



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias de la Construcción

Puzolana reciclada para morteros con cemento Portland en base de ceniza de bambú

Opción de titulación

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias de la Construcción

Presenta:

Arq. Ana Carolina Berlanga Pérez

Dirigido por:

Dr. José Luis Reyes Araiza

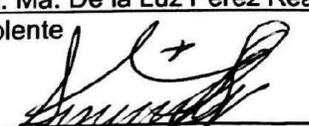
Dr. José Luis Reyes Araiza
Presidente

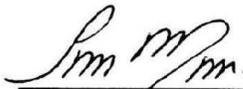
Ing. Rubén Ramírez Jiménez
Secretario

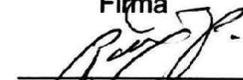
Dr. José de Jesús Pérez Bueno
Vocal

Dr. Alejandro Manzano Ramírez
Suplente

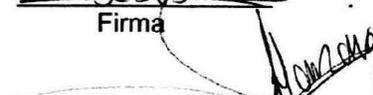
Dra. Ma. De la Luz Pérez Rea
Suplente

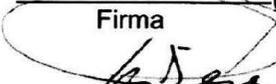

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

RESUMEN

En el presente trabajo se explora un material que normalmente se utiliza estructuralmente, el cual es el bambú. Para esta investigación se utiliza el bambú en ceniza, se obtuvo mediante la quema del mismo. La metodología presenta por inicio la caracterización de la ceniza, después se presenta la propuesta de proporciones a utilizar. Dentro de las proporciones mostradas, se utilizaron tres puzolanas más: la ceniza de cáscara de arroz, la cáscara de arroz y la ceniza volante. El objetivo principal es encontrar las propiedades de la ceniza de tallo de bambú, junto con la reacción puzolánica de la misma con cemento y cal. Lo que se espera es estudiar y observar el tipo de microestructuras que se formen entre las puzolanas, la cal y el cemento. Dentro de la caracterización de la ceniza de bambú, se realizaron diferentes calcinaciones de dos tipos de bambú: *Guadua Angustifolia* y *Holdhamii*. Las mezclas propuestas se realizaron con una mezcla de ceniza de los dos tipos de bambú, puesto que se contaba con poco material. Después de realizadas las 8 muestras que se presentan dentro de la metodología, se probaron a fuerza de compresión a la edad de 7 días. Los resultados obtenidos son evaluados y comparados, para poder llegar a la conclusión de cuál mezcla resulta con mejores datos de fuerza a compresión. Y finalmente estos resultados son comparados con los resultados del estado del arte.

(**Palabras clave:** bambú, puzolanas, reacción puzolánica, cenizas, residuos agrícolas)

SUMMARY

This work investigates a material that is usually used in structures, which is bamboo. For this research we present bamboo ash, which was obtained by burning the culms. The methodology presents the characterization of bamboo ash, then it presents the proposal of proportions that are going to be made. In the proportions we use three more pozzolans: rice husk ash, rice husk and fly ash. The principal objective of the investigation is to find the right proportions, also the pozzolanic reaction of bamboo ash with cement and lime. What we expect is to study and observe the microstructures that will form between pozzolans, cement and calcium hydroxide. In the characterization of bamboo ash, we realized calcinations of two types of bamboo: *Guadua Angustifolia* and *Holdhamii*. The mixtures that were proposed were realized with the mix of the two types of bamboo ash, this was because the material we had was few. After we made the eight mixtures that are presented in the methodology, we tested them to find their compression strength with the age of seven days. The obtained results were evaluated and compared, to get to the conclusion of which mixture works better. And finally this results were compared with the ones from the state of art.

(**Key words:** bamboo, pozzolans, pozzolanic reaction, ashes, agricultural wastes)

AGRADECIMIENTOS

A todos los miembros, estudiantes y profesores, que conforman la Maestría en Ciencias de la Construcción. Con especial énfasis al Dr. José Luis Reyes por su apoyo y ánimos dados.

A mi familia por su apoyo y paciencia, aunque estemos alejados siempre están en mi mente y corazón.

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo del CONACYT y de la Universidad Autónoma de Querétaro.

“La creatividad es ver lo que todo el mundo ve, pero idear un pensamiento nuevo que nunca se ha pensado antes y expresarlo de alguna manera.”

Neil deGrasse Tyson

Dedicado a Baldo.

TABLA DE CONTENIDOS

PORTADA	i
RESUMEN	i
SUMMARY	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	x
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 DEFINICIÓN DEL PROYECTO	1
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	1
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES	2
1.4 HIPÓTESIS	3
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES	3
1.5.1 ALCANCES	3
1.5.2 LÍMITES	4
1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS	4
2 ANTECEDENTES	5
2.1 BAMBÚ	5
2.1.1 EL BAMBÚ EN MÉXICO	7
2.2 PUZOLANAS	10
2.2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LAS PUZOLANAS	10
2.2.2 PUZOLANAS NATURALES	11
2.2.3 PUZOLANAS ARTIFICIALES	15
2.2.3.1 CENIZA DE HOJA DE BAMBÚ	15
2.2.3.2 CENIZAS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS	17
3 FUNDAMENTO TEÓRICO	20
3.1 CEMENTO PORTLAND	20

3.1.1	QUÍMICA DEL CEMENTO	23
3.1.2	MICROESTRUCTURA DEL CONCRETO	28
3.1.3	PROCESO DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND	29
3.1.4	AGUA EN EL CONCRETO	36
3.2	ADICIONES MINERALES	38
3.2.1	PUZOLANAS	39
3.2.1.1	PUZOLANAS NATURALES	39
3.2.1.2	PUZOLANAS ARTIFICIALES	40
3.2.1.3	REACCIÓN PUZOLÁNICA	42
4	METODOLOGÍA	48
4.0.1	ESPECIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES	48
4.0.1.1	CEMENTO	48
4.0.1.2	AGREGADO FINO	49
4.0.1.3	AGUA	50
4.0.1.4	CENIZA DE TALLO DE BAMBÚ	51
4.0.1.5	CENIZA VOLANTE	58
4.0.2	DISEÑO EXPERIMENTAL	58
4.0.3	MEZCLADO	58
4.0.4	ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES	59
4.0.5	MÉTODO DE PRUEBA	61
4.0.6	CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS FINALES	63
5	RESULTADOS	64
5.0.1	RESULTADOS DE CALCINACIÓN	64
5.0.2	RESULTADOS DE pH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	67
5.0.3	RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	71
5.0.3.1	FLUORESCENCIA DE RAYOS X POR ENERGÍA DISPERSIVA	71
5.0.3.2	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)	73
5.0.4	RESULTADOS DE PRUEBA A COMPRESIÓN	82
5.0.4.1	MUESTRAS PRELIMINARES	82
5.0.4.2	MUESTRAS CON CAL	83
5.0.4.3	MUESTRAS CON CONCRETO	84
6	CONCLUSIONES	86
	REFERENCIAS	87

LISTA DE FIGURAS

2.1	Variedad de bambú: Guadua Angustifolia	9
2.2	Variedad de bambú: Bambusa oldhamii	9
3.1	Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas C ₃ S-puzolanas (Malhotra and Ramezaniyanpour, 1994)	46
3.2	Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas C ₃ A-puzolanas, en presencia de yeso y portlandita (Malhotra and Ramezaniyanpour, 1994)	47
4.1	Quema controlada del tallo de bambú.	52
4.2	Ceniza molida en mortero.	52
4.3	Ceniza calcinada en mufla.	53
4.4	Horiba D-54 ph/conductivity meter.	57
4.5	Relación de cenizas para pH y conductividad eléctrica.	57
4.6	Dosificaciones.	59
4.7	Experimentación.	59
4.8	Mezcla de puzolana y cal.	60
4.9	Moldes utilizados.	61
4.10	Cubo ensayado.	62
5.1	Cenizas calcinadas.	66
5.2	Curva de calibración para conductividad eléctrica.	68
5.3	PH de solución cal/agua desionizada.	68
5.4	PH de cenizas quemadas.	69
5.5	PH de cenizas calcinadas.	69
5.6	Conductividad eléctrica de cenizas quemadas.	70
5.7	Conductividad eléctrica de cenizas calcinadas.	70
5.8	Resultados Fluorescencia de Rayos X por energía dispersiva.	72
5.9	Muestras para Fluorescencia.	72
5.10	Muestras para SEM.	73
5.11	SEM de ceniza de bambú tipo <i>Guadua Angustifolia</i> calcinada a 1000°C por 4 horas.	74
5.12	SEM de ceniza de bambú tipo <i>Oldhamii</i> calcinada a 850°C por 2 horas.	75
5.13	SEM de ceniza de bambú tipo <i>Oldhamii</i> calcinada a 1000°C por 4 horas.	76
5.14	SEM de cáscara de arroz sin calcinación.	77
5.15	SEM de ceniza de cáscara de arroz.	78
5.16	SEM de preliminar de mezcla ceniza/cemento.	79
5.17	SEM de preliminar de mezcla ceniza/cal curado a vapor.	80
5.18	SEM de preliminar de mezcla ceniza/cal curado normal.	81
5.19	Pruebas preliminares.	82

5.20	Gráfico con los resultados de la prueba a compresión en probetas preliminares.	83
5.21	Dosificaciones utilizadas.	84
5.22	Gráfico con los resultados de la prueba a compresión en probetas con concreto.	85

LISTA DE TABLAS

3-1	Composición química del cemento Portland.	23
3-2	Compuestos principales del clinker.	24
3-3	Requerimientos químicos. (ASTM C 618)	41
3-4	Requerimientos físicos. (ASTM C 618)	41
4-1	Tiempo de fraguado del cemento CPC 30R (NMX-C-414-ONNCCE).	49
4-2	Resistencia a la compresión del cemento CPC 30R (NMX-C-414-ONNCCE).	49
4-3	Granulometría agregado fino	50
5-1	Cenizas calcinadas a 650°C por 2 horas.	64
5-2	Cenizas calcinadas a 850°C por 2 horas.	65
5-3	Cenizas calcinadas a 1000°C por 4 horas.	65
5-4	Cenizas calcinadas a 1000°C por 48 horas.	65

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del proyecto

En este proyecto se propone la investigación y estudio de las propiedades que presenta la ceniza del tallo de bambú, tanto en combinación con cemento como en activación con hidróxido de calcio, esto como propuesta de una puzolana proveniente de residuos agrícolas, con el fin de encontrar sus características y usos.

1.2 Justificación e importancia

La problemática que presenta el cemento en la construcción proviene de varios factores, nombrando la contaminación que representa su manufacturación, ya que se necesita un alto consumo de energía para su producción y también las altas temperaturas necesarias para que las materias primas conformen el cemento. Aunque en los años recientes se han realizado búsquedas interminables de materiales que tengan los mismos resultados que el cemento no se ha podido encontrar alguno que cumpla en su totalidad con los requerimientos, es por esto que se busca la sustitución parcial con materiales naturales que cuenten con propiedades puzolánicas para así disminuir la contaminación que genera el cemento.

El manejo de residuos de bambú en México no se encuentra documentado, sin embargo, en diferentes zonas del país existen o se proponen a cultivar el bambú, por lo cual puede generarse el 10% de sus residuos de tallo de bambú el cual es quemado en horno para secar los bambús utilizados para construcción. Tal dato se obtuvo de una cooperativa dedicada a la plantación de bambú. Para realizar la parte experimental dentro de la investigación, se recolectará ceniza de tallo de bambú, la cual se obtiene de la quema del mismo bambú. No se tienen actualmente datos que indiquen la contaminación que genera la quema del bambú para poder compararla con la fabricación del

cemento, puesto que esta investigación se enfoca en el reciclar la ceniza ya generada se deja el tema de investigación sobre la contaminación pendiente para estudio posterior.

En esta investigación se buscará obtener un material para la industria de la construcción en base de incorporar un residuo en un mortero con cemento Portland, en específico determinar una mezcla adecuada con la ceniza del tallo del bambú para obtener un mortero con cemento Portland.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Establecer proporción entre materiales constituyentes para desarrollar morteros con cemento Portland y ceniza del tallo de bambú.

1.3.2 Objetivos particulares

- Identificar las propiedades puzolánicas de la ceniza de tallo de bambú mediante una caracterización utilizando un estudio de Fluorescencia de Rayos X, Difracción de Rayos X y SEM (Microscopio electrónico de barrido).
- Obtener diferentes mezclas para comparación entre ceniza de tallo de bambú, cáscara de arroz, ceniza de cáscara de arroz y fly-ash.
- Obtener el potencial puzolánico de la ceniza del tallo de bambú mediante la mezcla con hidróxido de calcio-agregado y agua.

- Comparar los resultados de las diferentes mezclas, realizando pruebas de laboratorio que midan sus resistencias a compresión e incorporar una caracterizaciones de los materiales resultantes.

1.4 Hipótesis

La ceniza del tallo de bambú cuando es activada por la reacción de hidratación del cemento Portland crea microestructuras necesarias para obtener mezclas de mortero y así fabricar materiales para construcción.

1.5 Alcances y limitaciones

1.5.1 Alcances

Los alcances del proyecto se basan en la justificación e importancia del tema, los cuales están encaminados a desarrollar un mortero que incluya a la ceniza de tallo de bambú dentro de sus componentes, el cual permita concebir una mezcla que contendrá residuos agrícolas.

El resultado final es un mortero con la mezcla de distintos elementos: ceniza de tallo de bambú, cáscara de arroz y fly-ash, analizando y discutiendo las microestructuras formadas en unión con el cemento, lo cual se demuestra en las pruebas realizadas en la experimentación. Dando como resultado una combinación de materiales que crean microestructuras y una caracterización de la ceniza de tallo de bambú para comenzar la investigación sobre este material y su potencial puzolánico.

1.5.2 Límites

Los límites que tiene este trabajo es que no se está realizando una caracterización química a profundidad, se analizan los resultados de varias pruebas, como Difracción de Rayos X y SEM (Microscopio Electrónico de Barrido) para encontrar los elementos que conforman la ceniza.

1.6 Estructura de la tesis

En este capítulo se presentaron los motivos y relevancia de trabajo. Se enunciaron los objetivos, tanto el general como los específicos; los alcances y limitaciones; y por último, el planteamiento de las hipótesis.

En el capítulo 2, ANTECEDENTES, se muestran los diversos trabajos que se han realizado en el campo de las investigaciones sobre puzolanas, tanto las artificiales como las naturales.

En el capítulo de FUNDAMENTO TEÓRICO se explican los elementos teóricos necesarios para comprender qué es el cemento, el concreto y las puzolanas, así como los procesos químicos que se realizan dentro de los materiales al unirlos. El capítulo 4 muestra el proceso que se ha llevado durante toda esta investigación de tesis, las pruebas que se realizaron a cada elemento y las caracterizaciones necesarias para mostrar resultados más concisos.

En el capítulo 5 se muestran los resultados encontrados de las distintas mezclas que se manejaron, dando una descripción de cada uno y mostrando las discusiones a las que se llegaron. En el último capítulo, CONCLUSIONES, se finaliza describiendo de forma general las conclusiones a las que se llegaron en este trabajo.

2. ANTECEDENTES

El concreto es el material de construcción más ampliamente utilizado en el mundo. Se estima que el concreto se utiliza cinco veces más en peso que el acero. En algunos países, este porcentaje excede la proporción de 10 a 1. Este material tan versátil, manejable, moldeable, etc., se produce fácilmente; solo se requiere una mezcla de cementante, agua, grava y arena para producirlo. Al cabo de unas cuantas horas tenemos una masa que ha fraguado y endurece paulatinamente a la cual podemos clasificar como una *roca artificial*. Conforme evolucionan la ciencia y los cambios tecnológicos, se ha demostrado que este material puede ser susceptible a una serie de fenómenos físico-químicos que afectan su durabilidad y pueden llevar a la destrucción de las estructuras de concreto reforzado. A continuación se presenta una descripción generacional del desarrollo de los concretos, mostrando las necesidades y retos que han llevado a los investigadores a explorar materiales denominados residuos en sectores industriales varios, tales como la carboeléctrica y agrícola; todo esto para encontrar materiales compuestos compatibles con la química del cemento, de manera que se logre obtener beneficios en resistencia mecánica, física y ataque químico.

2.1 Bambú

El bambú es una planta de la familia de las gramíneas (*Poaceae*). Algunas especies son herbáceas y otras leñosas, que desarrollan varios culmos (cañas o tallos) al año, con alturas que van de 1 hasta 60 m de altura y un diámetro de hasta 30 cm cerca de la base. Casi todas son erectas, aunque algunas especies tienen tallos flexionados en las puntas, unos crecen en forma aglutinada, formando espesuras impenetrables y otros en forma lineal. En el planeta existen 1,200 especies y 90 géneros de bambú, distribuidas en los cinco continentes, se asocian principalmente en áreas tropicales y subtropicales, solamente en Europa no existen especies nativas.

El bambú es la planta de crecimiento más acelerado del planeta, crece más de un 30% que el árbol de desarrollo más rápido que existe en el mundo. Algunas especies como la *Guadua Angustifolia* o el *Dendrocalamus Giganteus* pueden crecer hasta un metro por día. Su primer corte puede ser hecho entre los 3 y 5 años después de plantado, mientras que las especies leñosas pueden tardar hasta 20 años para que puedan ser aprovechadas.

El bambú es considerado un elemento crítico en el balance entre oxígeno y dióxido de carbono de la atmósfera, generando más oxígeno que las especies leñosas; debido a su sistema radicular de sus rizomas sirve eficientemente para la retención y acumulación de agua en los suelos. Como material en la construcción tiene una alta versatilidad, siendo éste usado para la construcción de puentes, cubiertas, cerchas e incluso edificaciones de baja altura. Es un material con una resistencia a la tensión muy alta en relación a su peso. La capacidad a tensión del bambú es de un 20% superior a la del acero de refuerzo tradicional y con un peso mucho menor (Ghavami, 2005).

El bambú puede tener un gran impacto en cualquier economía. Hoy en día existen industrias que procesan bambú como materia prima para la producción de papel, celulosa, y para la producción de alcohol. Toda esta industria provee sustento a más de dos millones de personas en todo el mundo. Gobiernos como el de India y China poseen reservas forestales de aproximadamente 19,800,000 hectáreas de bambú y han empezado a entender los aspectos económicos de su utilización.

Las condiciones climatológicas para el crecimiento adecuado del bambú son de vital importancia así mismo el tipo de suelo en el cual se siembre, ya que de éste dependerá la cantidad y calidad de los nutrientes que ésta absorba durante sus diferentes etapas de crecimiento.

2.1.1 El bambú en México

En México existen 8 géneros y 36 especies nativas (que son aquellas que crecen de manera silvestre) de bambúes leñosos, de las cuales 30 son endémicas (es decir, aquellas especies que crecen únicamente dentro del territorio nacional). También se han introducido cerca de 30 especies, principalmente de California y de Colombia.

Un análisis por estado de especies de bambúes nativos, señala a Chiapas como el estado de mayor importancia, aunque es Oaxaca el estado con el mayor número de especies endémicas y escasas poblaciones. En Veracruz se han realizado numerosos trabajos de campo, sobresaliendo la zona montañosa de los alrededores de Orizaba y Xalapa. Es precisamente aquí donde más se ha avanzado en el cultivo de bambú más adecuado para la construcción: la guadua.

La guadua es un bambú, que puede alcanzar alturas hasta de 25 metros, con diámetros entre 10 y 20 centímetros. Sus entrenudos tienen paredes hasta de 2 centímetros de espesor. El nombre genérico "guadua" derivó del nombre vernáculo o común dado por las comunidades indígenas de Colombia y Ecuador (Rubio Luna, 2007). El 45% de las especies del género son de origen amazónico y se distinguen por sus cúmulos gruesos, largos y espinosos, por las bandas de pelos largos en la región del nudo y por las hojas caulinares de forma triangular. Se clasifica dentro de la familia de las *Poaceae*, subfamilia *Bambusoideae*, subtribu *Guaduiniae* y género *Guadua*. De este género *Guadua* existen 26 especies en América, desde el centro de México hasta el norte de Argentina y Uruguay, Perú, Cuba, Puerto Rico y Trinidad.

