típica de la ceniza volante y son consistentes con los reportados (Gomes & François, 2000).

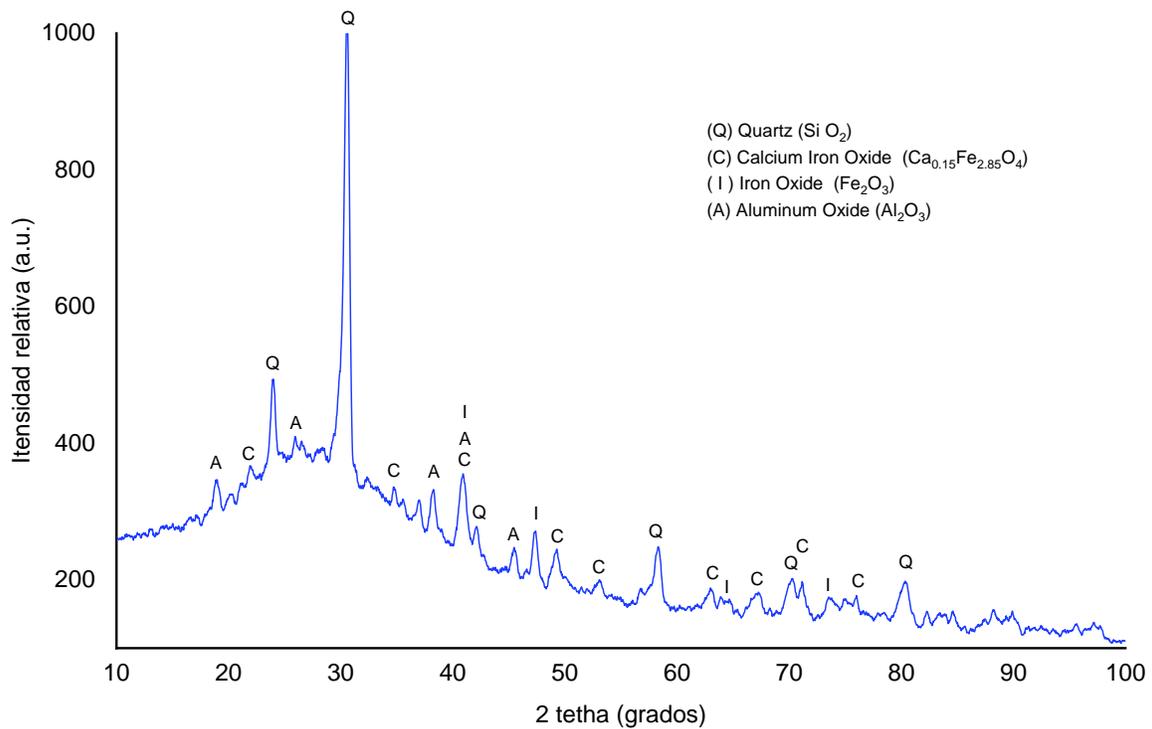


Figura 42 Difractograma de Ceniza Volante

Relaves mineros

Los jales después de haber reducido su tamaño de partícula por medio del molino de bolas se llevó a cabo su caracterización, en la figura 43 podemos observar dos micrografías a 5000 x y 1000x respectivamente, con una distancia de trabajo de 10.1 mm y a 20 kv. Las partículas tienen un tamaño de 5 a 10 micras con formas sólidas y angulosas, algunas partículas se encuentran conglomeradas.

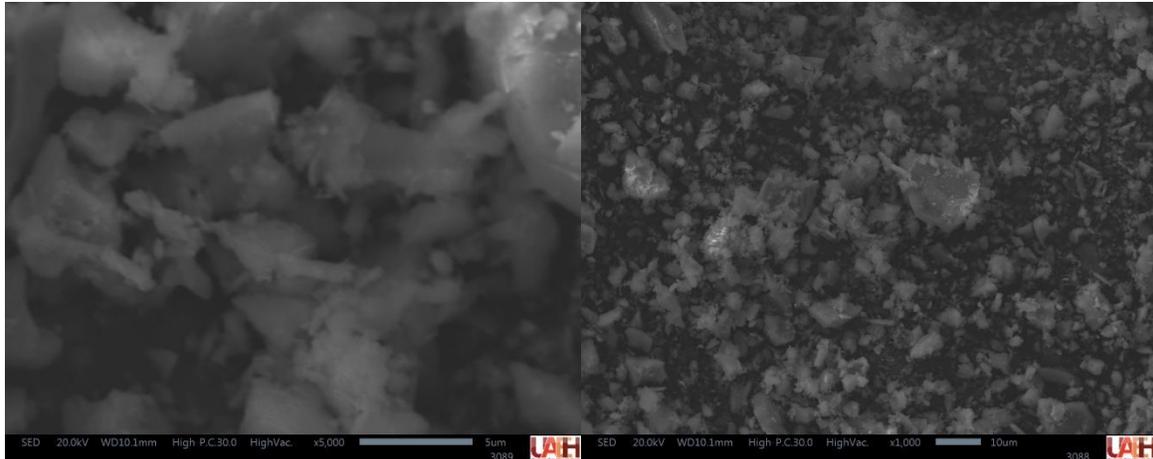


Figura 43 Micrografías de relaves mineros

Por medio de la Espectroscopia de Energía Dispersiva, podemos observar en la figura 44, la presencia de Fe, S, O, C, Ca, Si, Al, K datos que coinciden con lo reportado por (Romero et al., 2008).

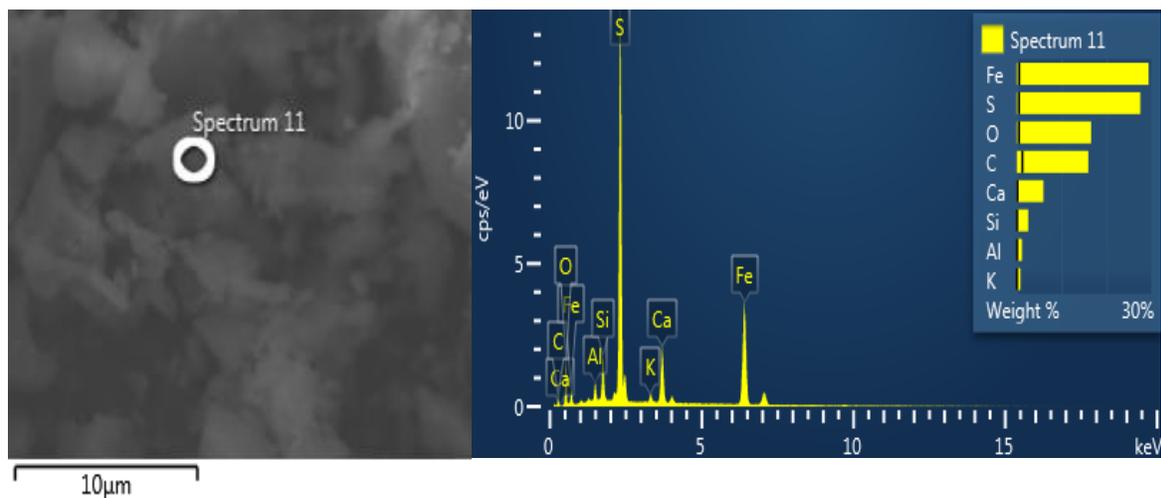


Figura 44 Espectroscopia de energía dispersiva de relaves mineros

En la figura 45 observamos un difractograma de relave minero donde se presenta la caracterización mineralógica, a través de la técnica de difracción de rayos X, observamos cuatro fases primordiales de las cuales la Calcita presenta el pico más intenso en $2\theta \approx 25.16^\circ$ perteneciente a la calcita (C) [(CaCO₃) (PDF 96-900-9669)], en $2\theta \approx 31.02^\circ$ el pico principal del cuarzo (Q) [(SiO₂) (PDF 96-901-0145)], $2\theta \approx 38.05^\circ$ el pico principal del Bomite (B) [(Cu_{1.375}Fe_{0.275}S) (PDF 96-900-3724)] y en $2\theta \approx 55.15^\circ$ el pico principal del Iron Sulfide (S) [(FeS) (PDF 96-150-4401)].

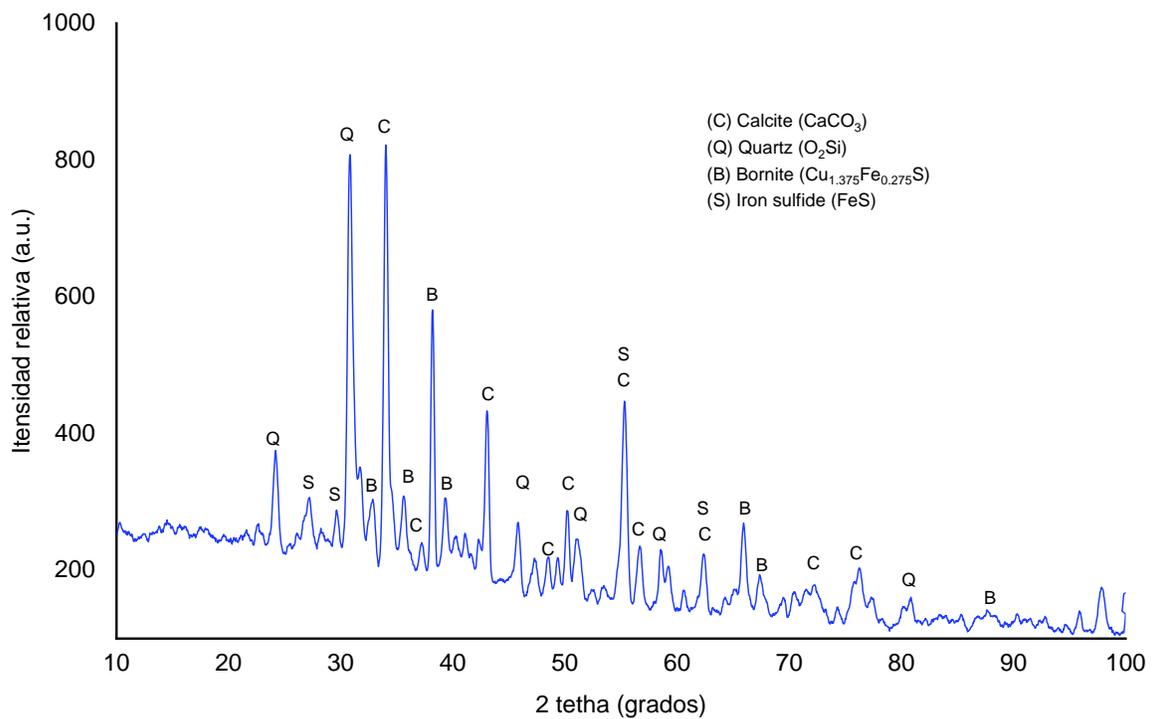


Figura 45 Difractograma de relave minero

Morteros con ceniza volante

Evaluación de resistencia a la compresión

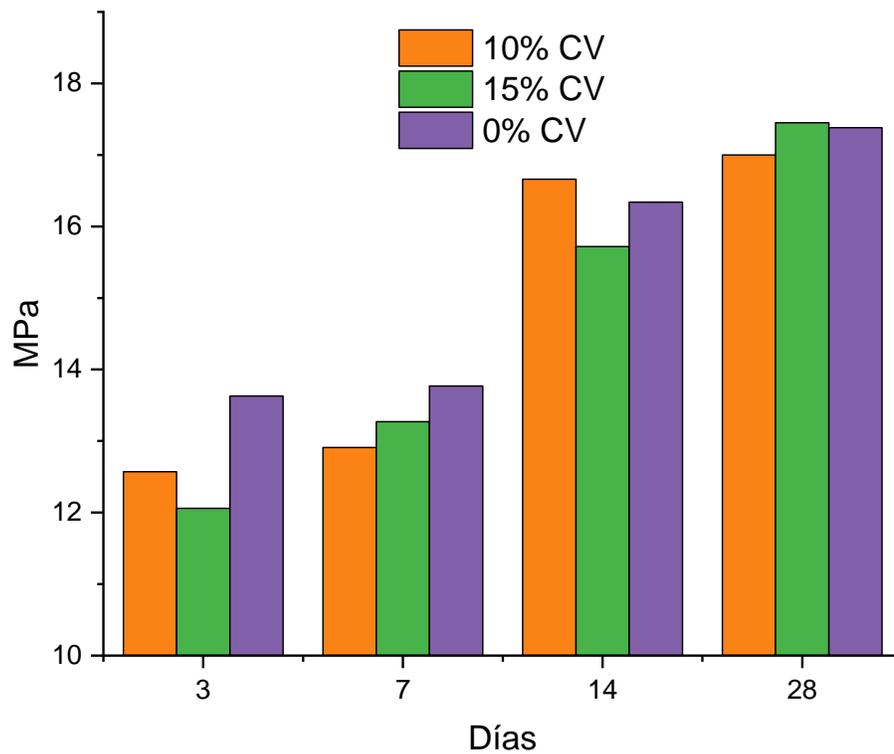
Los resultados obtenidos durante la prueba de resistencia a la compresión de los morteros con adición de ceniza volante designados, estándar, 10 y 15% de sustitución de cemento con ceniza volante, de 5 x 5 x 5 cm, fabricados con las dosificaciones expuestas en la tabla 4 a 3, 7, 14 y 28 días después de su fabricación de los especímenes, se presentan en la tabla 11.