Las cinco especies del género *Guadua* que habitan en México, son las más grandes y frondosas de los bambúes mexicanos. Éstas son:

- *Guadua aculeta*

- Guadua amplexifolia
- Guadua longifolia
- Guadua paniculata
- Guadua velutina

Además de las cinco especies nativas de guaduas, existe una especie introducida, que es la **Guadua angustifolia**. Ésta fue descubierta por el botánico alemán Karl Sigmond Kunth en 1822, quien utilizó el vocablo indígena "guadua" como lo llamaban las comunidades nativas de Colombia y Ecuador y designa a esta *Guadua angustifolia* como la especie tipo. Se caracteriza por una banda blanca bien marcada sobre y en ambos lados de los nudos. Hojas caulinares tempranamente caedizas, espigas presentes.

Es la especie nativa de América más ampliamente utilizada en Colombia, Ecuador y otros países de Centro y Sudamérica. Fue introducida en México en 1995, procedente de viveros de Colombia. Varios registros de floraciones esporádicas están documentados, que indican que es probable que el ciclo de florecimiento de esta especie sea de 32 a 35 años. En la figura 2.1 se nota la presencia de líneas amarillas que contrastan con el verde de los entrenudos.

En el estado de Veracruz se encuentran otras especies muy numerosas que se consideran mejores desde el punto de vista estructural: *Bambusa oldhamii*, *Bambusa vulgaris vulgaris*, *Bambusa vulgaris striatta*, *Bambusa aculeata*.

La *B. oldhamii* es probablemente nativa del sur de China que no crece libre por cualquier parte, se ha encontrado sólo bajo cultivo. Puede alcanzar dimensiones de 55 pies y 5 pulgadas de diámetro cuando madura. Los culmos tienen un color verde



FIGURA 2.1: Variedad de bambú: **Guadua Angustifolia**.

profundo y soporta temperaturas bajas, en la figura 2.2 podemos observar la coloración y forma del *Bambusa oldhamii*.



FIGURA 2.2: Variedad de bambú: **Bambusa oldhamii**.

2.2 Puzolanas

2.2.1 Antecedentes históricos de las puzolanas

En la historia de la civilización humana el descubrimiento de los materiales y de las acciones cementantes hidráulicas fue posterior al descubrimiento del fuego y debió ser poco posterior al descubrimiento de la cerámica. Tal descubrimiento, por lo que se refiere a los pueblos mediterráneos, debió de pasar de egipcios a griegos y romanos, siendo ampliado y perfeccionado en sucesivas etapas. Por razones de puro azar geográfico y geológico, los griegos y romanos, primeros en conocer *la cal*, pudieron mezclarla con materiales naturales de origen volcánico que tenían a la mano. Es probable que el primer empleo de estos materiales fuera el de servir de agregados para los morteros de cal. La observación debió hacer el resto, y de la comparación de la resistencia y del comportamiento general de los conglomerados hechos con cal y con materiales volcánicos y no volcánicos, surgió la nueva técnica de mezclar los primeros, ya como materiales activos, con la cal, en polvo y en seco o en húmedo, para obtener los que han pasado a la historia como *cementos y morteros romanos*, con base en cal y puzolana, o cal, puzolana y arena, respectivamente.

Tales materiales fueron la tierra griega de Santorín y las cenizas y tobas romanas de *Pozzouli*, localidad que ha legado el nombre genérico de puzolanas para éstos y para similares materiales en lo sucesivo. De las obras antiguas realizadas con puzolanas que han llegado hasta nuestros días como inestimables reliquias de la civilización romana pueden citarse: panteones, coliseos, estadios, basílicas, acueductos, cisternas, puentes, puertos y las más diversas estructuras que han perdurado, y lo han hecho como no han podido hacerlos muchas obras realizadas en la Edad Media, con materiales conglomerantes mal cocidos y exentos de puzolanas activas. Por el contrario,

cuando el defecto de cocción y la falta de puzolana se subsanaron, las obras cobraron de nuevo el vigor y con él la longevidad (Salazar Jaramillo, 2002).

2.2.2 Puzolanas naturales

Una de las puzolanas naturales más utilizadas hoy en día es la **ceniza volante**, la cual es un subproducto de la combustión del carbón y es ampliamente utilizada como un ingrediente en el concreto de cemento Portland. Su uso en el concreto es cada vez mayor porque además de mejorar algunas de sus propiedades resulta en un menor costo de producción.

El concreto hecho con ceniza volante ha demostrado tener varias ventajas, como:

- Menor demanda de agua
- Disminución de la relación agua/cemento
- Reducción de la permeabilidad
- Disminución del calor de hidratación
- Incrementa la resistencia a los sulfatos

Ravina and Mehta (1986) reportaron que mediante la sustitución de 35% a 50% de cemento Portland con ceniza volante, hubo una disminución de la demanda de agua de entre 5% y 7% para lograr el revenimiento designado.

Idorn and Henriksen (1984) encontraron que el uso de la ceniza volante en las mezclas de concreto, generalmente, reduce el sangrado; esto se debe a que en estas

mezclas hay una mayor área superficial de las partículas sólidas y un menor contenido de agua para una trabajabilidad dada.

La resistencia a una determinada edad y la velocidad con la que esta resistencia es ganada se ven afectadas por las características de la ceniza volante, el tipo de cemento y las proporciones con las que cada uno de estos componentes son utilizados en el concreto. La relación entre la resistencia a la tensión y la resistencia a la compresión de concretos con y sin ceniza volante es la misma. Las cenizas volantes clase C exhiben un mayor grado de reactividad a edades tempranas en comparación con las cenizas volantes clase F, aunque en ambos casos la actividad puzolánica aumenta proporcionalmente con el contenido de partículas de ceniza menores a la malla No. 325 (Yazici and Arel, 2012).

En cuanto al módulo de elasticidad, éste también es menor a edades tempranas y un poco mayor a edades más tardías comparado con concretos sin ceniza volante. Así, los efectos de la ceniza volante en el módulo de elasticidad no son tan importantes como sus efectos en la resistencia.

Como regla general, la ceniza volante clase F puede mejorar la resistencia a los sulfatos de las mezclas de concreto. Se cree que el aumento de la resistencia a los sulfatos debe ser debido, en parte, a la continua reacción de la ceniza volante con los hidróxidos generados en el concreto, lo que produce más SCH, el cual llena los poros capilares de la pasta de cemento reduciendo la permeabilidad y en consecuencia la entrada de soluciones de sulfato (Torii and Kawamura, 1994).

Douglas and Pouskouleli (1991) presentaron de las primeras investigaciones sobre el efecto de ceniza volante en las mezclas de morteros, junto con escoria de alto horno, utilizando tanto la ceniza volante clase F como la clase C. Realizaron mezclas donde sustituían un 50% y 100% de cemento por ceniza volante y también con partes iguales de ceniza volante - cemento - escoria. Aunque no se presentan a fondo las

caracterizaciones de los dos tipos de ceniza pudieron vislumbrar las diferencias que presentaban al probar las probetas a compresión; encontrando que la ceniza clase C mejoraba las propiedades de las mezclas.

Investigaciones más recientes han mostrado que la ceniza volante clase F trabaja mejor que la clase C. Siddique (2004) reportó que la ceniza volante clase F se puede utilizar adecuadamente hasta en un 50% de sustitución de cemento en el concreto para elaborar elementos prefabricados. El uso de altos volúmenes de este tipo de ceniza disminuyó la resistencia a la compresión a 28 días, la resistencia a la flexión y a la tensión indirecta, el módulo de elasticidad y la resistencia a la abrasión del concreto.

Li et al. (2000) estudiaron la activación y la microestructura de la ceniza volante en condiciones básicas, realizaron muestras de ceniza volante-cemento e hicieron pruebas activando la ceniza volante con hidróxido de sodio e hidróxido de calcio. Reportaron que las mezclas de ceniza-cemento tuvieron fallas en los primeros días de hidratación, dejando muchos poros en la pasta, lo cual resultó en baja fuerza a compresión. Al activar la ceniza volante con los hidróxidos se encontraron mejores microestructuras en la mezcla, más estable y éstos resultados están respaldados por termogravimetría y SEM.

Jiang and Malhotra (2000) presentaron una investigación sobre la reducción de la demanda de agua en concreto incorporando ceniza volante, utilizaron ocho diferentes tipos de ceniza provenientes de Canadá y Estados Unidos. Se realizaron cilindros para cada tipo de ceniza volante, se probaron a fuerza a compresión en diferentes edades: 1, 3, 7, 28, 56 y 91 días. Reportaron grandes reducciones de demanda de agua desde un 8.8% hasta un 19.4%. Y en cuanto a la fuerza a compresión encontraron mejores resultados en las mezclas con proporciones más altas de ceniza volante y que esta va en aumento conforme a los días de hidratación.

Hanehara et al. (2001) sustituyeron ceniza volante en mezclas de cemento Portland, en diferentes proporciones: 0%, 10%, 20%, 40% y 60%, y los especímenes fueron curados a dos temperaturas: 20 y 40°C. Encontraron que la reacción puzolánica de la ceniza volante en las mezclas curadas a 20°C comienza a la edad de 28 días, y en la curada a 40°C inicia desde la temprana edad de 7 días, mostrando que entre más temperatura se tenga al curar, mejorará la calidad de la mezcla. Concluyeron que tal vez en mayor proporción de sustitución (60%) se llega a un punto neutral debido a las relaciones agua/soluto que se manejen.

Tangpagasit et al. (2005) estudiaron el impacto de la ceniza volante en morteros pero por el lado del tamaño de partícula y su reacción puzolánica. Encontraron que con los tamaños de partícula desde 2.7 a 160 μ m en las diferentes edades que se probaron (3, 7, 14, 28, 60 y 90 días), mostraron una mejoría de hasta un 22% en fuerza a compresión, comparado con mortero estándar.

Oner et al. (2005) presentan un estudio sobre el desarrollo de la fuerza a compresión en mezclas de concreto con ceniza volante. Se realizaron un total de 28 mezclas diferentes, sustituyendo el cemento en proporciones de 15, 25, 33, 42, 50 y 58%; se manejaron distintos contenidos de agua y se probaron en las edades de 28 y 180 días. Encontraron que la ceniza volante se había estado utilizando más como un agregado fino que como un aditivo cementante, y es por eso que se obtienen deficiencias en las mezclas. El principal problema de eficiencia que mostraron fue que la fuerza a compresión empieza a descender cuando existe mucha ceniza volante en el medio, ya que se necesita la misma cantidad de cemento que ceniza para que se obtenga una reacción favorable.

2.2.3 Puzolanas artificiales

Los materiales considerados residuales, tal como hojas de bambú, cáscara de arroz, bagazo de caña y cáscara de maní (Madurwar et al., 2013), normalmente son quemados debido a la gran cantidad que existe de ellos (Vaibhav et al., 2015). La ceniza resultante de la quema de los residuos se ha encontrado rica en sílice y carbón, y en los últimos años se han realizado estudios que demuestran la actividad puzolánica de éstas cenizas. El utilizar residuos que provienen de fuentes naturales para la construcción puede traer beneficios tanto para la industria como para la agricultura, aunque no se han realizado muchas investigaciones sobre las propiedades de los residuos o las mejoras que pueden generar con materiales comunes, como el acero o concreto. Asia es el principal generador de residuos sólidos, producen alrededor de 4.4 billones de toneladas por año, esto ha causado que la industria encuentre soluciones para un uso de los residuos agrícolas buscando nuevos materiales que puedan tener iguales o mejores propiedades que los tradicionales ya utilizados (Aprianti et al., 2015).

A continuación se muestran algunos de los materiales que son considerados residuos agrícolas utilizados en investigaciones de morteros y concretos.

2.2.3.1 Ceniza de hoja de bambú

La parte del bambú más estudiada hasta el momento como residuo agrícola es la hoja de bambú, se ha encontrado que tiene buenas propiedades puzolánicas y está siendo utilizada la ceniza de hoja de bambú como material complementario en mezclas de mortero.

Los primeros en publicar artículos sobre este tipo de material fue Dwivedi et al. en el 2006; ellos tras secar la hoja de bambú en una atmósfera abierta, en

seguida la calentaron a 600°C durante un periodo de 2 horas en una mufla. Dentro de su investigación presentan la caracterización de la misma, encontrando que contiene un 76% de SiO₂, lo cual la hace posiblemente puzolánica. El objetivo principal del estudio fue la incorporación de ceniza al mortero, sustituyeron en un 20% la ceniza por cemento; en estas muestras se encontró que la fuerza a compresión a los 28 días es comparable con las mezclas de control, lo cual se piensa que se puede deber a la cantidad de silicatos de calcio formados por la reacción puzolánica.

Después Singh et al. (2007), investigadores de la India, estudiaron la hidratación de mezclas con cemento Portland y ceniza de hoja de bambú. Para la obtención de la ceniza se realizó el mismo procedimiento que los autores antes mencionados, aunque en el momento de la caracterización estudiaron más a fondo el comportamiento de la ceniza, realizaron pruebas de reacción puzolánica en suspensión saturada de Ca(OH)₂ y consistencia de agua con el aparato de Vicat, junto con los ya conocidos DRX y SEM; los resultados de la caracterización muestran la actividad puzolánica de la ceniza. Para estudiar a fondo la hidratación se realizaron mezclas con ceniza y cemento Portland, coincidiendo con Dwivedi et al. sobre el mejor tiempo para comparación con mezclas de control, 28 días.

Para el 2010 y el 2011 la ceniza de hoja de bambú se siguió estudiando tanto en realizar una caracterización más completa. Amu and Adetuberu (2010) mostraron que la ceniza sirve para estabilizar suelo, esta investigación se realizó en África con buenos resultados, ya que presentaban que la ceniza hace que disminuyan los índices plásticos del suelo, por lo cual la recomiendan ampliamente para este tipo de trabajos. Villar-Cociña et al. (2011) ahondan más en la caracterización de la ceniza de hoja de bambú, encontrando que está formada en un 80% por sílice y que el resto de los óxidos se encuentran presentes en bajas concentraciones; la conductividad eléctrica mostró que la ceniza tiene muy alta actividad en edad temprana, lo cual en conjunto demuestra la actividad puzolánica de la misma.

Una de las investigaciones más recientes por parte de Umoh and Femi (2013) examina el comportamiento del concreto con incorporación de ceniza de caracol y ceniza de hoja de bambú. Se combinaron en varios porcentajes y las cenizas se agregaron hasta en un 40%; resultando que las propiedades de compresión y tensión aumentaron, la absorción de agua disminuyó y la porosidad aumentó. Se concluyó que reemplazando el cemento un 20% con ceniza de caracol y ceniza de hoja de bambú es la óptima proporción para la combinación.

Asha et al. (2014) realizaron una investigación reemplazando parcialmente al cemento con ceniza de hoja de bambú en un 5, 10 y 15%. Los resultados mostraron que la fuerza a compresión del concreto disminuye si se aumenta el porcentaje de ceniza. Desde un punto de vista de durabilidad y resistencia de cloruro y ácido, se muestra una mejora considerable de un 10%; concluyeron que el mezclar cemento con ceniza debe ser utilizado por la ingeniería civil donde sea más importante la durabilidad que una fuerza a compresión alta.

Tomando en cuenta las investigaciones anteriormente mostradas, se puede concluir que la ceniza de la hoja del bambú tiene buenas propiedades puzolánicas, lo cual nos da el antecedente necesario para probar si el tallo cuenta con las mismas o mejores propiedades que lo hagan un material potencialmente puzolánico.

2.2.3.2 Cenizas de residuos agrícolas

Kanning et al. (2014) presentan una investigación sobre el uso de ceniza proveniente de la planta del plátano. Ellos mencionan que durante el 2012 fueron producidos más de 95 millones de toneladas de plátanos, y que a esta cantidad le corresponden 10.22 millones de toneladas de ceniza y residuos de la planta de plátanos. Se realizan los experimentos de agregar esta ceniza a morteros de cemento Portland en un 0, 5, 7.5 y 10%. Los

resultados mostraron que con un 10% de ceniza la fuerza a compresión aumentó en un 25% comparándola con una muestra de puro cemento y aproximadamente un 10% de mejora en fuerza a tensión.

Otra puzolana artificial utilizada en el campo de la investigación es ceniza de bagazo de caña, lo más reciente fue realizada por Moraes et al. (2015), los cuales mezclaron la ceniza con cemento en proporciones de 0, 15, 20, 25 y 30%. La ceniza fue caracterizada física y químicamente, en el cual encontraron bajo porcentaje de sílice (36%). Ya en las probetas se encontró que las mezclas que contenían entre un 25 y 30% de ceniza tenían resultados bastante comparables con las mezclas de control, tomando en cuenta que se analizó fuerza a compresión; la actividad puzolánica fue observada después de 3 días de curado, y para éstas proporciones (25 y 30%) demostraron que la ceniza de bagazo de caña puede ser utilizada para reemplazar en grandes cantidades al cemento dentro de morteros.

Almeida et al. (2015) también presentan investigación sobre la ceniza de bagazo de caña. En ésta se buscaba el uso de la ceniza sin tamizar y sin llevar un tratamiento térmico como agregado fino para morteros. Llegaron a la conclusión de que las cenizas son buenas trabajando con el mortero hasta en una proporción del 50%, también que las cenizas reducen los poros en las mezclas y que al agregar de un 30 a 50% se incrementa significativamente la resistencia a la penetración de cloruros.

González-López et al. (2015) presentan una investigación sobre el uso de ceniza de agave. Para la obtención de la ceniza se secaron las hojas al sol, después se quemaron en una mufla a 500, 600, 700, 800 y 900°C durante 3 horas. Realizaron distintos tiempos de calcinación para registrar si existen cambios en los comportamientos de morteros, encontraron que la fuerza a compresión en las muestras que contenían las cenizas calcinadas a 500, 600 y 700°C mostraban una mejora de hasta un 90% en los primeros 7 días. En cuanto a las muestras con ceniza calcinada a 800°C bajaban un

10% en los primeros 7 días; por último se checó la ceniza calcinada a 900°C la cual mostró similitudes a las de 500 y 700°C. Comparando estos resultados llegaron a la conclusión de que la mejor temperatura de calcinación son 500°C y que el agregar 5% de ceniza al mortero mostró el mejor rendimiento en compresión.

Nakanishi et al. (2014) experimentaron con otro material que poco se ha manejado **el pasto elefante**, el cual es una planta originaria de África y que fue introducida en Brasil en los 20s. El pasto elefante es un tipo de pasto perenne que llega a alturas de 3 a 5 mts. Para el uso de este pasto en la investigación, fue calcinado en una mufla a 400°C por 20 minutos, después a 700°C por 60 minutos, para así obtener una ceniza más homogénea. Los investigadores encontraron que la ceniza contenía un alto porcentaje de SiO₂, alrededor de un 80%. Se realizó una caracterización física y química, y se probó su reacción puzolánica mediante un método donde se hace una solución de cal con ceniza y se estuvo checando la concentración desde 1 hasta 28 días. La ceniza mostró buena actividad puzolánica durante los primeros 7 días de reacción, encontrando que es un 85.5% comparable con la solución cal/agua y que a los 28 días los valores de conductividad se estancan. Su discusión final habla sobre la viabilidad de esta ceniza para utilizarse en mezclas de concreto, así como se han venido utilizando los materiales puzolánicos ya conocidos.

Como se mostró en este apartado existen materiales muy diversos que se han venido estudiando, ampliando así la lista de opciones a utilizar en mezclas con cemento Portland para disminuir el uso de este.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se hace una descripción detallada de los términos que están siendo utilizados en la METODOLOGÍA, junto con las normas y pruebas que se realizaron para evaluar la experimentación.

3.1 Cemento Portland

El cemento Portland es el ingrediente ligante o adhesivo del concreto. Está compuesto principalmente por óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro hasta en un 95%. Éste debe cumplir con las especificaciones de la ASTM C 150 "Especificación Normalizada para cemento Portland", produciendo morteros de altas resistencias, además de ser compatible con los diferentes aditivos y adiciones usados en la mezcla. La clase de cemento es un factor importante, pues dependiendo de ésta se logran variaciones en la resistencia de la mezcla. Es de vital importancia la uniformidad de la fuente de cemento, de manera que se pueda garantizar uniformidad en los resultados obtenidos, evitando la dispersión de los mismos. Otro punto a estudiar y que influye de manera importante en la selección del tipo de cemento, es la compatibilidad cemento-aditivos, que dependerá básicamente de las características de ambos (Estévez and Gutiérrez, 1990). En la actualidad existen diferentes tipos de cementos, de acuerdo con la clasificación de la ASTM, los cuales se listan a continuación:

- **Cemento Tipo I**

- Para usar cuando no se requieran las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.
- Sin propiedades esenciales.
- Uso: para todo tipo de obras.