Tabla 11 Resistencia a la compresión en MPa de morteros con adición de ceniza volante

<i>Días</i>	<i>10% de sustitución</i>	<i>15% de sustitución</i>	<i>Estándar</i>
3	12.57	12.06	13.63
7	12.91	13.27	13.77
14	16.66	15.72	16.34
28	17.00	17.45	17.38

La resistencia a la compresión del mortero que contiene 15% de sustitución de ceniza volante a los 3 días es de 12.06 MPa y del estándar de 13.63 MPa, existiendo una diferencia de 1.57 MPa, sin embargo, a los 28 días esta diferencia disminuye a 0.07 MPa con 17.45 MPa y 17.38 MPa respectivamente, este comportamiento de tener una baja resistencia a edades tempranas en las mezclas que contiene una sustitución de ceniza volante, coincide con lo reportado por anteriores investigadores (Gonen & Yazicioglu, 2007), al mismo tiempo podemos ver en la gráfica 1 que el mortero con la mayor resistencia es el que tiene un 15% de sustitución con ceniza volante a los 28 días, sin embargo podemos observar que la desviación estándar intercepta horizontalmente con el dato del mortero sin sustitución, es decir ambos datos son muy similares evidencia de que es posible alcanzar la misma resistencia a los 28 días con una sustitución del 15% con CV,

también podemos observar en gráfica 1, que la resistencia a la compresión aumenta de manera significativa entre los 7 y 14 días, datos que sugieren que la resistencia de las mezclas con cemento y ceniza aumenten a edades tardías en mayor proporción que las mezclas que contienen únicamente cemento comportamiento ya reportado (Viera & Silvia, 2014).



Gráfica 1 Resistencia a la compresión en MPa de morteros con ceniza volante

Evolución estructural de los morteros

Después de haber realizado la prueba de resistencia a la compresión realizado la preparación de las muestras, fueron analizadas por DRX a los 3, 7, 14 y 28 días después de su fabricación por un difractómetro marca Inel Equinox 2000, en un intervalo de 5° a 100° utilizando radiación de Cobalto ($\text{CoK}\alpha_1$).

En las figuras 46 ,47 y 48 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización mineralógica de los morteros denominados, estándar, 10 y 15% de sustitución de cemento con ceniza volante a través de la técnica de difracción de rayos X, realizadas a los los 3, 7, 14 y 28 días, respectivamente, encontrando cuatro principales fases, la Calcita (C) (CCaO_3) PDF (96-900-7690) pico principal a los 34.17°, Dolomita (D) ($\text{CCa}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{O}_3$) PDF (96-900-3530) pico principal a los 34.17°, Cristobalita (Cr) (O_2Si) PDF (96-900-1582) pico principal a los 26.2° y Portlandita (P) hidróxido de calcio (CaH_2O_2) PDF (96-100-8782) pico principal a los 39.81°, siendo esta última producto de la hidratación del cemento, es importante resaltar que estos resultados son característicos de una composición mineralógica típica de pastas de concreto, consistentes con los reportados por Rego y colaboradores (Rêgo et al., 2019). En las figuras 46 ,47 y 48, el crecimiento de los picos de portlandita, más evidentemente a los 21.23° y 39.81°, el cambio de intensidad de estas fases mineralógicas están relacionadas con el tiempo de fabricación del mortero, dato que es consistente con la hidratación de pastas propuesto por Lothenbach (Lothenbach et al., 2008), estos crecimientos constantes muestran que se ha detenido la hidratación de los morteros a los 3, 7, 14 y 28 días (Tobón et al., 2012).

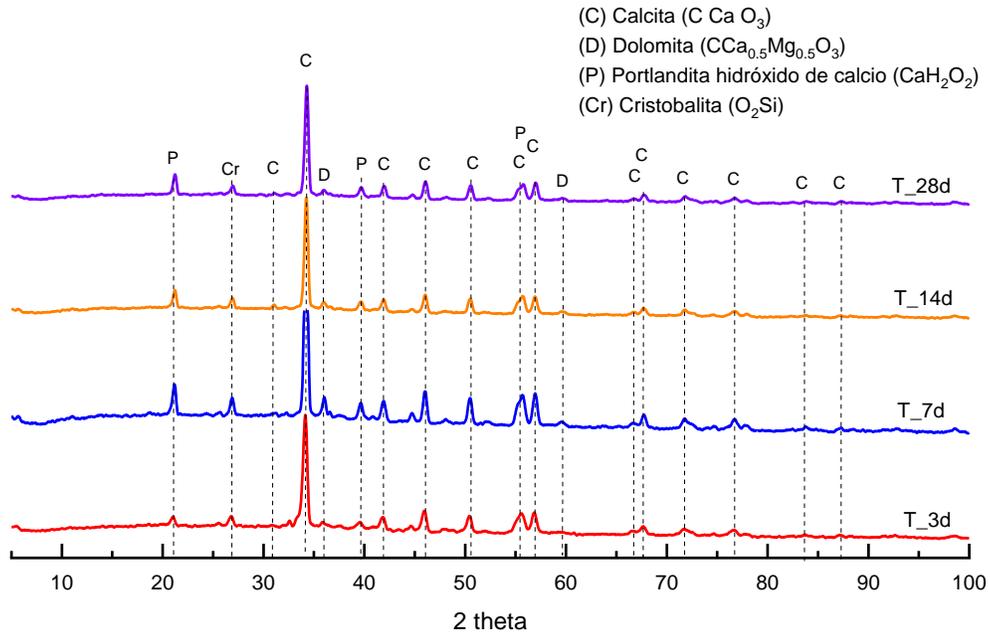


Figura 46 Difractograma de mortero estándar a los 3, 7, 14 y 28 días de fabricación y evolución de las fases de C Calcita (C Ca O_3), D Dolomita ($\text{CCa}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{O}_3$), P Portlandita hidróxido de calcio (CaH_2O_2) y Cr Cristobalita (O_2Si)

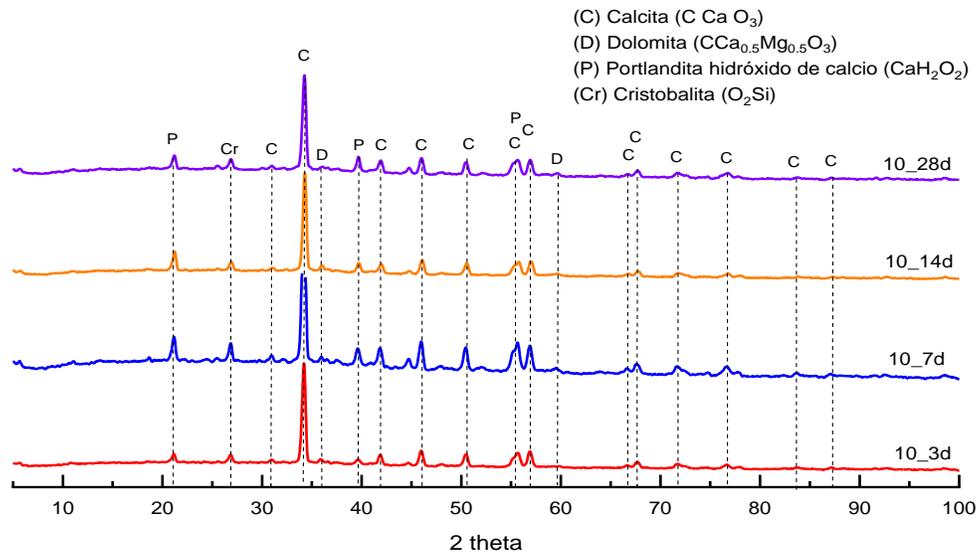


Figura 47 . Difractograma de mortero con 10% de sustitución de CV a los 3, 7, 14 y 28 días de fabricación y evolución de las fases de C Calcita (C Ca O_3), D Dolomita ($\text{CCa}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{O}_3$), P Portlandita hidróxido de calcio (CaH_2O_2) y Cr Cristobalita (O_2Si)

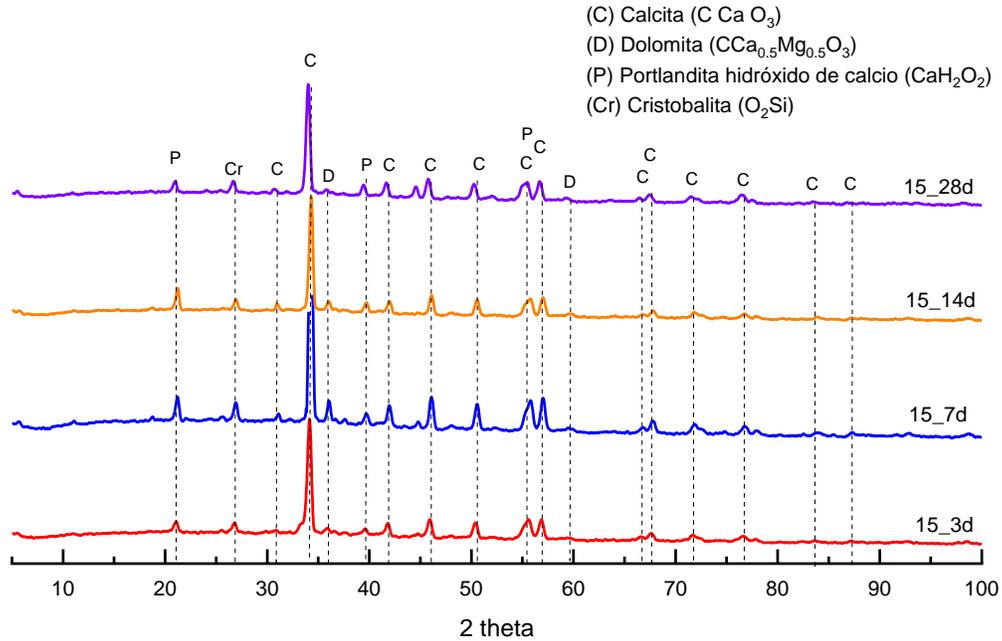


Figura 48 Difractograma de mortero con 15% de sustitución de CV a los 3, 7, 14 y 28 días de fabricación y evolución de las fases de C Calcita (CaO), D Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), P Portlandita hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y Cr Cristobalita (SiO_2)