- Adición de aditivos.
- **Cemento Tipo IA**
 - Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo I, donde se desea incorporación de aire.
- **Cemento Tipo IP**
 - Mayor porcentaje de puzolana.
 - Propiedades hidráulicas.
 - Usado en climas con temperaturas elevadas.
 - Utilizado en climas muy lluviosos.
- **Cemento Tipo II**
 - Para uso general, más específicamente cuando se dese resistencia moderada a los sulfatos.
 - Menor calor de hidratación.
 - Óptimo para climas con temperaturas elevadas.
 - Orillas del mar.
 - Selva donde hay presencia de aguas servidas.
- **Cemento Tipo IIA**
 - Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II, donde se desea incorporación de aire.
- **Cemento Tipo II (MH)**
 - Para uso general, más específicamente cuando se desea un calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos.

- **Cemento Tipo II (MH)A**

- Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el tipo II (MH), donde se desea incorporación de aire.
- Elevada resistencia a las heladas.
- Moderada resistencia a los sulfatos.

- **Cemento Tipo III**

- Para usar cuando se desea alta resistencia temprana.
- Estribos de puentes, presas, etc.
- Presencia del silicato cálcico.
- La pulverización es más fina.

- **Cemento Tipo IIIA**

- Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II (MH), donde se desea incorporación de aire.
- Endurecimiento rápido.
- Mayor costo de adquisición.
- Resistencia al efecto de las heladas.

- **Cemento Tipo IV**

- Para usar cuando se desea un bajo calor de hidratación.
- Menor porcentaje de silicatos y aluminatos.
- Puede controlar la temperatura del cemento con respecto al clima.
- Logra controlar el equilibrio térmico del concreto y componentes.

- **Cemento Tipo V**

- Para usar cuando se desea alta resistencia a los sulfatos.
- Mayor porcentaje de silicatos y aluminatos.

La composición química del cemento Portland varía dependiendo del tipo y uso, presentando componentes primarios, secundarios y otros posibles. Los componentes y límites de cada uno de éstos para el cemento Portland en general son indicados conforme se muestran en la Tabla 3-1.

TABLA 3-1: Composición química del cemento Portland.

Componentes Principales	Componentes Secundarios	Otros componentes posibles
CaO	MgO	Mn ₂ O ₃
SiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅
Al ₂ O ₃	K ₂ O Na ₂ O (Álcalis)	TiO ₂
Fe ₂ O ₃	CaO libre, Residual Insoluble, Pérdida al fuego, H ₂ O, CO ₂ (Materia orgánica)	Fluoruros

La química del cemento puede mostrar como éste interactúa con adiciones naturales o artificiales para formar compuestos que permiten un mejor desempeño de la mezcla de concreto ante cargas o ataques químicos y físicos.

3.1.1 Química del cemento

Los elementos principales para la fabricación del cemento pueden provenir de diferentes minerales, como por ejemplo: la caliza aporta el CaO, la arcilla aporta SiO₂ y el Al₂O₃, la piritita o hematita aporta el Fe₂O₃, etc. Estos materiales individuales se

pueden mezclar previamente a la fabricación del cemento o puede usarse una caliza que contenga todos los elementos en las debidas proporciones.

La materia prima pasa por un horno en donde, al elevarse su temperatura a 1450°C, se recombinan los cuatros elementos antes indicados: Óxido de calcio, bióxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de fierro, produciéndose el clinker.

Dentro de la química del cemento se ha acostumbrado expresar los óxidos y los compuestos principales del clinker utilizando las abreviaturas presentadas en la 3-2.

TABLA 3-2: Compuestos principales del clinker.

Óxido	Abreviatura	Compuesto	Abreviatura
CaO	C	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	Ca(OH ₂)	CH
SO ₃	S	4CaO.3Al ₂ O ₃ .SO ₃	C ₄ A ₃ S
H ₂ O	H	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O.CaSO ₄ .2H ₂ O	CSH ₂

A continuación de muestra una breve descripción de los óxidos presentes en el clinker:

- **Óxido de Calcio (CaO):** este producto se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas (calizas o dolomías); con un alto contenido en carbonato de calcio (CaCO₃), a una temperatura de unos 900°C.
- **Bióxido de Silicio (SiO₂):** se encuentra en abundancia en la naturaleza, formando parte de los silicatos, en las variedades cristalizadas cuarzo β, tridimita τ, cristobalita β y en forma vítrea en la sílice fundida. La sílice pura o cuarzo β, estable a temperatura ordinaria, se transforma a 573°C en cuarzo α, cristalizando en prismas hexagonales (densidad: 2,65 y dureza 2,7); a 870°C se obtiene

la tridimita α , de las que existen la variedad α , β y τ (densidad: 2,28) y a 1470°C se forma la cristobalita α (densidad: 2,33), se funde a 1710°C (densidad: 2,20), ocupando este cuarzo vítreo un volumen mayor que el cuarzo β .

Para que el cuarzo se transforme en tridimita y cristobalita hay que calentarlo muy despacio, pues ordinariamente a los 1600°C forma una masa vítrea pastosa que no cristaliza al enfriarse. Aunque la sílice sea químicamente inerte a la temperatura ordinaria, reacciona enérgicamente con las bases, a temperaturas elevadas, formando los silicatos. El bióxido de silicio, a pesar de no unirse directamente con el agua se le considera como anhídrido, formando gases del ácido silícico que, aunque no se hayan aislado, se les puede considerar como hidratos $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, o SiO_3H_2 (ácido meta silícico), y el $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ o SiO_4H_4 (ácido ortosilícico), aún con más moléculas de agua y bióxido de silicio se forman compuestos muy complejos.

- **Óxido de Aluminio (Al_2O_3):** llamado también alúmina, se encuentra en la naturaleza en forma de corindón incoloro, se funde a 2505°C, cristalizando en numerosas formas por enfriamiento. Tiene una densidad de 4 y una dureza de 9 en la escala de Mohs. La alúmina se halla combinada en la arcilla ($2\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la eliminación de la sílice da origen a la formación de dos óxidos hidratados, el diásporo ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y la hidrargirita o gibsite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), siendo la bauxita una mezcla de ambas en diferente proporción.

La alúmina obtenida por precipitación forma con el agua un gel, cristalizando con el tiempo en forma de hidrargirita. La alúmina no se forma al fraguar el cemento Portland, pero sí en el del cemento Aluminoso.

- **Óxido Férrico (Fe_2O_3):** es muy abundante en la naturaleza, constituyendo el mineral de hierro llamado oligisto y hematites roja. En el cemento Portland se encuentra en dosis pequeñas, pues provienen de las impurezas de las arcillas, pero

en los cementos aluminosos alcanzan proporciones importantes procediendo de la bauxita. Este óxido da el color al cemento. Se parece a la alúmina, cambiándose principalmente con la cal. Existen dos óxidos férricos hidratados amorfos, uno de color amarillo y el otro rojizo de fórmula: $\text{Fe}(\text{OH})_3, \text{H}_2\text{O}$.

Estos óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro se combinan, formando un compuesto de tres o más elementos; pero para facilitar su estudio normalmente se les considera formados por dos.

El orto-silicato de calcio se le puede considerar formado por la combinación de los dos óxidos: $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$, o bien SiO_4Ca_2 , como si fuera la sal cálcica del ácido orto-silícico SiO_4H_4 , lo cual representa bien su composición, pero no su estructura (se ha comprobado al estudiar con rayos X, que la estructura de las moléculas de los silicatos están formados por complejos de silicio-oxígeno, en los que el silicio forma cadenas con dos átomos de oxígeno).

Por otro lado, las combinaciones del silicio-oxígeno sólo existen en un estado sólido y no dan iones libres, por lo que a los compuestos de los silicatos no se los puede considerar ionizados en el agua.

- **Silicatos de Calcio:** el óxido de calcio y el bióxido de silicio reaccionan a elevada temperatura, formando los siguientes compuestos:
 - **Silicato mono-cálcico ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$):** o meta-silicato. Existen dos variedades, la α y la β , que forman el mineral llamado Wollostonita, siendo estable hasta 1150°C , transformándose en la variedad α , que se funde a 1512°C . Cristaliza en el sistema monoclinico. es inerte hidráulicamente, el agua no le ataca más que al cabo de varios años. No se halla en el clinker del cemento Portland.
 - **Silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$):** u orto-silicato. Hay tres formas alotrópicas: la α , estable por encima de 1410°C , se funde a 2130°C y por enfriamiento

se transforma en la forma β , a 1420°C ; y la forma τ va acompañada de un aumento de volumen del 10% reduciéndose a polvo espontáneamente al enfriarse a la temperatura ordinaria, apreciándose en las escorias de altos hornos y en los cementos de Portland ricos en este compuesto.

- **Silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)**: es el principal constituyente del cemento Portland. Se obtiene por sinterización calentando una mezcla de carbonato cálcico y sílice a 1400°C . Tiene un peso específico de 3,15, atribuyéndole las resistencias iniciales del cemento Portland.
 - **Silicato pentacálcico ($5\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)**: se pulveriza espontáneamente por enfriamiento lento como el silicato bicálcico y las escorias. Si se enfría bruscamente y se muele es hidráulico, formándose hidrato de calcio y una masa gelatinosa o coloidal que da origen a los esferalitos, que se aprecian claramente con el microscopio electrónico.
- **Luminatos de calcio**: se forman cuatro compuestos bien definidos, los cuales son los siguientes:
 - **Aluminato monocálcico ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$)**: se obtiene calentando alúmina y carbonato cálcico por encima de 950°C , se funde a 1660°C y se cristaliza en el sistema monoclinico. Tiene una densidad de 2,98, tiene propiedades hidráulicas, siendo el principal constituyéndose de los cementos aluminosos.
 - **Aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$)**: se funde a 1535°C , presentando propiedades hidráulicas menores que el anterior, hallándose en el cemento Portland; se cristaliza en el sistema cúbico. En estado puro se hidrata y fragua rápidamente y contribuye al falso fraguado de los cementos.

- **Trialuminato pentacálcico ($5\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$)**: existen en dos formas alotrópicas. Se funde a 1455°C , encontrándose a veces en los cementos Portland y aluminosos; presenta fraguado rápido y menores resistencias que el aluminato monocálcico.
- **Pentaluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3$)**: se funde a 1720°C , hallándose a veces en los cementos aluminosos.
- **Ferritos cálcicos**: el óxido de calcio y el óxido de hierro reaccionan a gran temperatura para dar el ferrito monocálcico: $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ y el ferrito bicálcico: $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$. Se funde a 1216°C , no teniendo propiedades hidráulicas, hallándose en los cementos aluminosos y metalúrgicos.

3.1.2 Microestructura del concreto

Es la estructura material en estado sólido generada por el fraguado del cemento y cuyos tamaños son inferiores a 0.20 mm. Por lo que la microestructura es la fase sólida, en la que el concreto ha logrado un desarrollo mecánico debido al estado avanzado de las reacciones químicas del cemento con el agua, produciéndose en cierta rigidez conferida por los nuevos productos que se genera.

Las características de la microestructura del concreto están relacionadas con la porosidad de la pasta de cemento endurecido, la conexión entre los poros, la distribución de sus tamaños, capacidad para el transporte de fluidos, relaciones y equilibrios entre los diferentes productos de la hidratación, la naturaleza de la interfaz entre la pasta hidratada y el agregado, así como otros factores.

Debido a la consistencia rígida del concreto, anteriormente se creía que tenía una larga vida útil; sin embargo, la experiencia ha demostrado que no siempre es así. Los ejemplos en la construcción de estructuras de concreto con problemas, ante sus

condiciones de servicio son abundantes y de diferente naturaleza, éstos se han tenido que explicar, enfrentar y resolver desde diferentes trincheras como investigaciones serias, teorías, fórmulas, sistemas constructivos, pruebas de laboratorio y campo, todo ello con el objetivo de diagnosticar problemas de durabilidad y conocer los factores que en ella intervienen (Bernal Camacho, 2009).

3.1.3 Proceso de hidratación del cemento Portland

La composición teórica o potencial de los compuestos del cemento Portland o fases minerales se puede estimar a través de las ecuaciones incluidas en la norma ASTM C 150 y suponen que las reacciones químicas de la formación de los compuestos del clinker, han avanzado hasta su equilibrio termodinámico, y que la presencia de impurezas tales como el MgO y los álcalis puede ser ignorada. Ambas suposiciones no son válidas, por lo tanto, en algunos casos la composición calculada del compuesto, especialmente las cantidades de C_3F y C_4AF en los cementos, se sabe que se desvían de la composición real del compuesto determinada directamente. Esta es la razón de que la composición calculada del compuesto sea también llamada composición potencial del compuesto. El fraguado y el endurecimiento del cemento Portland ocurre como un resultado de la **reacción de hidratación** entre los compuestos del clinker, el yeso y el agua, la cual genera calor que es conocido como calor de hidratación. Estas reacciones se producen a diferentes tasas de velocidad y están influenciadas unas con otras. Las fases del cemento Portland que participan en este proceso son:

- **Alita**: solución sólida de silicato tricálcico (C_3S) dopado con impurezas iónicas.
- **Belita**: solución sólida de silicato dicálcico (C_2S) dopado con impurezas iónicas.
- Solución sólida de **aluminato tricálcico** (C_3A).

- **Ferrita:** ferro aluminato de calcio (C_4AF).
- Óxido de calcio libre (CaO).
- Sulfatos alcalinos.
- Sulfato de calcio en forma de anhidrita, hemihidrato o dihidrato.
- Agua de mezclado.

El C_3S y C_2S son dos fases de silicatos cristalinos, teniendo a las fases C_3A y C_4AF como **fases intersticiales**, así mismo se tienen algunas impurezas como la periclasa (MgO), cal viva (CaO) y sulfatos alcalinos (Na_2SO_4 y K_2SO_4). Es de suma importancia mencionar que las diversas etapas de producción del clinker tienen un papel determinante en la reactividad del material, ya que por ejemplo la viscosidad de la fase intersticial en la zona de sinterización define la dispersión del C_3S y C_2S o las concentraciones de ellos en alguna área específica del clinker. Por otro lado la temperatura en la zona de clinkerización y el gradiente térmico de enfriamiento tienen un efecto en la cristalinidad del C_3A y C_4AF .

La **alita** es la fase principal y más importante del cemento Portland, ya que controla el fraguado y el endurecimiento. Su hidratación es rápida pero varía en función de la cantidad de iones en solución que contenga.

La **belita** puede existir en cinco formas estructurales diferentes, la forma más importante en la química del cemento es la β - C_2S se hidrata mucho más lentamente que la alita.

Tanto la alita como la belita producen los mismos tipos de **silicatos de calcio hidratados** ($C-S-H$) y son las principales fases generadoras de la portlandita ($Ca(OH)_2$), la cual es la base de la reacción puzolánica.

El C_3A usualmente tiene una estructura cúbica, sin embargo a mayores cantidades de álcalis puede tener modificaciones a ortorrómbica o monoclinica. Dicha fase es la que genera mayor calor de hidratación y ésta depende también de la cantidad y calidad de los iones alcalinos que se encuentran en su estructura. La hidratación de ésta fase es también afectada por la disolución de los sulfatos presentes.

El C_4AF forma productos similares a aquellos del C_3A , donde el hierro sustituye parcialmente la alúmina en la estructura del cristal de etringita y monosulfoaluminato hidratado.

El **sulfato de calcio** es añadido al cemento Portland para controlar el tiempo de fraguado, para mantener una estabilidad volumétrica y en una proporción adecuada para desarrollar en la pasta de cemento Portland la máxima resistencia mecánica a la compresión. El C_3A en la presencia de sulfato de calcio se transforma en **etringita** ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$). La primera capa de etringita al parecer precipita en la superficie del grano de C_3A y será un obstáculo impermeable para evitar la hidratación adicional del mismo, sin embargo, en el avance de la hidratación, la etringita puede ser transportada y colodada fuera de la partícula de C_3A , haciendo que se pierda consistencia de la pasta de cemento. Por otro lado la cantidad máxima permitida de sulfato en el concreto depende de muchos factores, incluyendo el contenido de C_3A , la temperatura de curado, el tamaño de las partículas del yeso y la presencia de cloruros en la mezcla, si excedemos esta cantidad, la generación de etringita puede causar expansión y agrietamientos en el concreto.

El **C-S-H** es la principal fase de hidratación y la responsable de la resistencia mecánica de las pastas de cemento, es similar al producido en las reacciones individuales de C_3S y C_2S y exhibe poca cristalinidad, en su estructura pueden quedar embebidos iones como Mg^{2+} , Al^{3+} , K^+ , Na^+ o SO_4^{-2} .

La **portlandita** o hidróxido de calcio cristalino es el segundo producto más abundante en las pastas de cemento hidratado y puede ser distinguido fácilmente por medio de microscopía óptica, ya que al precipitarse se presenta en forma de pequeños cristales relativamente largos por toda la matriz de cemento hidratado, la portlandita no aporta ningún beneficio a la resistencia mecánica de la pasta de cemento y puede producir espacios porosos, ya que al no ser hidráulica puede lixiviarse y salir del concreto, por esta razón se busca hacerla reaccionar con la puzolana y convertirla en un producto más resistente.

El progreso del proceso de la hidratación depende de:

- La tasa de disolución de las fases participante.
- La tasa de nucleación y crecimiento del cristal de los productos de hidratación formados.
- La tasa de difusión del agua y los iones disueltos a través del material ya hidratado.

Existen diferentes propuestas para describir el proceso de hidratación, se mencionará el propuesto por Boumiz et al. (1996), el cual es descrito en cinco etapas que se resumen a continuación:

Etapas I: Periodo de Mezclado

Durante esta etapa, los diferentes iones liberados por las diversas fases entran en solución, esto es rápido y de carácter exotérmico. La superficie de las partículas del cemento es parcialmente cubierta con silicatos de calcio hidratados formados por la combinación de iones Ca^{+2} , AlO_2^- , SO_4^{+2} y OH^- , los cuales son originados de las fases intersticiales y de las diferentes formas de los sulfatos de calcio que están presentes en el concreto.

Etapa II: Periodo de Aletargamiento

En el periodo de aletargamiento se incrementa rápidamente el contenido de iones Ca^{+2} y el pH en el agua de mezclado, al grado de obstaculizar la disolución de las fases del clinker. La generación de calor decae considerablemente, pero no se detiene. Una pequeña cantidad de C-S-H se forma durante este periodo, y si hay un balance adecuado entre los iones de aluminio y sulfato, se reduce la cantidad de etringita o se forma la fase de hidrogranates. Durante este periodo la fase acuosa llega a ser saturada de iones Ca^{+2} , pero no hay precipitación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, probablemente debido a su baja tasa de generación en comparación con la del C-S-H. Algo de floculación de los granos de cemento puede ocurrir durante este proceso.

Etapa III: Fraguado inicial

La reacción de hidratación es bruscamente activada cuando la portlandita comienza a precipitar. Esto ocurre cuando prácticamente no hay silicatos en la fase acuosa. El consumo repentino de los iones Ca^{+2} y OH^- acelera la disolución de los componentes aún no disueltos del cemento Portland. La generación de calor se incrementa lentamente al principio (debido a que la precipitación de la portlandita es endotérmica y consume algo de calor) y llega a ser más rápida en la etapa posterior.

Usualmente, el fraguado inicial cae en este periodo, excepto cuando algo de rigidez del mortero ocurre debido al desarrollo de las agujas de etringita y algo de C-S-H. Las fases hidratadas de silicatos y aluminatos empieza a crear algo de adherencia entre las partículas que se han generado, resultando en una rigidez progresiva de la pasta de cemento.

Etapa IV: Endurecimiento

En la mayoría de los cementos Portland hay menos sulfato de calcio que la cantidad necesaria para reaccionar con la fase de aluminatos, además que durante el

fraguado los iones SO_4^{-2} son inicialmente consumidos por la formación de la etringita. Esto usualmente ocurre entre las 9 y las 15 horas después del mezclado inicial. En este tiempo, la etringita llega a ser la fuente de los sulfatos para formar monosulfoaluminato con la fase de aluminato remanente. Esta reacción genera calor y resulta en la aceleración de la hidratación de las fases de silicatos.