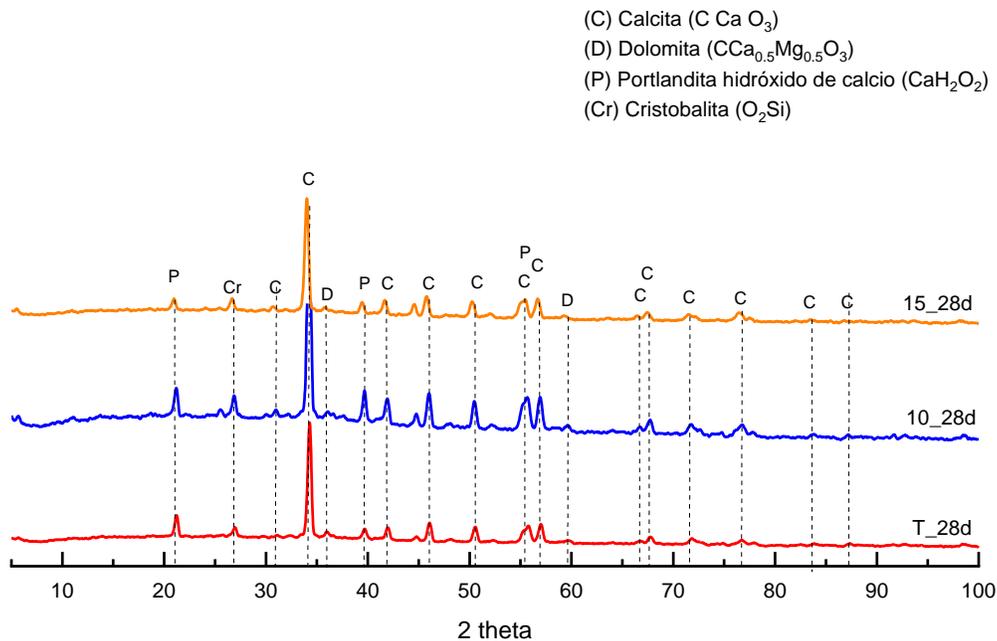


Figura 49 Difractograma a los 28 días del mortero estándar, con 10% y 15% de sustitución de CV a los 3, 7, 14 y 28 días de fabricación y evolución de las fases

de C Calcita ($C Ca O_3$), D Dolomita ($CCa_{0.5}Mg_{0.5}O_3$), P Portlandita hidróxido de calcio (CaH_2O_2) y Cr Cristobalita (O_2Si)

Con respecto al incremento de los picos de la fase de portlandita a los 21.23° y 39.81° en la figura 46, donde se muestran los difractogramas del mortero estándar, se observa que el pico a los 21.23° con 1408 conteos es mayoritario respecto al que se encuentra a los 39.81° con 1056 conteos, a los 28 días, en la figura 47, donde se muestran los difractogramas del mortero que contienen ceniza volante con un 10% de sustitución, se observa que el pico a los 39.81° con 1201 conteos es mayoritario respecto al que se encuentra a los 21.23° con 1079 conteos, esta diferencia de intensidad en los picos a los 28 días, sugiriendo que los cristales de esta a fase pueden tener un crecimiento preferencial, en la figura 48, donde se muestran los difractogramas del mortero que contienen ceniza volante con un 15% de sustitución, se observa que el pico a los 21.23° con 745 conteos es mayoritario respecto al que se encuentra a los 39.81° con 699 conteos, en la figura 49 muestra los difractogramas de los morteros estándar, 10 y 15% de sustitución a los 28 días, donde se observa la diferencia de intensidad en los picos a los 28 días, lo que sugiere que el porcentaje de ceniza volante en sustitución del cemento portland modifica el crecimiento de los cristales de la fase de portlandita.

Evolución morfológica de los morteros

El pico de mayor intensidad en los difractogramas de las figuras 46 ,47 y 48, es la Calcita (C) ($CCaO_3$) 96-900-7690 pico principal a los 34.17° , este pico dificulta la identificación de la Tobermorita ($Ca_{2.5}HO_9Si_3$) 96-900-5448 el cual tiene su principal pico a los 34.28° , esta es una fase cristalina de los silicatos cálcicos hidratados (C–S–H), otra fase no localizada es la ($3CaO Al_2O_3 3CaSO_4 32H_2O$) fase producto de la hidratación del cemento portland, esta fase se dificulta su identificación por medio de DRX.

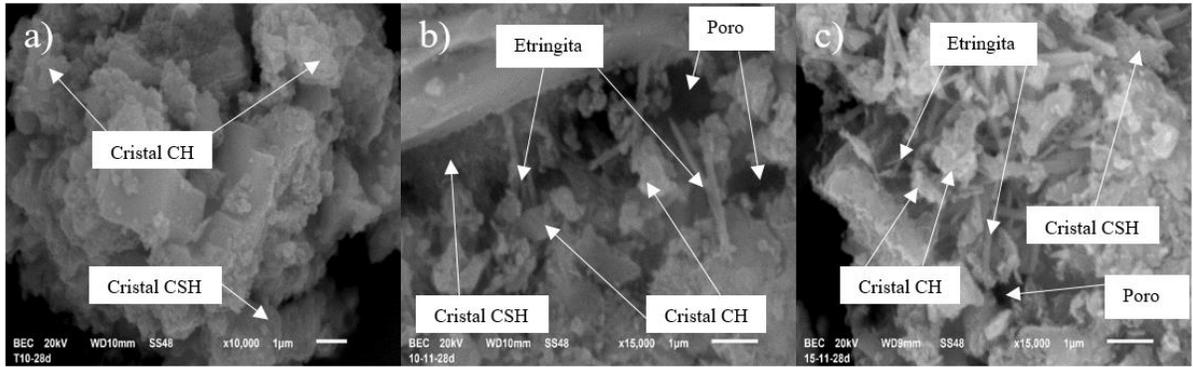


Figura 50 Micrografía del mortero estándar, 10 y 15% de sustitución de cemento portland con ceniza volante a los 28 días de fabricación

En la figura 50 se muestran las micrografías del mortero estándar, 10 y 15% de sustitución de cemento portland con ceniza volante a los 28 días de fabricación, en la figura 50 (b) se observan formaciones de agujas característicos de la etringita fase que no se identificó por medio de Difracción de Rayos X, cristales de portlandita (CH) laminados, así como granos de CSH, una comparación entre las figuras (b) y (c), muestra que el número y tamaño de poros se reduce siendo menos porosa la muestra con un 15% de ceniza volante, dato que también ha sido propuesto por Liu y colaboradores (Liu et al., 2021), en la figura 50 (a) podemos observar cristales de portlandita y granos de CSH, sin embargo no se localizaron las agujas características de la fase de etringita. Al comparar la figura 50 (a), (b) y (c) podemos ver que los cristales de CH en (a) se encuentran aglomerados mientras que en (b) y (c) se encuentran de manera aislada pero rodeadas por otros cristales como CSH y etringita, dato que sugiere las diferencias encontradas en la fase de portlandita con los cambios de intensidad en sus principales picos de los difractogramas mostrados en la figura 26.