Los productos de hidratación formados durante estas primeras etapas son a menudo referidos a productos externos porque ellos crecen en la parte exterior de los granos de cemento en la fase acuosa intersticial. Ellos aparecen como una red porosa de fibras de C-S-H, agujas de etringita, placas de monosulfoaluminato y cristales hexagonales apilados de portlandita.

Etapa V: Retardo

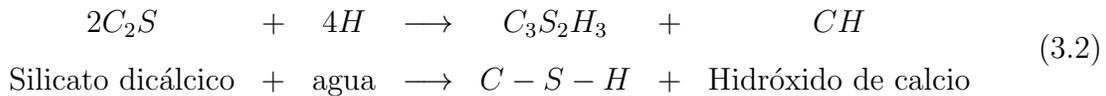
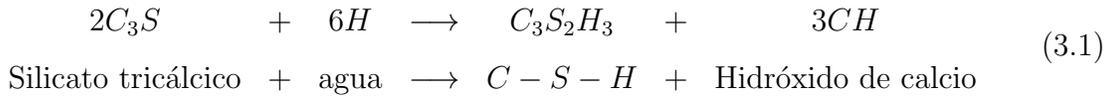
En esta etapa, los granos de cemento se han cubierto por una capa de hidratos, los cuales cada vez son más gruesos, y es más difícil para las moléculas de agua alcanzar la parte de las partículas de cemento aún no hidratadas a través de esta capa. La hidratación es disminuida principalmente debido a que la tasa de difusión es controlada por las moléculas de agua a través de las capas de hidratos, y la pasta de cemento hidratado aparece como una pasta masiva compacta amorfa conocida como producto interno.

La hidratación del cemento Portland también se detiene cuando no hay más fase anhidra o cuando el agua no alcanza las fases sin hidratar o cuando no hay más agua disponible.

Los **cationes alcalinos** normalmente ocurren en los cementos como sulfatos o están presentes en las principales fases del cemento Portland. En general con la presencia de estos iones la resistencia a edad temprana de la pasta se incrementa y la resistencia tardía se disminuye.

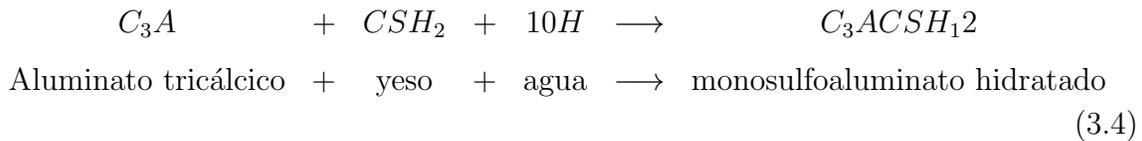
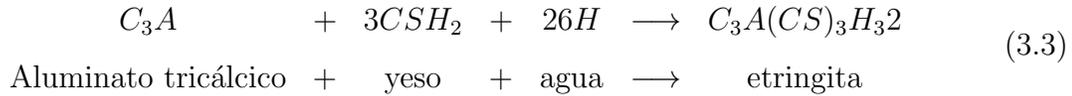
La **fineza** de los cementos generalmente se determina por el método de permeabilidad al aire "Blaine" y expresa su área superficial. El área superficial típica para cementos Portland ordinarios tiene un rango típico entre 280 y 350 m²/kg, mientras que para cementos con alta resistencia inicial pueden ser molidos a áreas superficiales entre 450 y 500 m²/kg, esta mayor área superficial contribuye a un aceleramiento en la hidratación del cemento, pero también incrementa su requerimiento de agua para una misma consistencia.

Los compuestos potenciales reaccionan con el agua para producir los productos de reacción como sigue:



En un cemento Portland totalmente hidratado, la portlandita generada constituye de un 20 a 25% del contenido sólido, esta cantidad será considerada para evaluar la combinación de las diferentes puzolanas en el diseño de nuestra experimentación.

Como ya se ha mencionado, la reacción del C₃A con el agua es muy rápida e involucra reacciones con los iones suministrados por la disolución del yeso y puede ser representada como sigue:



El C_4AF forma productos similares a aquellos del C_3A , donde el hierro sustituye parcialmente la alúmina en la estructura del cristal de etringita y monosulfoaluminato hidratado.

3.1.4 Agua en el concreto

Como componente del concreto convencional, el agua suele representar aproximadamente el 10,00 y 25,00 % del volumen del concreto recién mezclado, dependiendo del tamaño máximo de agregado que se utilice y del asentamiento que se requiera. Esto le concede una influencia importante a la calidad del agua de mezclado en el comportamiento y las propiedades del concreto, pues cualquier sustancia dañina que contenga, aún en proporciones reducidas, puede tener efectos adversos significativos en el concreto.

Una práctica bastante común consiste en utilizar el agua potable para fabricar concreto sin ninguna verificación previa, suponiendo que toda agua que es potable también es apropiada para elaborar concreto; sin embargo, hay ocasiones en que esta presunción no se cumple, porque existen aguas potables con contenidos de citratos o con pequeñas cantidades de azúcares, que no afectan su potabilidad pero pueden hacerlas

inadecuadas para la fabricación de concreto. En todo caso, la consideración contraria pudiera ser más conveniente, es decir, que el agua para la elaboración del concreto no necesariamente requiere ser potable, aunque sí debe satisfacer determinados requisitos mínimos de calidad.

Los requisitos de calidad del agua de mezclado para concreto no tienen ninguna relación obligada con el aspecto bacteriológico (como el caso de las aguas potables), sino que básicamente se refieren a sus características físico-químicas y a sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades del concreto.

En diversas especificaciones y prácticas recomendadas, al establecer la calidad necesaria en el agua de mezclado, se pone mayor énfasis en la valuación de los efectos que produce en el concreto, que en la cuantificación de las sustancias indeseables e impurezas que contiene.

Los efectos que produce el agua de mala calidad en una mezcla de concreto pueden ser de corto, mediano y largo plazo. Los efectos a corto plazo se relacionan generalmente con el tiempo de fraguado y las resistencias iniciales, los efectos a mediano plazo están relacionados con las resistencias posteriores (a 28 días o más) y los de largo plazo pueden consistir en el ataque de sulfatos, la reacción álcali-agregado y la corrosión del acero de refuerzo.

Prevenir los efectos a largo plazo se obtiene por medio del análisis químico del agua antes de usarse en la mezcla, verificando que no contenga cantidades excedidas de sulfatos, álcalis, cloruros y dióxido de carbono disuelto, principalmente.

Para la prevención de los efectos a corto y mediano plazo, se acostumbra precalificar el agua mediante pruebas comparativas de tiempo de fraguado y de resistencia a compresión a 7 y 28 días.

Las pruebas de tiempo de fraguado pueden efectuarse en pasta de cemento, según el método presentado en la norma ASTM C 191, utilizando las agujas de Vicat. Para llevar a cabo las pruebas de resistencia a compresión, se emplean normalmente especímenes de mortero, elaborados y ensayados de acuerdo con la norma ASTM C 109, utilizando cubos de 50,00 mm o 50,80 mm de lado.

3.2 Adiciones minerales

Los aditivos minerales son materiales de sílice finamente divididos que se agregan al concreto en relativamente grandes cantidades, generalmente del rango de 20 a 100 % por peso de cemento Portland (Mehta and Monteiro, 1998). A través de los años, las puzolanas en estado natural se han utilizado pero en años recientes, por motivos económicos y principalmente por razones ecológicas, muchos residuos industriales son la fuente principal de los aditivos minerales para el concreto.

Este tipo de aditivos, además de reducir los costos de producción del concreto y de aumentar la trabajabilidad en estado fresco, también pueden emplearse para mejorar la resistencia del concreto al agrietamiento térmico, contrarrestar la expansión álcali-agregado y proteger de los ataques de los sulfatos. Sin embargo, no deben ser empleados para subsanar la mala calidad de los componentes del concreto y la mala dosificación de la mezcla.

Algunos de los aditivos minerales son puzolanas (como la ceniza volante de bajo contenido de calcio), mientras que otros son tanto cementantes como puzolanas (como la ceniza volante de alto contenido de calcio).

3.2.1 Puzolanas

La palabra puzolana se acuñó en Italia y se utilizó para describir las cenizas volcánicas de *Pozzouli*, una villa cerca de Nápoles. Las cenizas provenían de las erupciones del Monte Vesubio.

Según la ASTM (American Society for Testing and Materials) C 593, las puzolanas naturales son materiales silíceos o sílico-aluminosos que por si solos poseen poco o nulo valor cementante, pero finamente divididos, y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con la portlandita (hidróxido de calcio $\{Ca(OH)_2\}$) a temperatura ordinaria para formar compuestos con propiedades cementantes.

3.2.1.1 Puzolanas naturales

Las puzolanas de origen natural son derivadas de erupciones volcánicas, excepto las tierras diatomáceas, las cuales son formadas por silicatos amorfos hidratados, derivados de los esqueletos de microorganismos acuáticos. El material de las erupciones volcánicas, compuesto principalmente de aluminosilicatos, es enfriado bruscamente, lo cual resulta en la formación de materiales con estructura desordenada o vítrea con minerales pobremente cristalinos. a la combinación de estructura pobremente cristalina o vítrea que puede poseer alta área superficial se le atribuye la reactividad de estos materiales (Valdez et al., 2004).

Una clasificación general de las puzolanas naturales de origen volcánico basado en sus constituyentes reactivos incluye a los vidrios volcánicos y tobas volcánicas.

Los **vidrios volcánicos** que han sufrido alteración hidrotermal los podemos denominar como **zeolitas**, y éstas las podemos encontrar como tobas, las cuales son estratos de materiales compactos de depósitos volcánicos.

Existen también otros materiales como las **arcillas y pizarras** que pueden tener potencialidad puzolánica después de un tratamiento térmico entre 800 y 900 °C, ya que con esta energía se logra transformar su estructura cristalina en estructura amorfa o desordenada, un producto obtenido de la arcilla caolinítica de alta pureza es el **metacaolín**, el cual tiene alta actividad puzolánica.

La ASTM C 618 realiza una clasificación de las puzolanas en tres clases:

- *Clase N* puzolanas naturales que fueron calcinadas, envuelven a las tierras de diatomeas, cenizas volcánicas, tufos o tobas volcánicas, ya sea calcinadas o sin calcinar.
- *Clase F* cenizas volantes productos de la quema de antracita o carbón bituminoso, este tipo de ceniza contiene propiedades puzolánicas.
- *Clase C* ceniza volante normalmente producida de carbón mineral que se forma por compresión de la turba, este tipo de ceniza además de tener propiedades puzolánicas, también contiene algunas propiedades cementantes.

En las tablas 3-3 y 3-4 vemos los requerimientos principales que toma la ASTM C 618 para la clasificación de las cenizas, con los resultados de la caracterización física y química de la ceniza de tallo de bambú podremos identificarla dentro de una clase según la norma.

3.2.1.2 Puzolanas artificiales

Las puzolanas artificiales, son subproductos de procesos industriales y requieren por consiguiente equipo para su disposición. En algunos casos se requiere un tratamiento

TABLA 3-3: Requerimientos químicos. (ASTM C 618)

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

^APara la ceniza tipo F es aceptado hasta un 12% de pérdida por ignición.

TABLA 3-4: Requerimientos físicos. (ASTM C 618)

	Clase		
	N	F	C
<i>Finesa:</i>			
Cantidad retenida cuando es lavada en tamiz No. 325, max, %	34	34	34
<i>Índice de fuerza:</i>			
Con cemento Portland, a 7 días, min, porcentaje con mezcla de control	75	75	75
Con cemento Portland, a 28 días, min, porcentaje con mezcla de control	75	75	75
Requerimiento de agua, max, porcentaje con mezcla de control	115	105	105
<i>Solvencia:</i>			
Expansión o contracción, max, %	0.8	0.8	0.8
<i>Requerimientos de uniformidad:</i>			
La densidad y la finesa de las muestras individuales no deben variar del promedio establecido por diez pruebas preliminares, o por todas las muestras preliminares si fueron menos de diez, por más de:			
Densidad, variación máxima del promedio, %	5	5	5
Porcentaje retenido en la malla No. 325, variación max, puntos de porcentaje del promedio	5	5	5

para obtener la mayor reactividad de estas, entre otras puzolanas artificiales se encuentra la ceniza de la quema de la **cascarilla de arroz**, **bagazo de caña**, también se ha estado estudiando los últimos años la ceniza proveniente de la quema de la **hoja de bambú**, las cuales se producen por medio de la quema controlada en un horno eléctrico a altas temperaturas durante un periodo de tiempo que puede variar entre 2 a 4 horas, con una temperatura aproximada de 650°C.

3.2.1.3 Reacción puzolánica

Cuando reaccionan en una mezcla el cemento Portland y la puzolana en la presencia de agua, una reacción similar a la reacción ácido-base se lleva a cabo, participando por una parte la cal y los álcalis liberados por la reacción de hidratación del cemento Portland y por la otra los óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) de la puzolana, por consiguiente, la presencia de la puzolana en el sistema de hidratación modifica los mecanismos de hidratación de los compuestos principales del cemento Portland, afectando el calor de hidratación, contenido de portlandita, la cantidad de agua combinada y el grado de reacción de los componentes.

La heterogeneidad de la familia de las puzolanas así como el fenómeno complejo que ocurre durante la hidratación, no permite definir un modelo de actividad puzolánica, únicamente permite tener una tendencia general para ser evaluada.

Los diferentes factores que debemos de considerar influyentes en la reacción puzolánica son:

- Las fases activas de la puzolana y su naturaleza
- Proporción de la puzolana en el cementante
- Cal disponible para reaccionar

- Área superficial de la puzolana
- Relación a/c de la mezcla
- Tiempo y tipo de curado
- Temperatura de curado

El principal producto de la reacción puzolánica es la fase **C-S-H**, que es similar al producido en la reacción del agua con el cemento Portland y que contribuye adicionalmente a la resistencia mecánica de las pastas, especialmente a edades avanzadas de hidratación. Cabe señalar que parte de los álcalis que participan en la reacción puzolánica y que fueron liberados en la reacción de hidratación quedan absorbidos en la estructura de los C-S-H, lo que también contribuye a disminuir la reacción álcali agregado en el concreto.

Al igual que en las pastas de cemento Portland, en la reacción de hidratación de cementos mezclados con puzolanas, podemos encontrar productos de reacción muy similares a los encontrados en las pastas del cemento Portland sin puzolanas, la diferencia entre las fases encontradas involucra la variación en la relación de sus componentes y su morfología. Los hidratos encontrados en la pasta endurecida son:

- C-S-H (silicato de calcio hidratado)
- C_2ASH_8 (hidrato de gelenita)
- $Ca(OH)_2$ (hidróxido de calcio)
- $CaCO_3$ (carbonato de calcio)
- Etringita
- Hidratos de aluminato de calcio

- Monosulfoaluminato

Malhotra and Ramezaniapur (1994), proponen como mecanismo principal de reacción puzolánica una disolución controlada por difusión y describen las reacciones que existen entre las fases de C_3S y C_3A y la puzolana. En el sistema C_3S -puzolana, los iones de calcio disueltos se mueven libremente en el líquido y son adsorbidos en la superficie de las partículas de la puzolana. El C-S-H formado por la hidratación del C_3S precipita como hidratos de alta relación Ca/Si sobre la superficie del grano de C_3S y como hidrato poroso con baja relación Ca/Si sobre la superficie de la partícula puzolánica ya que ésta ha sufrido disolución. El ataque de la superficie de la puzolana en agua trae consigo una disolución gradual de iones Na^+ y K^+ , resultando una capa amorfa sobre la superficie de la puzolana rica en Si y Al. Los iones Na^+ y K^+ disueltos incrementan la concentración OH^- y aceleran la disolución de los iones SiO_4^{4-} y AlO_2^- , que se combinan con los Ca^{2+} disueltos para incrementar el espesor de la capa amorfa.

Debido a la presión osmótica, la capa se hincha gradualmente, dejando además un hueco entre la capa y la partícula de la puzolana. Cuando la presión osmótica rompe la capa, los iones SiO_4^{4-} y AlO_2^- se difunden en la solución rica en iones Ca^{2+} , trayendo como consecuencia la generación de adicionales hidratos de C-S-H y Ca-Al que se precipitan sobre la superficie de los hidratos del C_3S . Los huecos permanecen en el interior de capa ya que los hidratos no precipitan ahí debido a la alta concentración de los álcalis. Las puzolanas con bajo contenido de álcalis permiten la disolución de la capa amorfa que es rica en Si y Al, originando que los iones Ca^{2+} se muevan en el hueco anteriormente formado y se precipiten como hidratos de silicatos y aluminatos de calcio sobre la superficie de la partícula de la puzolana.

Para el caso del sistema C_3A -puzolana, en la presencia de hidróxido de calcio y yeso, la presencia de la puzolana acelera la hidratación del C_3A por la adsorción de los iones Ca^{2+} de la fase líquida y por proveer sitios de precipitación para la etringita

y otros hidratos. La reacción de este sistema es similar al sistema C_3S -puzolana explicado anteriormente. La etringita, el monosulfoaluminato hidratado, los hidratos de aluminato de calcio e hidratos de calcio son formados sobre la superficie exterior de la capa fuera de las partículas de la puzolana o sobre la capa hidratada de la partícula de C_3A , dependiendo de la concentración de iones Ca^{2+} y SO_4^{2-} en la solución.

En las figuras 3.1 y 3.2 se muestran los diagramas esquemáticos del mecanismo de hidratación en sistemas C_3S y C_3A con la puzolana.