Las Figuras 51 c), d) y 8 e), f) muestran las imágenes detalladas obtenidas por microscopía electrónica de barrido para las muestras de mortero sustituyendo por 10% y 15% de cenizas volantes a los 28 días de curado respectivamente. En estas muestras, además de las especies minerales producto de la hidratación (portlandita y etringita) identificadas en la muestra sin reemplazo del cemento por cenizas volantes (Figura 51 a), b)), además, se observaron partículas de cenizas volantes

en tres formas diferentes. formas: partículas recubiertas de productos de hidratación portlandita y etringita (Figura 51 a)), partículas con una superficie lisa y aparentemente lisa (Figura 51 b)) y partículas de cenizas volantes que muestran signos de ataque en su superficie (Figura 51 c)). Se ha reportado (Luo et al., 2011), en una investigación sobre el efecto de las cenizas volantes en la microestructura de la pasta de cemento adicionado, que a los 28 días de curado las partículas de ceniza presentan estas características.

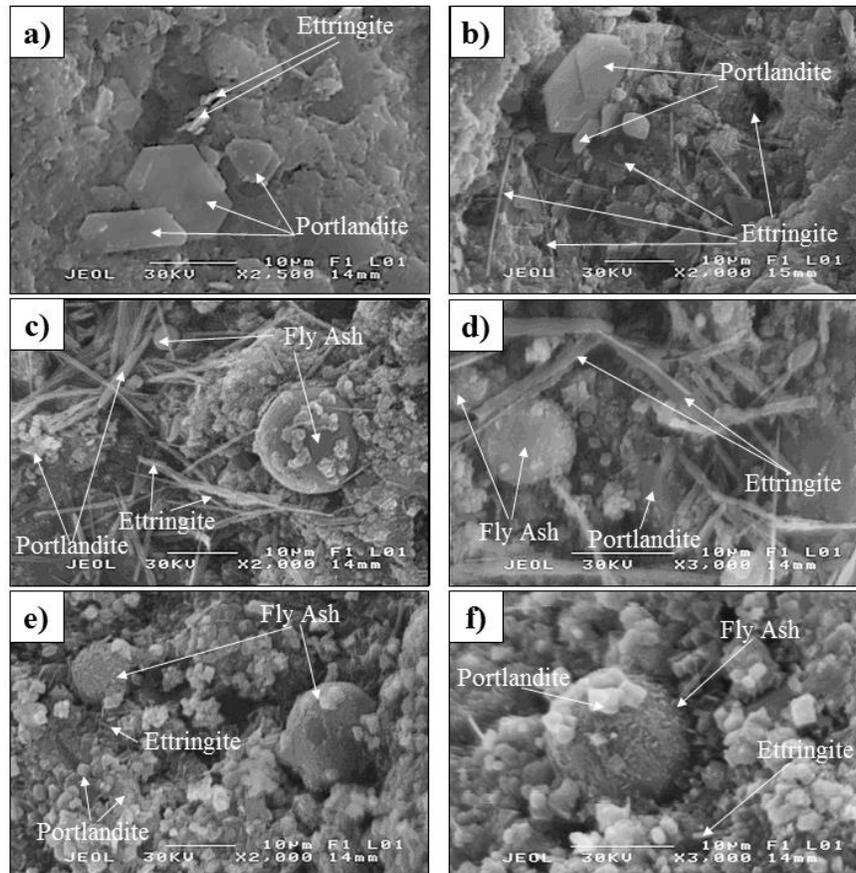


Figura 51 SEM de: a), b) muestras de morteros sin ceniza volante. b), c) muestras de morteros en sustitución del cemento Portland al 10% de cenizas volantes. d), e) muestras de morteros en los que se sustituya el cemento Portland por un 15% de ceniza volante.

Morteros con relaves mineros

Evaluación de resistencia a la compresión

Los resultados obtenidos durante la prueba de resistencia a la compresión de los morteros con adición de jal designados, estándar, 10 y 15% de sustitución de cemento con ceniza volante, de 5 x 5 x 5 cm, fabricados con las dosificaciones expuestas en la tabla 5 a 3, 7, 14 y 28 días después de su fabricación de los especímenes, se presentan en la tabla 12.

Tabla 12 Resistencia a la compresión en MPa de morteros con adición de jal

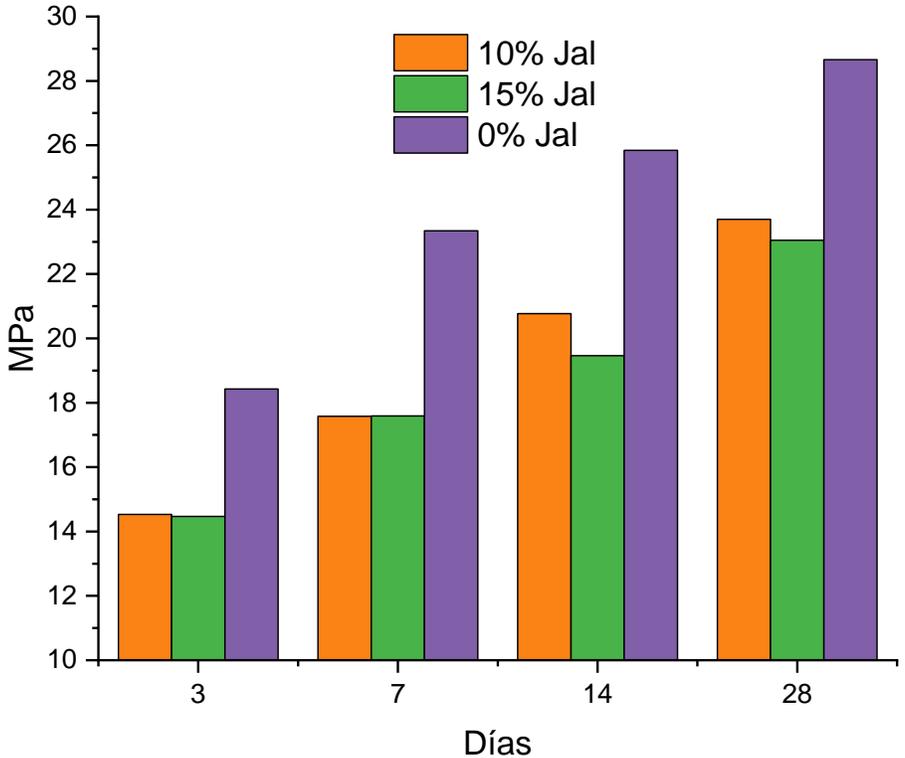
<i>Días</i>	<i>10% de sustitución</i>	<i>15% de sustitución</i>	<i>Estándar</i>
3	14.53	14.47	18.43
7	17.58	17.59	23.34
14	20.77	19.46	25.84
28	23.70	23.05	28.66

Podemos observar en la tabla 12 podemos observar un comportamiento ascendente en función del tiempo de fabricación, sin embargo, las diferencias entre los especímenes con adición de 10 y 15% de jal se encuentran por debajo de la resistencia del mortero estándar que es de 18.43 MPa, a los 3 días la diferencia es de 3.9 y 3.97 MPa respectivamente.