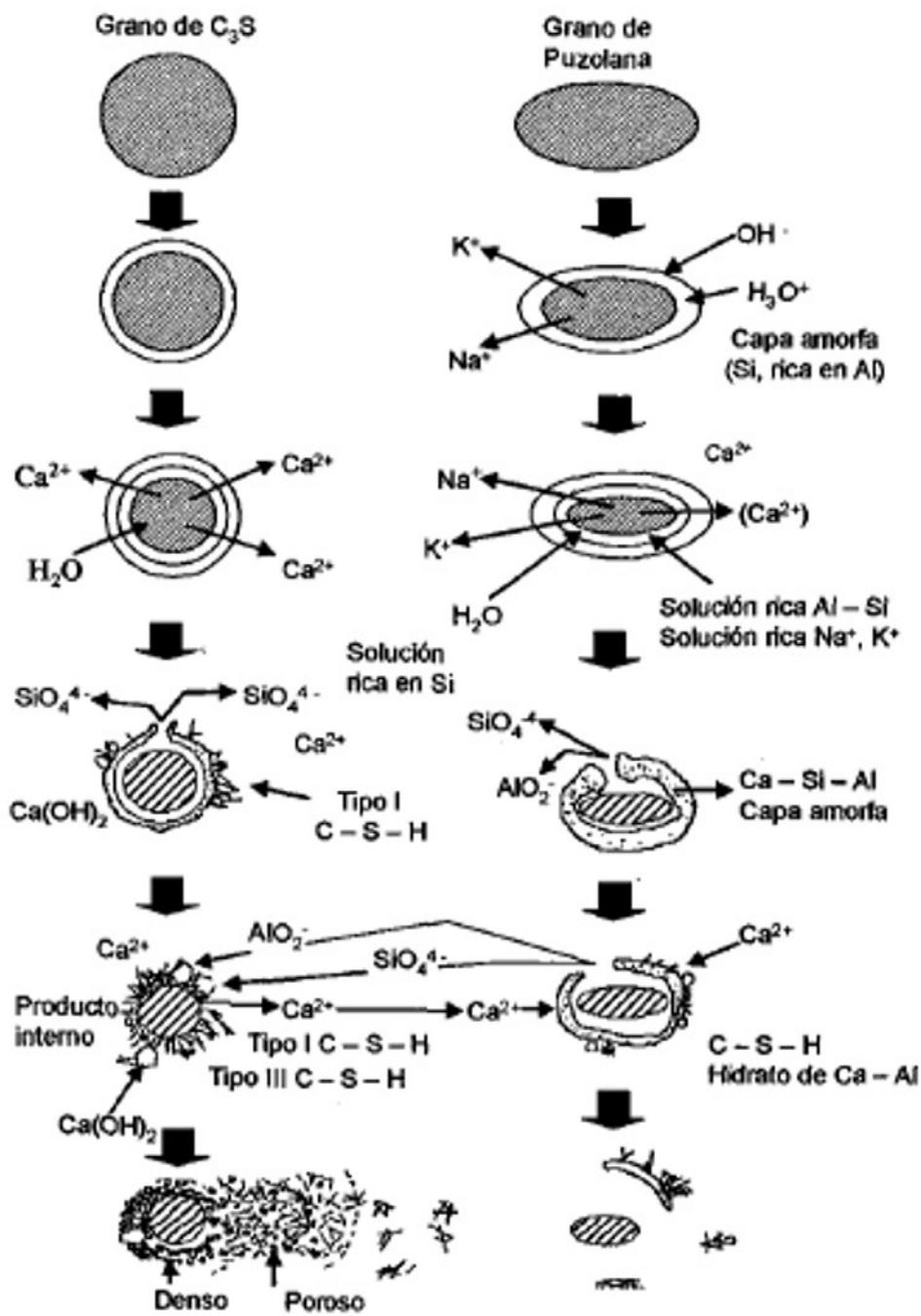


FIGURA 3.1: Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas C_3S -puzolanas (Malhotra and Ramezaniapur, 1994)

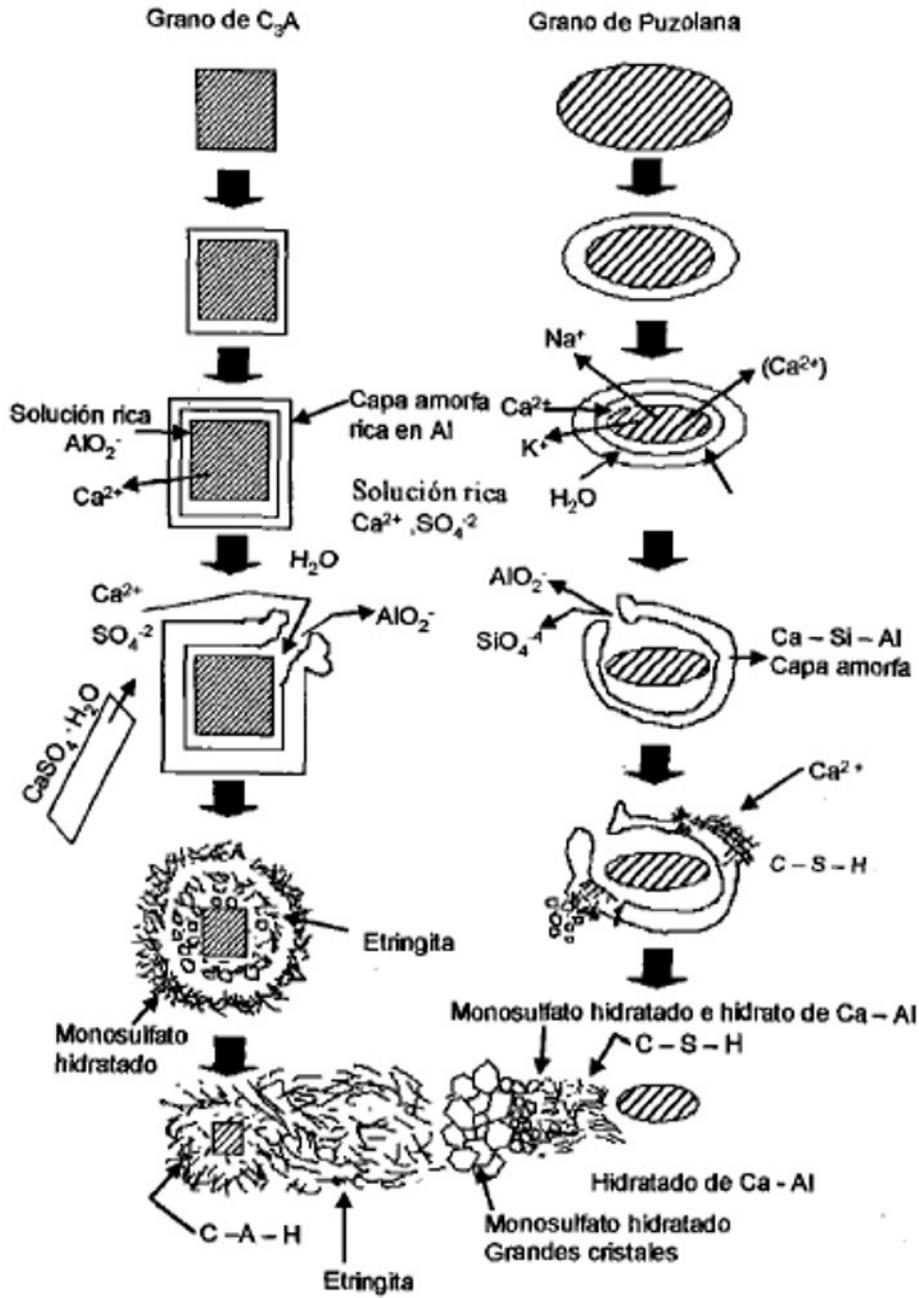


FIGURA 3.2: Representación esquemática del mecanismo de hidratación en sistemas C_3A -puzolanas, en presencia de yeso y portlandita (Malhotra and Ramezaniapour, 1994)

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se describen la metodología y los materiales utilizados para evaluar y proponer las diferentes proporciones y la caracterización de la ceniza de tallo de bambú, cuyo objetivo es resolver el problema planteado en la sección 1.1. En los siguientes apartados se presentarán primero los materiales a utilizar, posteriormente se explicarán cada parte del proceso de investigación llevado a cabo en este proyecto de tesis.

El trabajo de investigación presentado en este documento se llevó a cabo en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Centro Universitario, ubicado en el Cerro de las Campanas en la ciudad de Santiago de Querétaro, Qro., México. En específico, los trabajos fueron realizados en los laboratorios de Mecánica de Suelos, de Física y Química e Hidrología de dicha Facultad.

4.0.1 Especificación y Clasificación de los materiales

4.0.1.1 Cemento

Para la investigación se empleó cemento CPC 30R de la marca Cemex Tolteca EXTRA con alta resistencia inicial. Este cemento corresponde a la clasificación CPC (Cemento Portland Compuesto) de la actual norma mexicana para cementos en México, NMX-C-414-ONNCCE, y sus propiedades de acuerdo a esta norma se muestran en las Tablas 4-1 y 4-2.

TABLA 4-1: Tiempo de fraguado del cemento CPC 30R (NMX-C-414-ONNCCE).

Tiempo de fraguado (min)	
Inicial	45 (mínimo)
Final	600 (máximo)

TABLA 4-2: Resistencia a la compresión del cemento CPC 30R (NMX-C-414-ONNCCE).

Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	
3 días	204 (mínimo)
28 días	306 (máximo)

4.0.1.2 Agregado fino

A continuación se describen brevemente las pruebas realizadas a la arena de río para su caracterización:

- Densidad aparente. Este valor fue obtenido siguiendo los pasos de la ASTM C 29. Este método cubre la determinación de la densidad aparente de un agregado en un estado compactado o suelto. La densidad aparente de un agregado es masa por unidad de volumen. La densidad aparente suelta se determinó llenando un recipiente de peso y volumen conocidos dejando caer arena desde una altura aproximada de 5 cm sobre la parte alta del recipiente hasta llenar el mismo, posterior a esto se realizó su enrasado y pesado del recipiente con el agregado fino y se determinó la masa que cupo en el volumen del recipiente, el procedimiento se realizó dos veces para una mejor lectura. La densidad aparente compactada se realizó de igual manera pero a diferencia de la otra en esta prueba se varillaron las capas para compactar el material y al final del llenado el recipiente se enrazó y se pesó, este procedimiento se realizó dos veces para una mejor lectura.

- Granulometría. La granulometría del agregado fino se obtuvo siguiendo las especificaciones de la norma ASTM C 778. Este método de ensayo cubre la determinación por mallas de la distribución por tamaño de partículas del agregado fino y contiene los requisitos de la arena graduada. Una muestra de ensayo de agregado seco de masa conocida se separó a través de una serie de mallas de aberturas progresivamente más pequeñas para la determinación de la distribución por tamaño de partículas. Los resultados de la granulometría son presentados en la tabla 4-3. Debido a las especificaciones de la ASTM C 778 se tuvo que crear la arena conforme a sus especificaciones, cabe resaltar que en la ciudad de Querétaro no se encuentra una arena bien graduada que cumpla con la granulometría pedida, por eso se separó en mallas la arena y así se reunieron los porcentajes requeridos para cumplir con los objetivos planeados.

TABLA 4-3: Granulometría agregado fino

Malla No.	Abertura	ASTM C 778		Arena %que pasa
		% Mín	% Máx	
16	1.18mm	100	100	100.00
20	850 μ m	100	100	100.00
30	600 μ m	96	100	98.00
40	425 μ m	65	75	70.50
50	300 μ m	20	30	26.80
100	150 μ m	0	4	2.00

4.0.1.3 Agua

El agua utilizada, tanto para la elaboración de las mezclas como para el curado del concreto, fue agua potable de la ciudad de Santiago de Querétaro. En el primer caso, fue de uso interno como agua de mezclado; y en el segundo, se empleó exteriormente cuando el concreto se curó con agua.

Los requisitos de calidad del agua de mezclado para el concreto no tienen ninguna relación obligada con el aspecto bacteriológico sino que básicamente se refieren a sus características físico-químicas y a sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades del concreto, pero generalmente se considera que el agua que es buena para consumo humano es satisfactoria como agua de mezclado en la elaboración del concreto.

El agua tiene ingredientes nocivos tales como: sedimentos, aceites, azúcar o químicos perjudiciales. Un contenido excesivo de estos ingredientes es dañino para la resistencia mecánica, propiedades de fraguado del cemento, puede afectar en forma adversa la trabajabilidad de la mezcla y la corrosión del acero de refuerzo.

4.0.1.4 Ceniza de tallo de bambú

Se estudiará la ceniza de tallo de bambú, obtenida mediante la quema de los tallos en un área controlada, alcanzando aproximadamente los 600°C, tal como se muestra en la figura 4.1, cabe notar que se separaron los tallos por tipo: **Oldhamii** y **Guadua Angustifolia**, para así comparar los resultados de los dos tipos. Después de la quema las cenizas fueron molidas en un mortero, ya que las cenizas resultantes de la quema quedan en filamentos muy finos que no pueden ser tamizados, en la figura 4.2 se puede observar las cenizas ya molidas en mortero para después ser tamizadas. Las cenizas contienen mucho desperdicio, a pesar de haber sido molidas no se obtuvo mucho material para trabajar en las mezclas, se estará trabajando en las cenizas retenidas en las mallas No. 100 y No. 200, tanto de Oldhamii como de Guadua Angustifolia.

Posteriormente para efectos de investigación ciertos gramos de ceniza fueron calcinados en una mufla propiedad del Laboratorio de Hidrología ubicado dentro de la Facultad de Ingeniería, como se muestra en la figura 4.3. Esta ceniza calcinada, así



FIGURA 4.1: Quema controlada del tallo de bambú.



FIGURA 4.2: Ceniza molida en mortero.

como la ceniza resultante de la quema fueron caracterizadas con las pruebas que se mencionan más adelante.



FIGURA 4.3: Ceniza calcinada en mufla.

Para la calcinación se realizaron calcinaciones a diferentes temperaturas:

- Duración: 2 horas a 650°C.
- Duración: 2 horas a 850°C.
- Duración: 4 horas a 1,000°C.
- Duración: 48 horas aprox. a 1,000°C.

Pruebas realizadas para caracterización química en las cenizas de tipo Oldhamii y Guadua Angustifolia:

- Difracción de Rayos X (DRX): Se detectan las diferentes fases y componentes cristalinos en la muestra de material puzolánico.
- Determinación de morfología micro-estructural: Análisis mediante Microscopía de Escaneo Electrónico (SEM). El Microscopio Electrónico de Barrido es un microscopio que utiliza electrones como fuente luminosa, el cual es generado por el cañón electrónico, el haz electrónico es enfocado por lentes electromagnéticas. El haz electrónico, al incidir sobre el material, genera diferentes tipos de radiación. Cada radiación puede ser captada por un detector específico. Se pueden captar electrones secundarios pues cuenta con un lector de electrones secundarios y otro de electrones retro-dispersos. En ambos casos las imágenes son generadas por un programa de computadora.

Pruebas realizadas para el análisis de la actividad puzolánica:

- Fracción soluble en agua (WSF): Se procede a partir de una muestra molida de 10 gr. de puzolana seca (secada hasta un peso constante en un horno de secado a temperaturas entre 105 y 110°C). Esta muestra se coloca en un frasco Erlenmeyer y se le añade 100 ml. de agua destilada a una temperatura de 23°C ±2°C. Se agita bien a mano hasta que no se observan terrones ni cúmulos. A continuación se agita la solución durante 1 hora por medio de un agitador mecánico a temperatura ambiente de laboratorio. Se vierte sobre un vidrio reloj y se tira la parte de la solución dejando los residuos de la muestra que no se han llegado a diluir. El vidrio con este resto de muestra se seca y se lleva a peso constante en un horno de secado a una temperatura de 105°C por 24 horas. Se

pesa lo que queda de muestra seca y el porcentaje de Fracción Soluble en Agua se calcula multiplicando la pérdida de peso de la muestra en gramos por 10.

- Tamaño de partícula (PS): Se estudia tamizando 100gr. de puzolana seca en los tamices No. 4 (4.75mm), 8 (2.36mm), 16 (1.18mm), 30 (600 μ m), 50 (300 μ m), 100 (150 μ m) y 200 (75 μ m). Se calcula la retención parcial y la retención acumulativa, prestando atención a lo retenido en los tamices 30 y 200.
- Desarrollo de resistencia de la mezcla puzolana-cal-arena, basado en la ASTM C 593. De acuerdo a las proporciones aplicables del método de prueba C 109 y C 305 de la ASTM, se preparan 3 especímenes, en una proporción de 90 gr. de cal hidratada, 180 gr. de puzolana seca y 740 gr. de arena graduada. La cantidad de agua de la mezcla, medida en mililitros, es la adecuada para generar una fluidez de entre 65 y 75, expresado en porcentaje de la combinación entre la cal y la puzolana y de acuerdo al test de fluidez de la ASTM C 109, excepto que se darán 10 golpes en 6 segundos sobre la mesa de fluidez, en vez de 25 en 15 segundos. La cal y la puzolana se mezclan con el agua y luego la mezcla completa se moldea en cubos de 5cm x 5cm. Cuando el moldeado se completa con la parte superior cubierta para proteger la parte superior del escurrimiento se meten inmediatamente en vapor a 75°C en ambiente saturado, se dejarán las muestras en vapor durante 7 días en un periodo de 12 horas por día, para observar el efecto del vapor en la aceleración de la reacción puzolánica. Luego se sacan las muestras, se desmoldan para meterlos en una cámara con temperatura 23 \pm 5°C y una humedad relativa entre 95% y 100%.

Se realiza una prueba a compresión simple a los 7 días justo recién sacadas de la cámara de humedad y se presenta la resistencia a compresión en estas condiciones controladas.

- Medición de la conductividad eléctrica y pH de una solución de cal y puzolana con agua desionizada. Su evolución en el tiempo y la obtención de los parámetros cinéticos (Villar-Cociña et al., 2003) (Villar-Cociña et al., 2011). Este método estudia la continuidad en la evolución de la variación de la conductividad en el tiempo de una solución de hidróxido de calcio y una puzolana. Se mezcla 100 ml de una solución saturada de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y agua desionizada con 2.10 gr. de puzolana agitados por medio de un agitador magnético. La solución contiene una proporción de 0.040 mol/L. Se mezclan los tres elementos durante 2.5 horas y se comienza la medición a las 24 horas. La conductividad y el pH se medirán cada 12 horas, el periodo de duración lo dictará el comportamiento de la solución. La medición se realiza con un sensor de conductividad marca Horiba D-54 ph/conductivity meter, el cual utiliza dos electrodos marca Horiba, uno para medición de pH y el segundo para medición de conductividad; en la figura 4.4 se muestra la foto del aparato utilizado. En la figura se muestra la relación de las cenizas que estarán sometidas a esta prueba.

La actividad puzolánica se muestra como la relación entre las variaciones de la conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de la solución y el tiempo transcurrido. La conductividad desciende debido a la reacción entre la puzolana y el hidróxido de calcio, que hace decrecer la concentración de CH y, por lo tanto, hace decrecer la conductividad eléctrica.

El pH en cambio, irá incrementando su valor debido a la reacción alcalina presentada dentro de la solución. Se tomarán los valores a la par, tanto del pH como de la conductividad para poder plasmar su comportamiento.

4.0.1.5 Ceniza volante

La ceniza volante utilizada en esta investigación se obtuvo de la Central Carboeléctrica Río Escondido (José López Portillo), localizada en la ciudad de Piedras Negras, Coahuila, México. Debido a su bajo contenido de óxido de calcio (CaO), esta ceniza volante está clasificada como tipo F, de acuerdo con la norma ASTM C 618. La densidad de la ceniza volante fue de 3.2 g/cm³. La ceniza volante no fue procesada y se utilizó tal cual se recibió.

Se le realizó la determinación del material cristalino por la técnica de difracción de rayos X (DRX). En los resultados obtenidos se apreció principalmente mullita (Al₈Si₂O₁₃) y cuarzo (SiO₂), hematita y magemita (fases cristalinas de óxido de hierro, Fe₂O₃).

4.0.2 Diseño experimental

Se realizaron mezclas con cemento y también con cal, conforme a las normas ASTM C 311 Y C 593. En las figuras 4.6 y 4.7 se muestran las diferentes probetas propuestas con sus dosificaciones correspondientes, incluyendo preliminares y la mezcla de control. También se mencionan las pruebas a realizar para cada muestra.

4.0.3 Mezclado

El mezclado del mortero utilizado en la investigación se realizó en una bandeja rectangular, según la norma C 311 se deben mezclar primero la puzolana y el cemento, en caso de las mezclas con cal es la puzolana junto con la cal. Después se les agrega el agua esperando una fluidez indicada en la Tabla de Dosificaciones, antes mencionada.

DOSIFICACIONES							
MEZCLAS	CENIZA BAMBÚ	CENIZA CÁSCARA DE ARROZ	CÁSCARA DE ARROZ	FLY ASH	CAL	CEMENTO	ARENA
1	81 g	189 g	-	-	270 g	-	-
2	81 g	-	189 g	-	270 g	-	-
3	81 g	-	-	189 g	270 g	-	-
4	37.5 g	87.5 g	-	-	-	500 g	1,250 g
5	37.5 g	-	87.5 g	-	-	500 g	1,250 g
6	37.5 g	-	-	87.5 g	-	500 g	1,250 g
7	41.67 g	-	41.67 g	41.67 g	-	500 g	1,250 g
8	125 g	-	-	-	-	500 g	1,250 g
TOTAL	752.37 g	407.75 g	510.87 g	510.87 g	810 g	1,750 g	6,250 g

FIGURA 4.6: Dosificaciones.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS							
MEZCLAS	CENIZA BAMBÚ	CENIZA CÁSCARA DE ARROZ	CÁSCARA DE ARROZ	FLY ASH	CAL	CEMENTO	ARENA
1	15%	35%	-	-	50%	-	-
2	15%	-	35%	-	50%	-	-
3	15%	-	-	35%	50%	-	-
4	6%	14%	-	-	-	80%	1 : 2.00
5	6%	-	14%	-	-	80%	1 : 2.00
6	6%	-	-	14%	-	80%	1 : 2.00
7	6.67%	-	6.67%	6.67%	-	80%	1 : 2.00
8	20%	-	-	-	-	80%	1 : 2.00

FIGURA 4.7: Experimentación.

En la figura 4.8 se muestra la mezcla de los materiales en seco para después agregarles el agua, todo esto se realizó sin máquinas revolventoras debido a la cantidad de los materiales a mezclar.

4.0.4 Elaboración y curado de especímenes

El llenado de los moldes se realizó acorde a la ASTM C 109, rellenando en partes y dando golpes tal y como se indica para asegurar la compactación dentro de los moldes. Todos los especímenes elaborados fueron compactados mediante un proceso



FIGURA 4.8: Mezcla de puzolana y cal.

de varillado; el cual consistió en varillar cada capa con una varilla punta de bala, dando 32 golpes, distribuyendo éstos uniformemente sobre la superficie. Al final, se enrasó y acabó la superficie del concreto con una espátula de abanico. En la figura 4.9 se observan el tipo de moldes utilizados para las muestras.

Para la etapa de curado se emplearon distintos procedimientos según el tipo de mezcla que se realizó. En las mezclas de concreto se mantuvieron en los moldes las primeras 24 horas dentro de un cuarto húmedo; después se desmoldaron y se sumergieron en agua con cal hasta el día de la prueba a compresión. Para las mezclas preliminares con cal se mantuvieron en los moldes en vapor, con alrededor de 75°C durante 12 horas por día, y se sacaron del vapor un día antes y se mantuvieron en el cuarto húmedo hasta la realización de la prueba a compresión.

Un curado adecuado es vital para la calidad del concreto. El curado tiene una fuerte influencia en las propiedades del concreto en estado endurecido tales como la



FIGURA 4.9: Moldes utilizados.

durabilidad y la resistencia. El desarrollo de la resistencia superficial en el concreto se puede reducir significativamente cuando el curado es defectuoso. Como es bien sabido, curar el concreto ayuda a la hidratación de los materiales cementantes, por lo que un buen curado significa que la evaporación debe ser prevenida o reducida.

4.0.5 Método de prueba

La respuesta de un elemento estructural de concreto reforzado se determina en parte por la respuesta a compresión del concreto simple. Por este motivo, se caracterizó la respuesta del concreto simple sobre la base de la resistencia a la compresión de cubos de 5x5 cm.

En este método de prueba se aplicó una carga axial, continuamente y sin impacto, de compresión a los cubos moldeados a una velocidad prescrita hasta que

ocurrió la falla. La resistencia a la compresión de cada espécimen se calculó dividiendo la carga máxima alcanzada durante la prueba por el área de la sección transversal del espécimen.

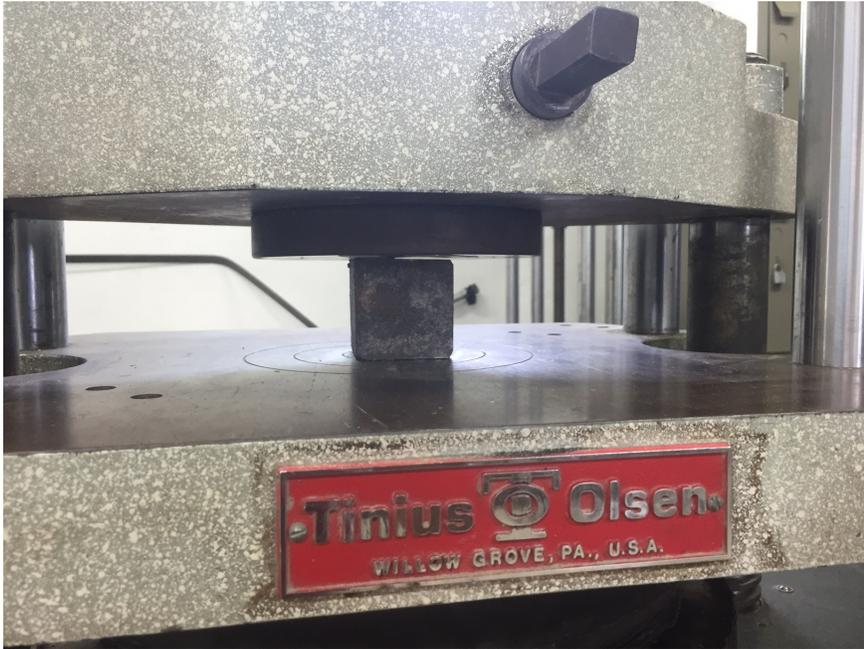


FIGURA 4.10: Cubo ensayado.

Los ensayos de resistencia a compresión se realizarán según lo establecido por la norma ASTM E 761:

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad (4.1)$$

R_c = resistencia a compresión

F_c = carga máxima a rotura (N)

S = superficie de la base sobre la que se aplica la carga

Según las Normas Técnicas Complementarias para los morteros que sirven para pegar piezas deben cumplir una resistencia a compresión de por lo menos 4 MPa (40kg/cm²). Para morteros de relleno su resistencia a compresión será por lo menos de 12.5 MPa (125kg/cm²).

4.0.6 Caracterización de mezclas finales

Prueba realizada para caracterización química en las mezclas resultantes de concreto:

- Determinación de morfología micro-estructural: Análisis mediante Microscopía de Escaneo Electrónico (SEM). El Microscopio Electrónico de Barrido es un microscopio que utiliza electrones como fuente luminosa, el cual es generado por el cañón electrónico, el haz electrónico es enfocado por lentes electromagnéticas. El haz electrónico, al incidir sobre el material, genera diferentes tipos de radiación. Cada radiación puede ser captada por un detector específico. Se pueden captar electrones secundarios pues cuenta con un lector de electrones secundarios y otro de electrones retro-dispersos. En ambos casos las imágenes son generadas por un programa de computadora.

5. RESULTADOS

5.0.1 Resultados de calcinación

A continuación se presentan los resultados de la calcinación de las cenizas, tanto Oldhamii como Guadua Angustifolia. Para la calcinación de 650°C se encontró que la ceniza tuvo entre 4 y 6% en cuanto a pérdida de peso; con los resultados de 850°C se obtuvieron los porcentajes de pérdida de peso, de hasta un 15.70%; en cuanto a la ceniza calcinada a 1000°C por 4 horas se obtuvo hasta 16.50%; aunque el mayor porcentaje de pérdida de peso se obtuvo calcinando las cenizas durante 1000°C por aproximadamente 48 horas, teniendo como resultado hasta casi 23%. En las tablas 5-1, 5-2, 5-3 y 5-4 se muestran cada uno de los porcentajes.

TABLA 5-1: Cenizas calcinadas a 650°C por 2 horas.

Tipo de bambú	No. de muestra	Peso inicial (gr.)	Peso final (gr.)	% de peso perdido
Oldhamii	1	7.801	7.376	5.45%
Oldhamii	2	7.318	6.924	5.38%
Oldhamii	3	8.716	8.254	5.30%
G. Angustifolia	1	8.130	7.806	3.98%
G. Angustifolia	2	8.578	8.237	3.97%
G. Angustifolia	3	7.636	7.329	4.02%

TABLA 5-2: Cenizas calcinadas a 850°C por 2 horas.

Tipo de bambú	No. de muestra	Peso inicial (gr.)	Peso final (gr.)	% de peso perdido
Oldhamii	1	8.399	7.089	15.60%
Oldhamii	2	6.048	5.098	15.70%
Oldhamii	3	11.927	10.077	15.51%
G. Angustifolia	1	9.099	8.044	11.60%
G. Angustifolia	2	7.006	6.187	11.70%
G. Angustifolia	3	7.201	6.361	11.66%

TABLA 5-3: Cenizas calcinadas a 1000°C por 4 horas.

Tipo de bambú	No. de muestra	Peso inicial (gr.)	Peso final (gr.)	% de peso perdido
Oldhamii	1	6.025	5.045	16.26%
Oldhamii	2	6.008	5.018	16.47%
G. Angustifolia	1	6.011	5.254	12.60%
G. Angustifolia	2	6.005	5.250	12.57%

TABLA 5-4: Cenizas calcinadas a 1000°C por 48 horas.

Tipo de bambú	No. de muestra	Peso inicial (gr.)	Peso final (gr.)	% de peso perdido
Oldhamii	1	4.630	3.591	22.44%
Oldhamii	2	4.621	3.584	22.44%
G. Angustifolia	1	4.076	3.403	16.51%
G. Angustifolia	2	4.192	3.478	17.02%
Fly Ash	1	5.332	4.978	6.64%
Fly Ash	2	5.675	5.306	6.50%



FIGURA 5.1: Cenizas calcinadas.

5.0.2 Resultados de pH y conductividad eléctrica

Dentro de la caracterización de la ceniza de tallo de bambú un punto muy importante es el pH y la conductividad eléctrica, a continuación se muestran las gráficas de las diferentes mezclas realizadas en la solución de cal/agua desionizada que se estuvieron tomando cada 24 horas. Primero se presenta la curva de calibración de la solución cal/agua desionizada sin agregar ceniza, esto para obtener una comparación con los artículos mencionados en los antecedentes y en la metodología.

Las gráficas mostradas en las imágenes 5.4 y 5.5 muestran el pH de las diferentes calcinaciones de la ceniza de tallo de bambú, comparándolas con ceniza de paja y ceniza volante. Se observa que la ceniza de paja y volante tienen un comportamiento más acelerado que la ceniza de bambú.

Para la conductividad eléctrica, las imágenes mostradas 5.6 y 5.7, respaldan la información del pH, ya que la ceniza de paja y volante tuvieron un proceso más acelerado de conductividad. Por otro lado, las cenizas que solamente fueron quemadas mostraron al día 26 y 27 el inicio de un comportamiento estático, a partir de estos días se nota que la conductividad se estabiliza, dando a pensar que la reacción entre la ceniza y el hidróxido de calcio ha terminado. En cuanto a las cenizas calcinadas muestran comportamientos irregulares, aunque se tomaron mediciones durante 30 días, estos resultados nos muestran que era necesario tomar mediciones durante más días, puesto que no se llega al comportamiento estable que se deseaba según los antecedentes mostrados con anterioridad.

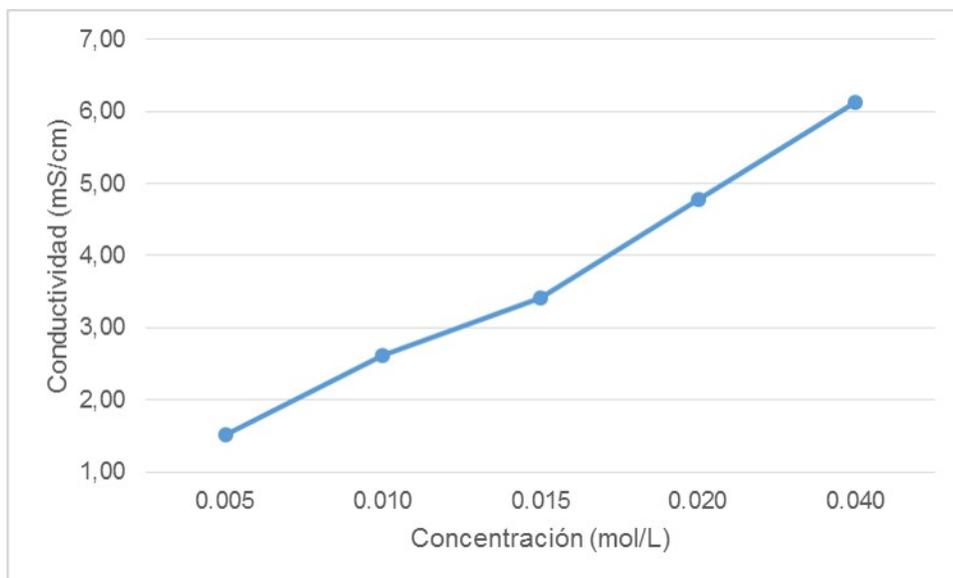


FIGURA 5.2: Curva de calibración para conductividad eléctrica.

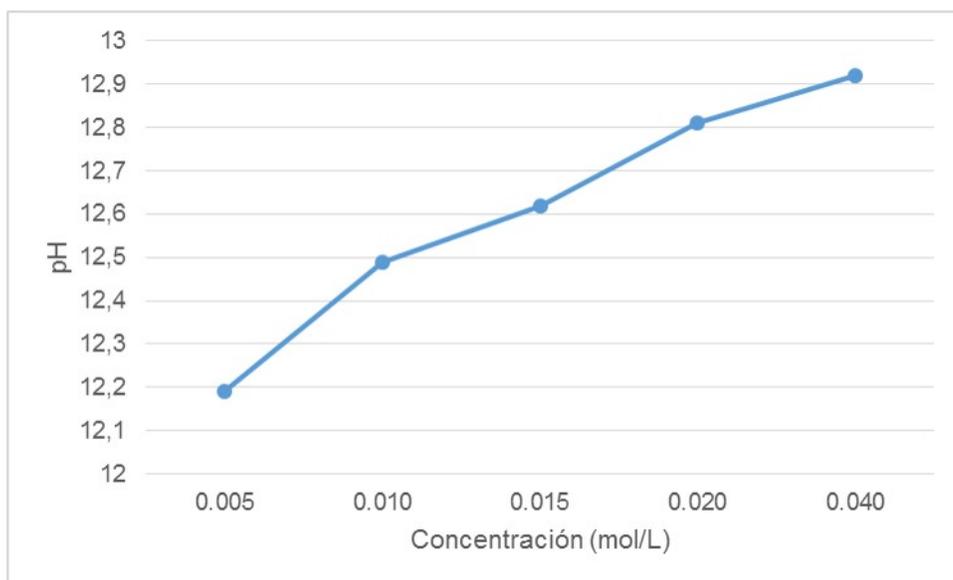


FIGURA 5.3: PH de solución cal/agua desionizada.

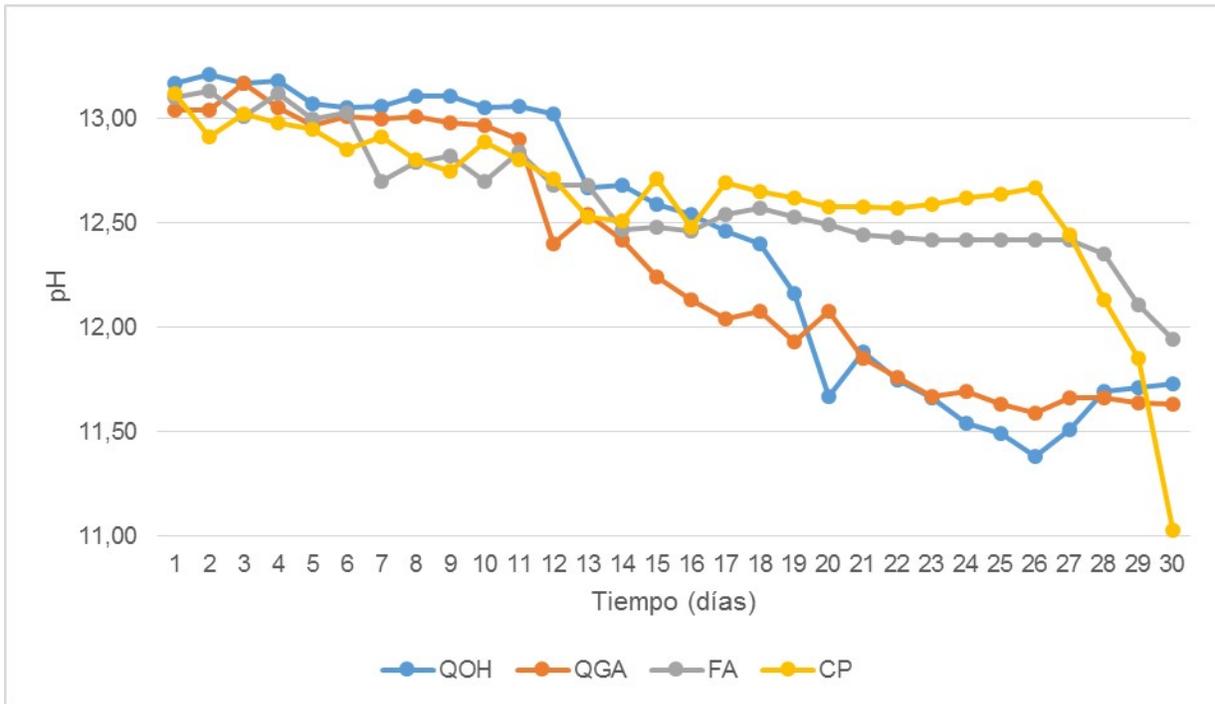


FIGURA 5.4: PH de cenizas quemadas.

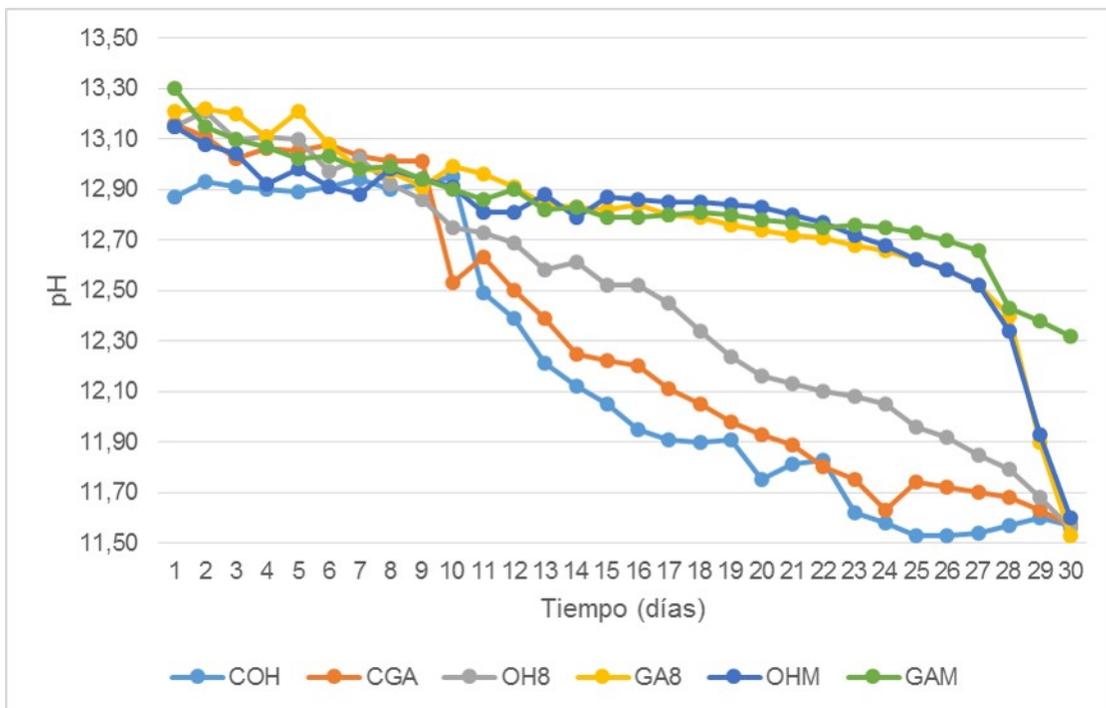


FIGURA 5.5: PH de cenizas calcinadas.

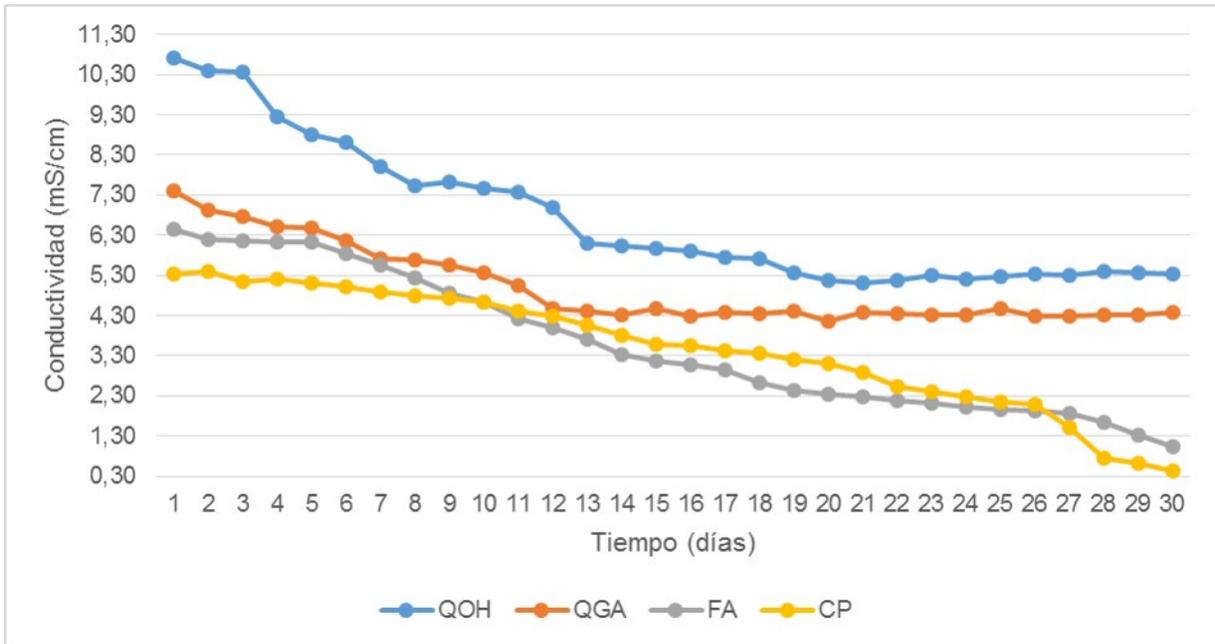


FIGURA 5.6: Conductividad eléctrica de cenizas quemadas.