La resistencia máxima de los tres morteros comparados a los 28 días es del mortero estándar con 28.66 MPa, habiendo una diferencia de 4.96 y 5.61 MPa respecto a los morteros adicionados con un 10 y 15% respectivamente.

También podemos ver que la diferencia a los 3 y 7 días entre los morteros adicionados de 10 y 15% con jal es mínima de tan solo 0.06 y 0.01 MPa, sin

embargo, a los 14 y 28 días, la diferencia de resistencia se incrementa a 1.31 y 0.65 MPa respectivamente, a los 28 días quien tuvo una mejor resistencia entre los morteros adicionados con jal es el mortero con un 10% con 23.70 MPa.



Gráfica 2 Resistencia a la compresión en MPa de morteros con jal

En la gráfica 2 se observa que las resistencias de los morteros con adición en ningún momento se encuentran por encima de la resistencia del mortero estándar, sin embargo, podemos ver un comportamiento similar de los morteros con adición de jal hasta los 7 días y a partir de los 14 una diferencia considerable en la resistencia a la compresión.

CONCLUSIONES

La resistencia a la compresión se ve afectada, así como la microestructura en función del tiempo de fabricación de los morteros con una sustitución con ceniza volante, con referencia un estándar de comparación sin sustitución de los cuales se evaluó su resistencia a la compresión y su evolución de su microestructura por medio de Difracción de rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido, con base a este análisis se obtienen las siguientes conclusiones.

La resistencia a la compresión a los 28 días de fabricación del mortero estándar, 10 y 15% de sustitución con ceniza volantes es de 17.38, 17.0 y 17.45 respectivamente, evidencia de que es posible alcanzar la misma resistencia a los 28 días con una sustitución de cemento portland con un 15% de ceniza volante en morteros.

La ceniza volante provoca en los morteros con sustitución una baja resistencia a la compresión en edades tempranas, el mortero estándar y el de 15% de sustitución de ceniza volante tienen una diferencia sobre la resistencia a la compresión a los 3 días de 11.54% y una diferencia de tan sólo 0.4% a los 28 días.

Los picos principales de la fase de portlandita en los difractogramas tomados de las muestras con ceniza volante tanto del mortero estándar como los que tienen una sustitución de ceniza volante de 10 y 15% incrementa progresivamente a los 3, 7, 14 y 28 días de fabricación, evidencia de que la hidratación del cemento ha sido posible interrumpir a distintas edades.

Mediante la técnica de difracción de rayos X se confirmaron las composiciones mineralógicas típicas del cemento Portland 30R y la ceniza volante. La amplia distribución de tamaños de partícula (1-15 μm), la geometría esférica de la ceniza volante y su casi nula porosidad dieron lugar a un incremento en la resistencia a la compresión. Por otro lado, la resistencia a la compresión y la microestructura de los morteros se modificaron en función de la edad de fabricación, a edades tempranas (3 y 7 días) la adición de ceniza volante no promovió un incremento en la resistencia a la compresión. Los picos principales de la fase de portlandita en los

difractogramas para 0, 10 y 15% CV incrementaron progresivamente a los 3, 7, 14 y 28 días de fabricación, sugiriendo que la hidratación del cemento está en función de la edad del mortero. Los cambios de intensidad en los picos de la fase mineralógica de portlandita a valores de $2\theta \sim 21.23^\circ$ y 39.81° de los morteros confirmaron que la ceniza volante modifica el crecimiento de los cristales de esta fase. Finalmente, la sustitución del cemento portland por ceniza volante resultó una alternativa potencial para la fabricación de concretos a menor costo, debido al ahorro de la sustitución del 10 y 15% del cemento portland, otorgando un valor comercial a la ceniza volante.

Las resistencias a la compresión en los morteros adicionados con jal se ven negativamente afectadas, a los tres días hay una diferencia con el mortero estándar de 3.90 y 3.97 MPa con los morteros de 10 y 15% y a los 28 días esta diferencia se incrementa a 4.96 y 5.61 MPa respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

- BASTM C150/C150M-09. (2007). *Especificación Normalizada para Cemento Portland*.
<https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C150C150M-09-SP.htm>
- ASTM C618 - 03. (2003). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*.
- ASTM-C-125. (2011). *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*.
- ASTM-C-270. (2011). *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*.
- Bicer, A. (2018). Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of fly ash-cement composites. *Thermal Science and Engineering Progress*, 8, 78–82.
- Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., Scrivener, K. L., & Thomas, J. J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and concrete research*, 41(12), 1208–1223.
- Cui, Y., Liu, J., Wang, L., Liu, R., & Pang, B. (2020). A model to characterize the effect of particle size of fly ash on the mechanical properties of concrete by the grey multiple linear regression. *Computers and Concrete*, 26(2), 175–183.
<https://doi.org/10.12989/cac.2020.26.2.175>

- Dai, S., Zhao, L., Peng, S., Chou, C.-L., Wang, X., Zhang, Y., Li, D., & Sun, Y. (2010). Abundances and distribution of minerals and elements in high-alumina coal fly ash from the Jungar Power Plant, Inner Mongolia, China. *International Journal of Coal Geology*, 81(4), 320–332.
- Duda, W. H. (2013). *Manual tecnológico del cemento*. Editores Técnicos Asociados.
- Echlin, P. (2011). *Handbook of sample preparation for scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer Science & Business Media.
- Erdoğdu, K., & Türker, P. (1998). Effects of fly ash particle size on strength of Portland cement fly ash mortars. *Cement and Concrete Research*, 28(9), 1217–1222.
- Fallas, G. G., Madrigal, C. H., García, M. P., Valenciano, I. R., Vega, L. D. R., & Guzmán, G. S. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Tecnología en marcha*, 25(2), 80–86.
- Felekoğlu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A., & Uyulgan, B. (2006). The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. *Cement and concrete research*, 36(9), 1719–1726.
- García Ortiz, H. (2019). *Evaluación de la ceniza volante como aditivo y/o sustituto porcentual del cemento portland, en la fabricación de blocks (vibrocompactados)*. <http://200.57.56.70:8080/xmlui/handle/231104/2455>
- Giraldo, M. A., & Tobón, J. I. (2006a). Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. *Dyna*, 73(148), 69–81.