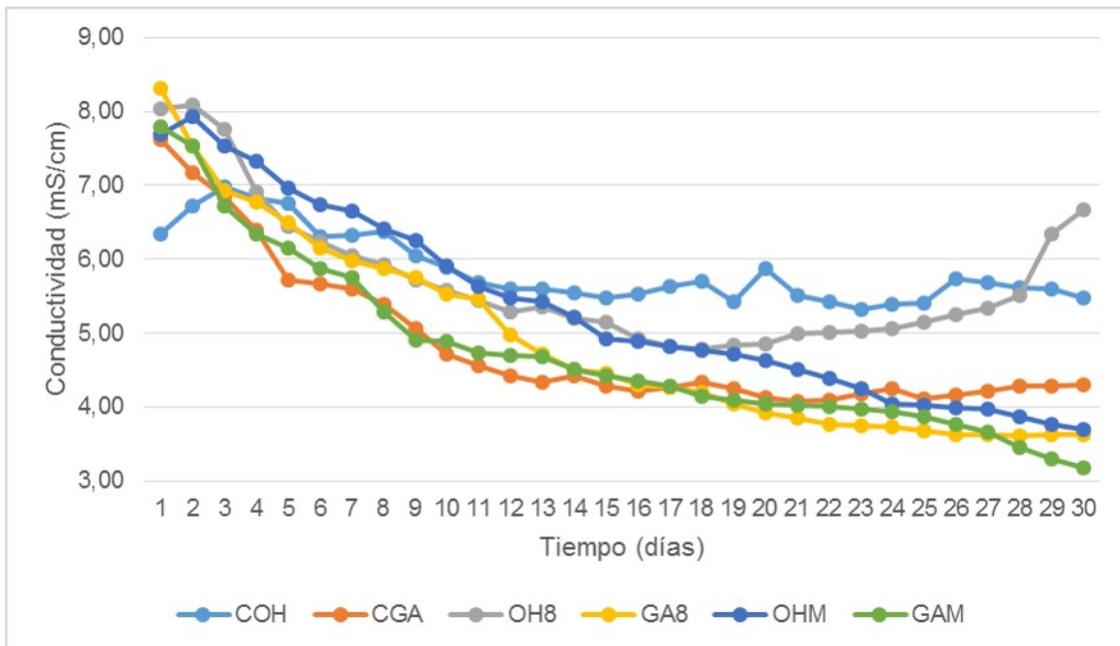


FIGURA 5.7: Conductividad eléctrica de cenizas calcinadas.

5.0.3 Resultados de caracterización química

5.0.3.1 Fluorescencia de Rayos X por energía dispersiva

A continuación se muestran los resultados obtenidos por medio del procedimiento que es la Fluorescencia de Rayos X por energía dispersiva, la cual es una técnica de muestreo versátil, rápida y no destructiva, que reconoce un gran número de elementos químicos. Éste procedimiento nos presenta resultados que indican el potencial puzolánico de la ceniza de bambú, en específico al tipo Guadua Angustifolia, la cual presenta un 27% de sílice, pero muy bajo porcentaje de aluminio. Tendrían que realizarse más pruebas para seguir analizando el potencial puzolánico de la ceniza, la cual podría presentar una opción viable para la sustitución del cemento en proporciones de no más de un 20%.

FLUORESCENCIA DE RAYOS X POR ENERGÍA DISPERSIVA						
Elementos	GA8	GAM	RH	RHC	OH8	OHM
Porcentaje (%)						
Carbón	5.30	2.70	43.32	42.84	4.78	3.83
Oxígeno	49.29	49.74	45.94	44.23	47.93	48.14
Sodio	0.54	0.57	-	-	0.46	0.51
Magnesio	0.48	0.55	0.22	0.23	0.39	0.40
Aluminio	0.22	0.39	0.25	2.41	0.38	0.78
Sílice	26.52	27.25	8.72	8.78	24.52	24.71
Fósforo	1.49	1.50	0.47	0.54	1.57	1.44
Azufre	0.62	0.90	0.08	0.04	0.53	0.77
Cloro	0.35	0.33	0.11	0.01	0.60	0.72
Potasio	15.19	16.07	0.64	0.69	18.69	18.50
Calcio	-	-	0.25	0.23	-	-
Hierro	-	-	-	-	0.14	0.20
Suma	100	100	100	100	100	100

FIGURA 5.8: Resultados Fluorescencia de Rayos X por energía dispersiva.

MUESTRAS PARA FLUORESCENCIA	
NOMENCLATURA	SIGNIFICADO
GA8	Guadua angustifolia calcinada a 850°C por 2 hrs
GAM	Guadua angustifolia calcinada a 1000°C por 4 hrs
RH	Cáscara de arroz
RHC	Ceniza de cáscara de arroz
OH8	Oldhamii calcinada a 850°C por 2 hrs
OHM	Oldhamii calcinada a 1000°C por 4 hrs

FIGURA 5.9: Muestras para Fluorescencia.

5.0.3.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se realizaron pruebas de microscopía electrónica de barrido a distintas muestras de cenizas y a las dosificaciones preliminares. Se puede observar en un inicio cómo la ceniza de bambú tiene elementos de sílice; en las pruebas preliminares se llega a observar un inicio de hidratación, aunque sería bueno realizar análisis más profundos sobre puntos en específico sobre la muestra.

MUESTRAS PARA SEM	
NOMENCLATURA	SIGNIFICADO
GAM	Guadua angustifolia calcinada a 1000°C por 4 hrs
OH8	Oldhamii calcinada a 850°C por 2 hrs
OHM	Oldhamii calcinada a 1000°C por 4 hrs
RH	Cáscara de arroz
RHC	Ceniza de cáscara de arroz
PCA	Preliminar mezcla ceniza/cemento
PCV	Preliminar mezcla ceniza/cal curado vapor
PCN	Preliminar mezcla ceniza/cal curado normal

FIGURA 5.10: Muestras para SEM.

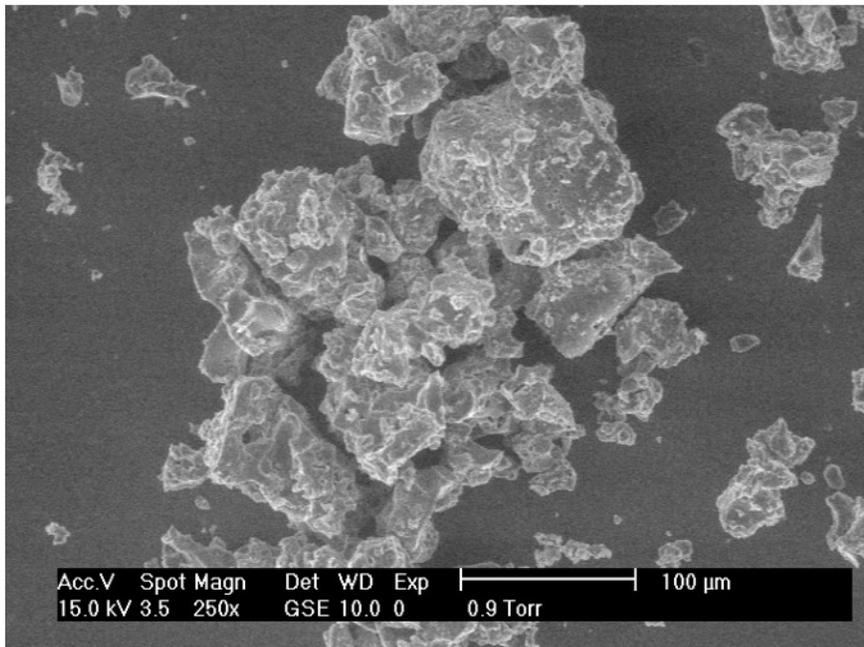
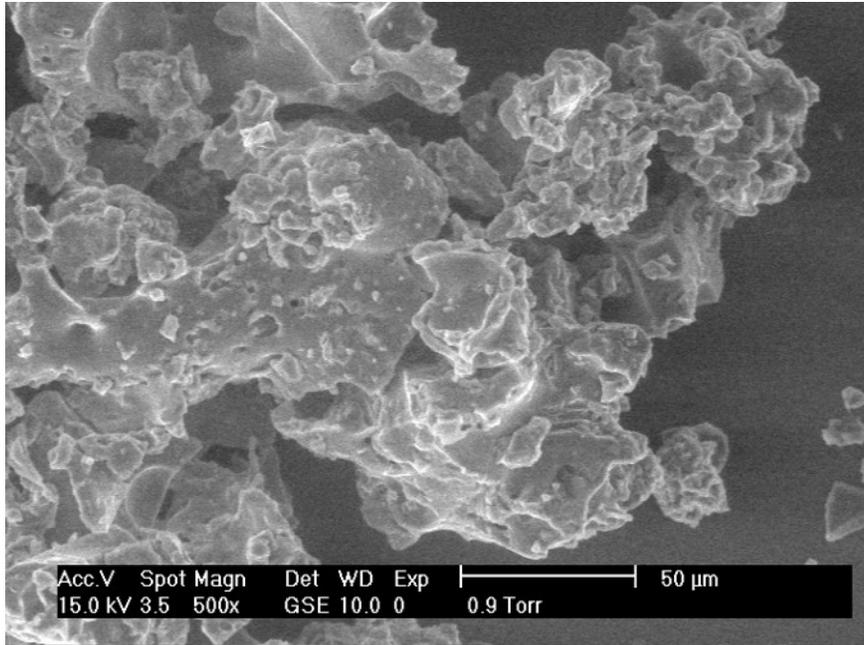


FIGURA 5.11: SEM de ceniza de bambú tipo *Guadua Angustifolia* calcinada a 1000°C por 4 horas.

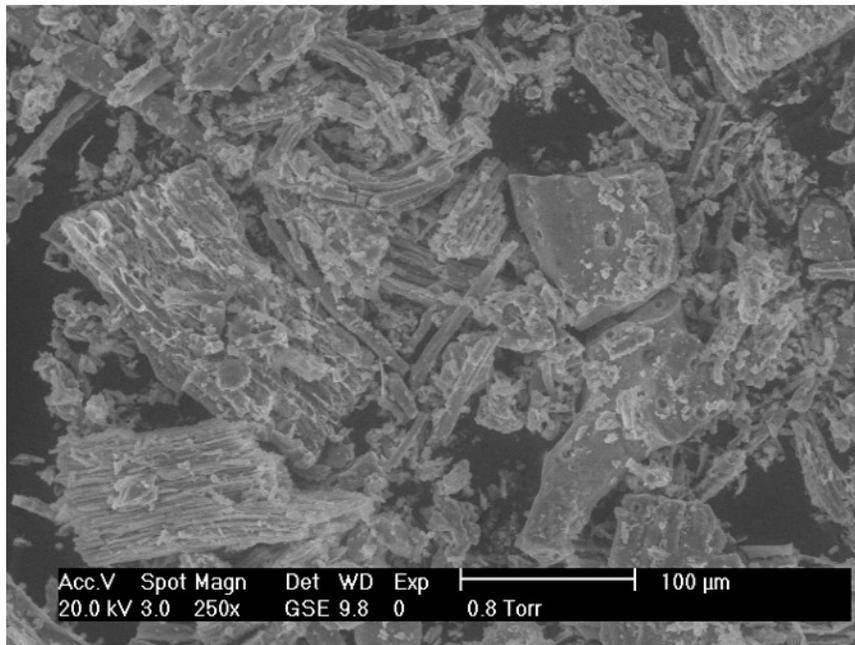
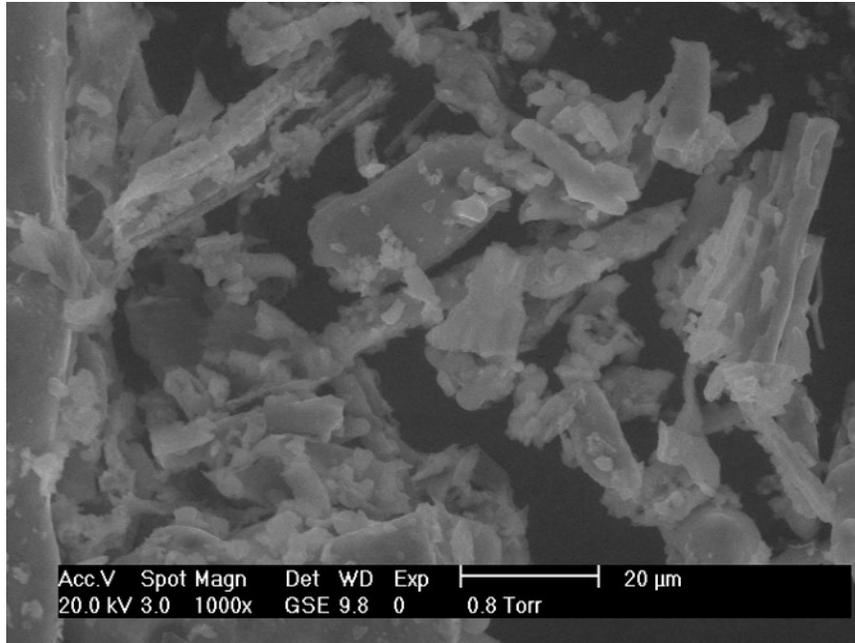


FIGURA 5.12: SEM de ceniza de bambú tipo Oldhamii calcinada a 850°C por 2 horas.

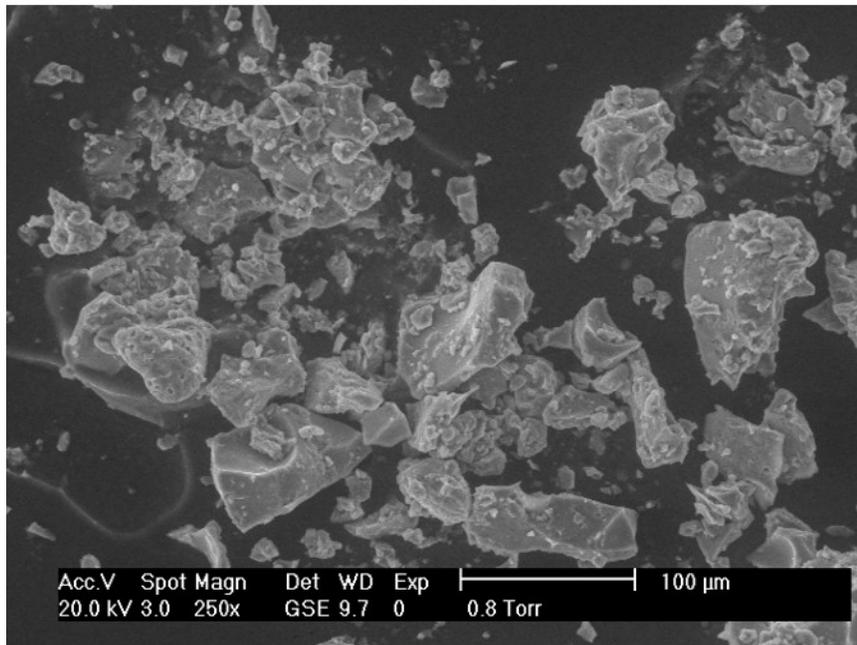
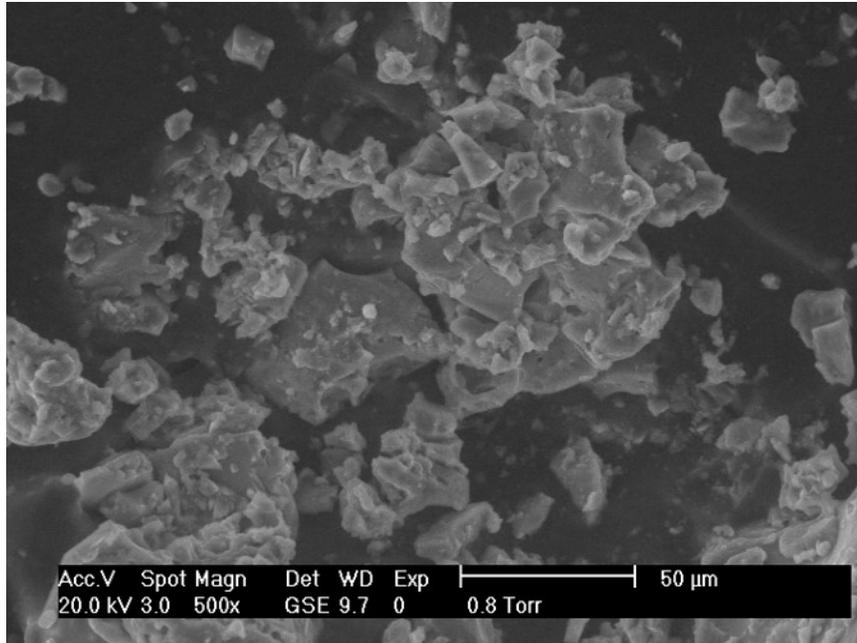


FIGURA 5.13: SEM de ceniza de bambú tipo Oldhamii calcinada a 1000°C por 4 horas.

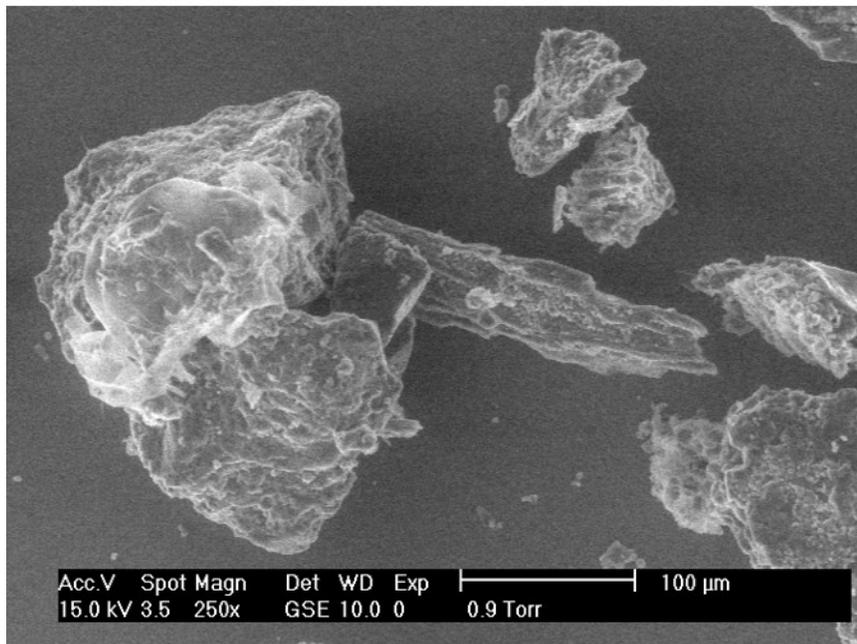
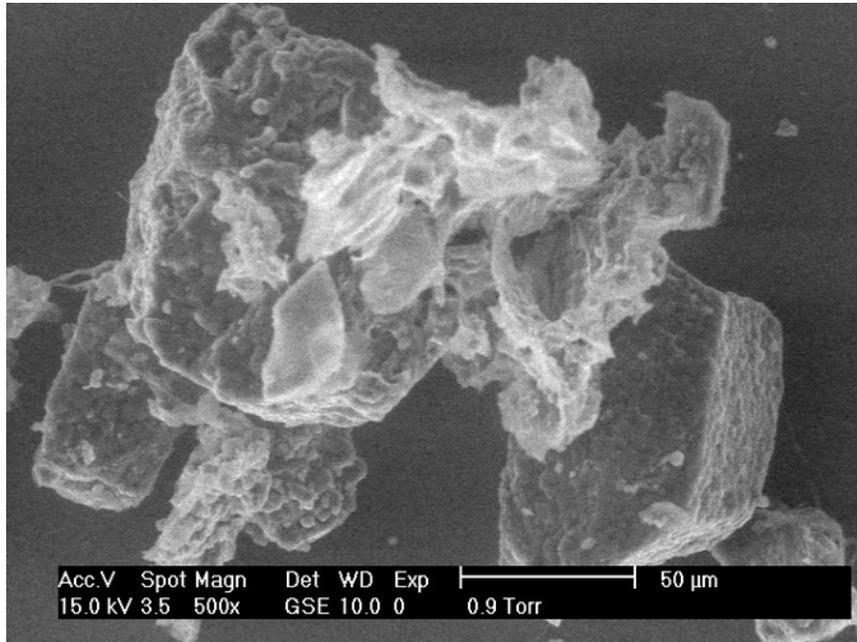


FIGURA 5.14: SEM de cáscara de arroz sin calcinación.