- Giraldo, M. A., & Tobón, J. I. (2006b). Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. *Dyna*, 73(148), 69–81.
- Gombrich, E. H., Torroella, R. S., & Setó, J. (1997). *Historia del arte*. Phaidon New York.
- Gomes, S., & François, M. (2000). Characterization of mullite in silicoaluminous fly ash by XRD, TEM, and ²⁹Si MAS NMR. *Cement and concrete research*, 30(2), 175–181. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00226-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00226-4)
- Gonen, T., & Yazicioglu, S. (2007). The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete. *Building and Environment*, 42(8), 3080–3085.
- Gregg, J. S., Andres, R. J., & Marland, G. (2008). China: Emissions pattern of the world leader in CO₂ emissions from fossil fuel consumption and cement production. *Geophysical Research Letters*, 35(8).
- History of cement*. (s/f). Recuperado el 25 de mayo de 2022, de <https://www.understanding-cement.com/history.html>
- IMCyC. (2004). *Propiedades del Concreto*. <http://www.imcyc.com/cyt/julio04/CONCEPTOS.pdf>
- IMCyC. (2016). El concreto. *INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO A.C.* <http://www.imcyc.com/concreto/>
- Kutchko, B. G., & Kim, A. G. (2006). Fly ash characterization by SEM–EDS. *Fuel*, 85(17–18), 2537–2544. <https://doi.org/doi:10.1016/j.fuel.2006.05.016>
- Lea, F. M., Hewlett, P. C., & Liska, M. (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete*.

- Liu, R., Chi, Y., Jiang, Q., Meng, X., Wu, K., & Li, S. (2021). Physical and mechanical properties of previous concrete with multi-admixtures. *Magazine of Concrete Research*, 73(9), 448–463.
- Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., & Scrivener, K. (2008). Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 848–860.
- Luo, Z. T., Ma, B. G., Yang, J. J., & Liu, J. X. (2011). Effects of Fineness on Activity Character of Fly Ash. *Advanced Materials Research*, 266, 114–117.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.266.114>
- Niksa, S. (2020). 1—Coal utilization technologies. En S. Niksa (Ed.), *Process Chemistry of Coal Utilization* (pp. 1–21). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818713-5.00001-0>
- NMX-C-061-ONNCCE-2015. (2015). *Industria de la Construcción—Cementantes Hidráulicos—Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos*.
- NMX-C-156-ONNCCE-2010. (2010). *Industria de la Construcción—Concreto Hidráulico—Determinación Del Revenimiento En El Concreto Fresco*.
- NMX-C-159-ONNCCE-2016. (2016). *Industria de la Construcción – Concreto – Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*.
- NMX-C-170-1997-ONNCCE. (1997). *Industria de la Construcción – Agregados – Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo al Tamaño Requerido para las Pruebas*.

NMX-C-486-ONNCCE-2014. (2014). *Industria de la construcción—Mampostería—Mortero para uso estructural—Especificaciones y métodos de ensayo.*

ONNCCE. (2019). *Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.*
<https://www.onncce.org.mx/index.php/es/onncce>

Pedro Fernandez Diez. (2008). *PULVERIZADORES DE CARBÓN.*
PULVERIZADORES DE CARBÓN.
https://files.redsauce.net/js/pdfjs/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Frs.m1.redsauce.net%2FAppController%2Fcommands_RSM%2Fapi%2Fapi_getFile.php%3FitemID%3D181%26propertyID%3D20%26RStoken%3D59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38

PEREZ, J. L. L. (2012). *Mineralogical characterization of the tailing deposits of La Prieta Mine in Parral Chihuahua, México.*

Rêgo, J. H. da S., Frías Rojas, M., Moragues Terrades, A., Fernández-Carrasco, L., Morales, E. R., & Sánchez de Rojas, M. I. (2019). Effect of Partial Substitution of Highly Reactive Mineral Additions by Nanosilica in Cement Pastes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(1), 04018360.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002567](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002567)

Robayo, R. A., Matthey, P. E., Silva, Y. F., & Delvasto, S. (2016). Obtención de un concreto autocompactante empleando adiciones de escoria de carbón finamente molida. *Ingeniería y desarrollo*, 34(1), 24–43.

Romero, F. M., Armienta, M. A., Gutiérrez, M. E., & Villaseñor, G. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental

de Jales Mineros. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 24(2), 43–54. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0188-49992008000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Sánchez, F. J. A. (2002). *Historia, caracterización y restauración de morteros*. Universidad de Sevilla.

Santaella, L. E. (2000). Caracterización física, química y mineralógica de las cenizas volantes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 10(1), 11.

Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile). (2019). *Preguntas frecuentes sobre relaves*. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf>

Siddique, R. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 487–493. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.002>

Simonnet, C. (2009). *Hormigón: Historia de un material*. Editorial NEREA.

Standard Specifications for Architectural Cast Stone.pdf. (s/f). Recuperado el 25 de mayo de 2022, de https://www.caststone.org/technical/Standard_Specifications_for_Architectural_Cast_Stone.pdf

Tobón, J. I., Payá, J. J., Borrachero, M. V., & Restrepo, O. J. (2012). Mineralogical evolution of Portland cement blended with silica nanoparticles and its effect on mechanical strength. *Construction and Building Materials*, 36, 736–742.

Universidad de Granada. (2012). *Rocas sedimentarias*. https://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet_sed.htm

- Valenzuela, C., & ROSSANI, H. (2019). *Resistencia de un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con cemento sustituido en 5%, 10% y 15% por relave de la mina Antamina.*
- Viera, S. M. M., & Silvia, M. (2014). *Estudio microestructural y de los procesos de hidratación de cementos con adiciones* [PhD Thesis]. ETSI Caminos, Canales y Puertos (UPM).
- Young, G., & Yang, M. (2019). Preparation and characterization of Portland cement clinker from iron ore tailings. *Construction and Building Materials*, 197, 152–156.