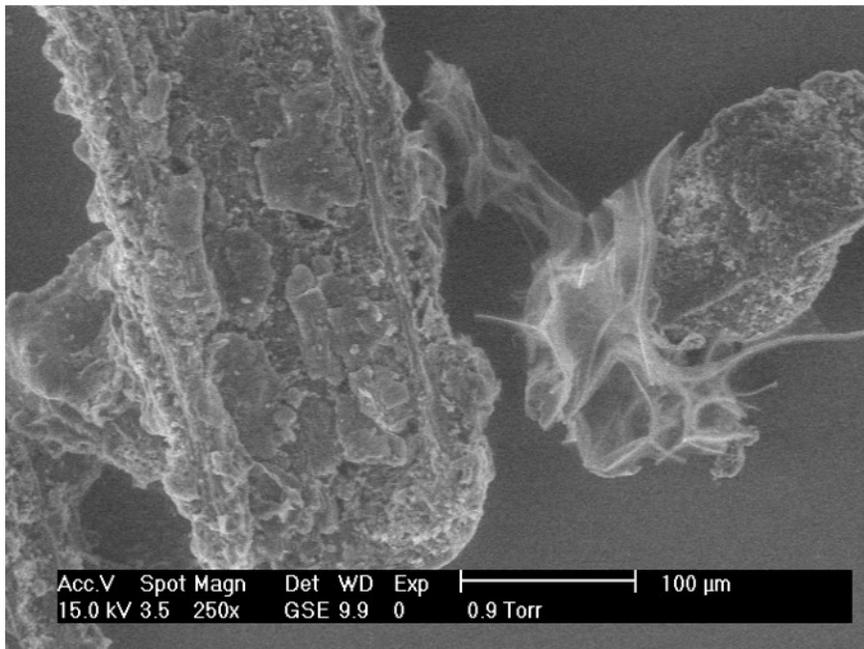
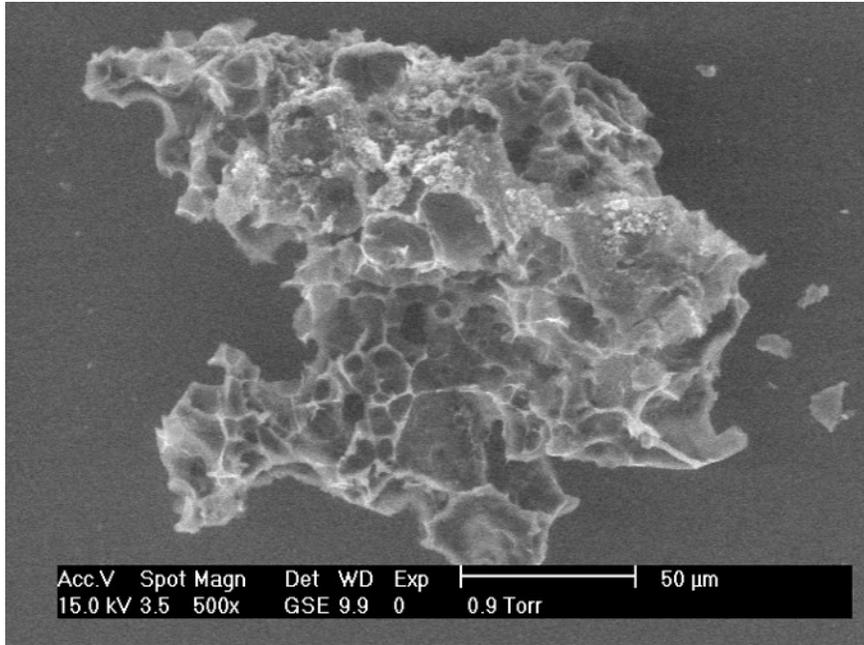


FIGURA 5.15: SEM de ceniza de cáscara de arroz.

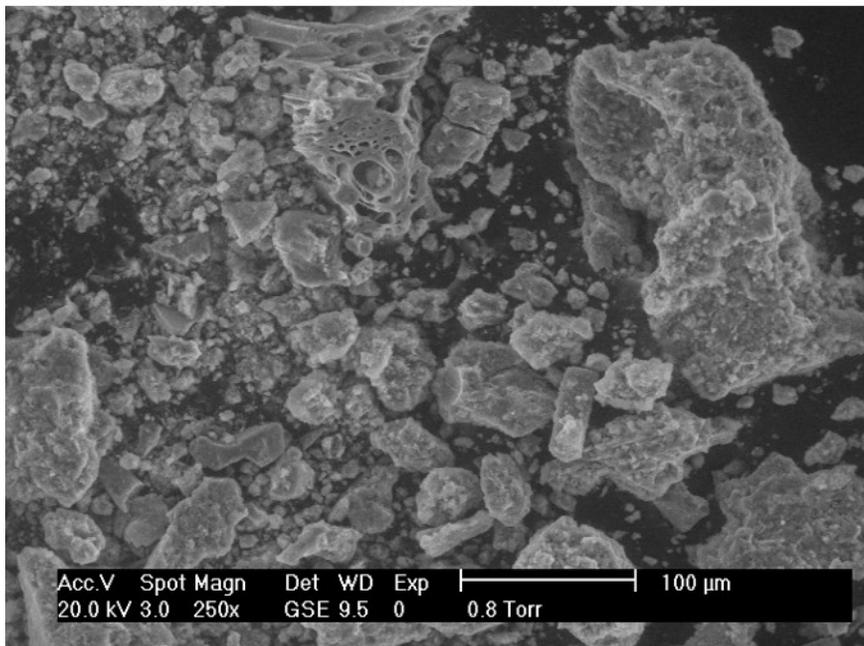
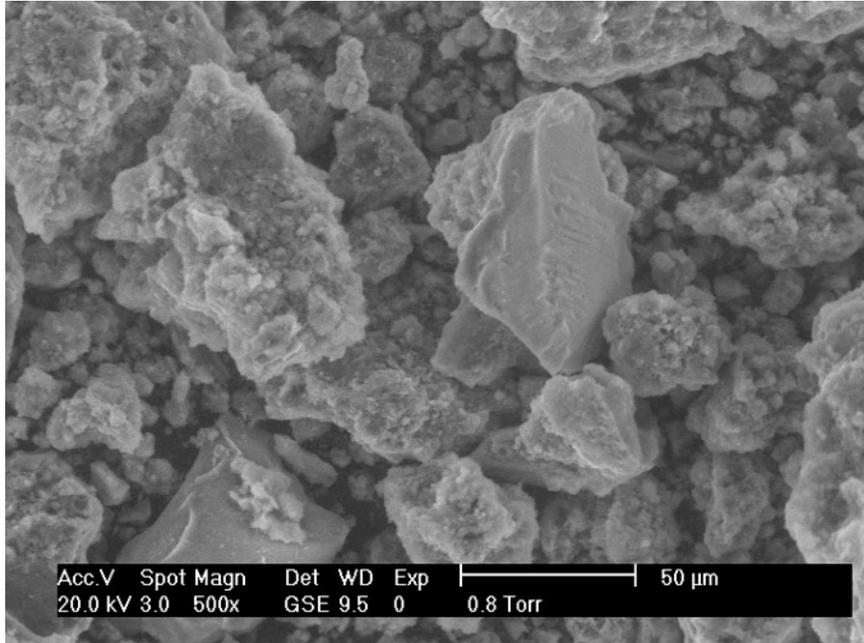


FIGURA 5.16: SEM de preliminar de mezcla ceniza/cemento.

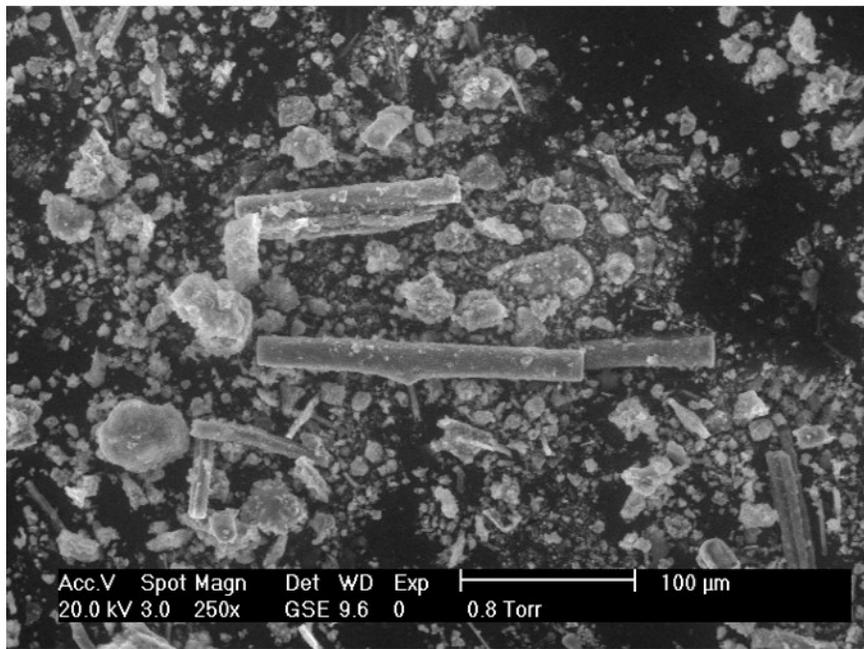
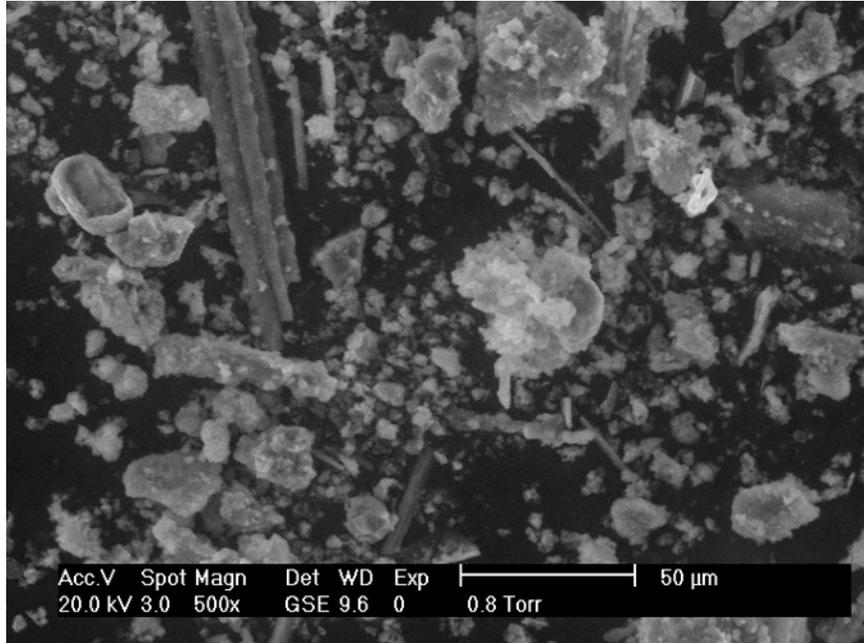


FIGURA 5.17: SEM de preliminar de mezcla ceniza/cal curado a vapor.

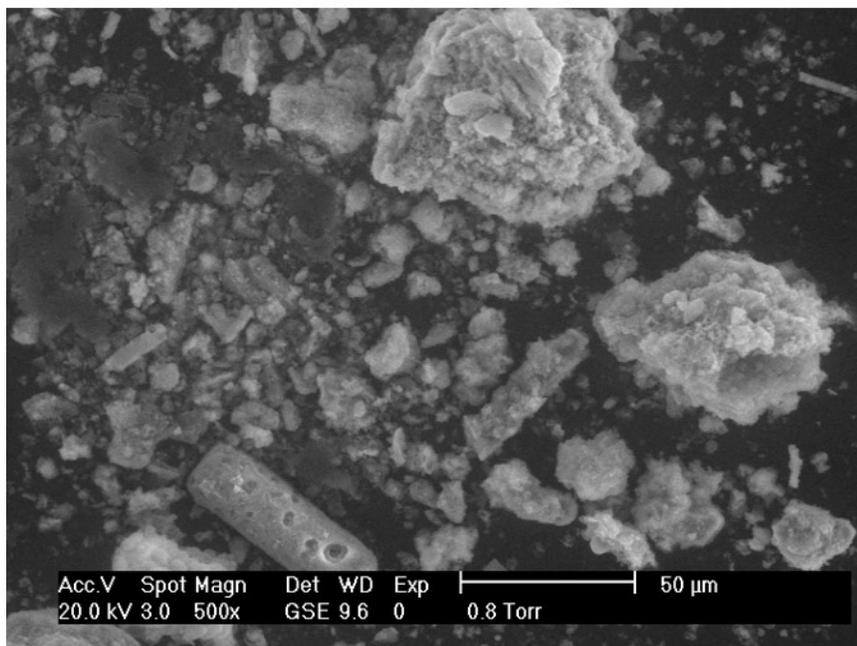
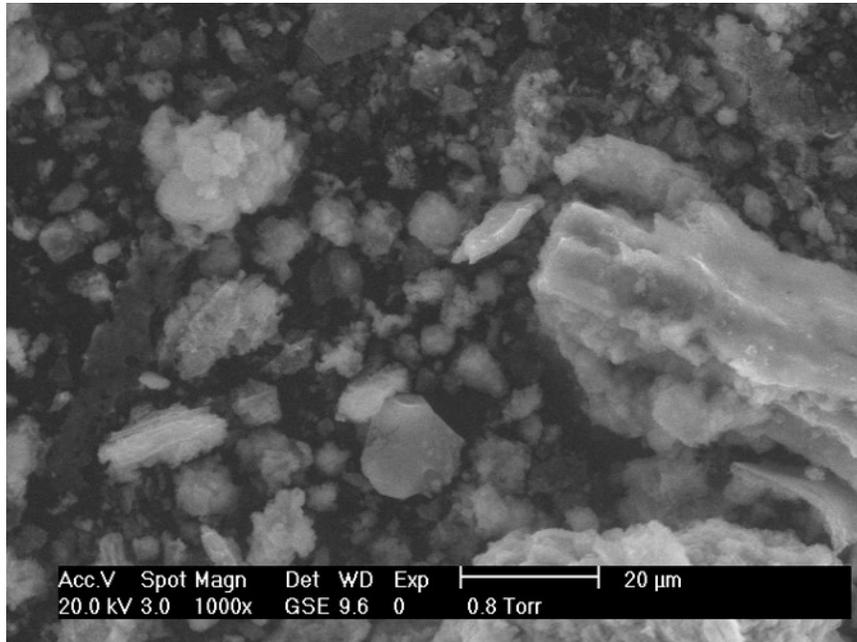


FIGURA 5.18: SEM de preliminar de mezcla ceniza/cal curado normal.

5.0.4 Resultados de prueba a compresión

5.0.4.1 Muestras preliminares

A continuación se muestran los resultados de las pruebas a compresión realizadas en las muestras preliminares. Lo que se observa es que la interacción entre la cal y la ceniza de tallo de bambú logran realizar microestructuras comparables a las mezclas realizadas con cemento, aunque no se puede llegar a notar un comportamiento más preciso; precisamente para esto se realizaron las pruebas preliminares, para poder visualizar una primera reacción de cómo funcionan en conjunto la ceniza, la cal y el cemento.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS					
TIPO	GRANULOMETRÍA	MEZCLA CON CEMENTO		MEZCLA CON CAL	
		NOM	PRUEBAS	NOM	PRUEBAS
PRELIMINARES (COMBINACIÓN)	0.075 mm	PCA1	Resistencia a 7 días	PCB1	Resistencia a 7 días
		PCA2	Resistencia a 7 días	PCB2	Resistencia a 7 días
		PCA3	Resistencia a 7 días	PCB3	Resistencia a 7 días

FIGURA 5.19: Pruebas preliminares.

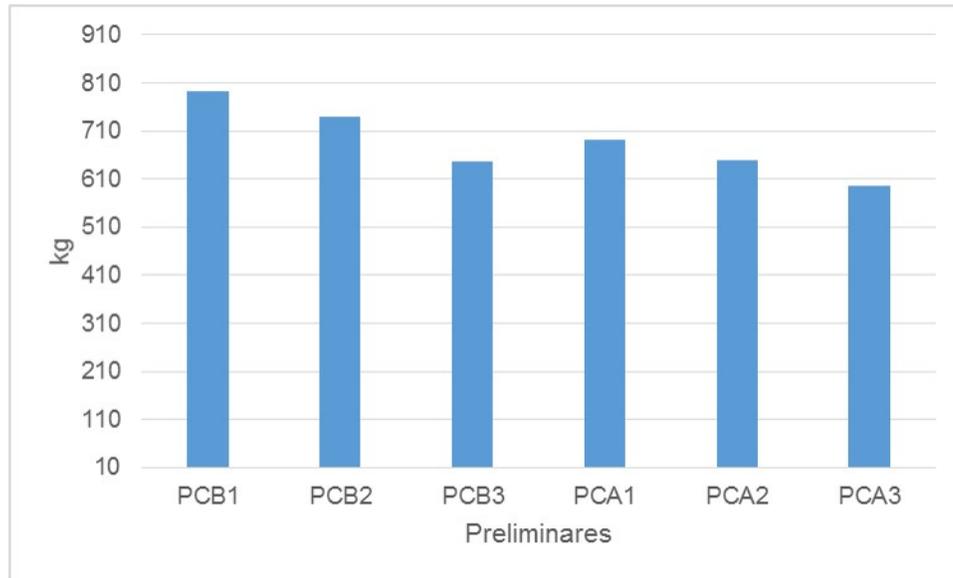


FIGURA 5.20: Gráfico con los resultados de la prueba a compresión en probetas preliminares.

5.0.4.2 Muestras con cal

Éstas muestras no pudieron ser probadas debido a la falta de dureza en los cubos, la mezcla nunca llegó a endurecerse puesto que no tenía cementante suficiente. No se realizaron muestras nuevas, solamente se probaron las que contenían cemento.

5.0.4.3 Muestras con concreto

A continuación se muestran los resultados de las pruebas a compresión sobre las mezclas propuestas utilizando diferentes tipos de cenizas: ceniza de bambú, ceniza de cáscara de arroz, cáscara de arroz y fly ash. Tomando en cuenta los resultados, se observa que las mejores resistencias se obtuvieron en la mezcla 6 y sus derivaciones. La propuesta dentro de esta mezcla fue utilizar 6% de ceniza de bambú, 14% de fly ash y 80% de cemento, con una proporción de arena 1:2. Se podría pensar que tal vez el fly ash es realmente quien está sustituyendo en su mayoría al cemento, ya que no se tuvo el tiempo para identificar si la ceniza de bambú era un elemento clave para los resultados presentados. Cabe notar que otra de las mezclas obtuvo buenos resultados, la cual constaba de un 20% de ceniza de bambú y 80% de cemento; en general se ven resultados que cargan desde 1,300 kg hasta 1,600 kg, obviamente no es un resultado aún comparable con muestras de mortero tradicional (cemento-arena-agua) pero vamos observando la posibilidad de que la ceniza tenga potencial puzolánico, aunque faltaría ahondar en las proporciones y observar las caracterizaciones químicas de las muestras.

DOSIFICACIONES							
MEZCLAS	CENIZA BAMBÚ	CENIZA CÁSCARA DE ARROZ	CÁSCARA DE ARROZ	FLY ASH	CAL	CEMENTO	ARENA
4	6%	14%	-	-	-	80%	1 : 2.00
5	6%	-	14%	-	-	80%	1 : 2.00
6	6%	-	-	14%	-	80%	1 : 2.00
7	6.67%	-	6.67%	6.67%	-	80%	1 : 2.00
8	20%	-	-	-	-	80%	1 : 2.00

FIGURA 5.21: Dosificaciones utilizadas.

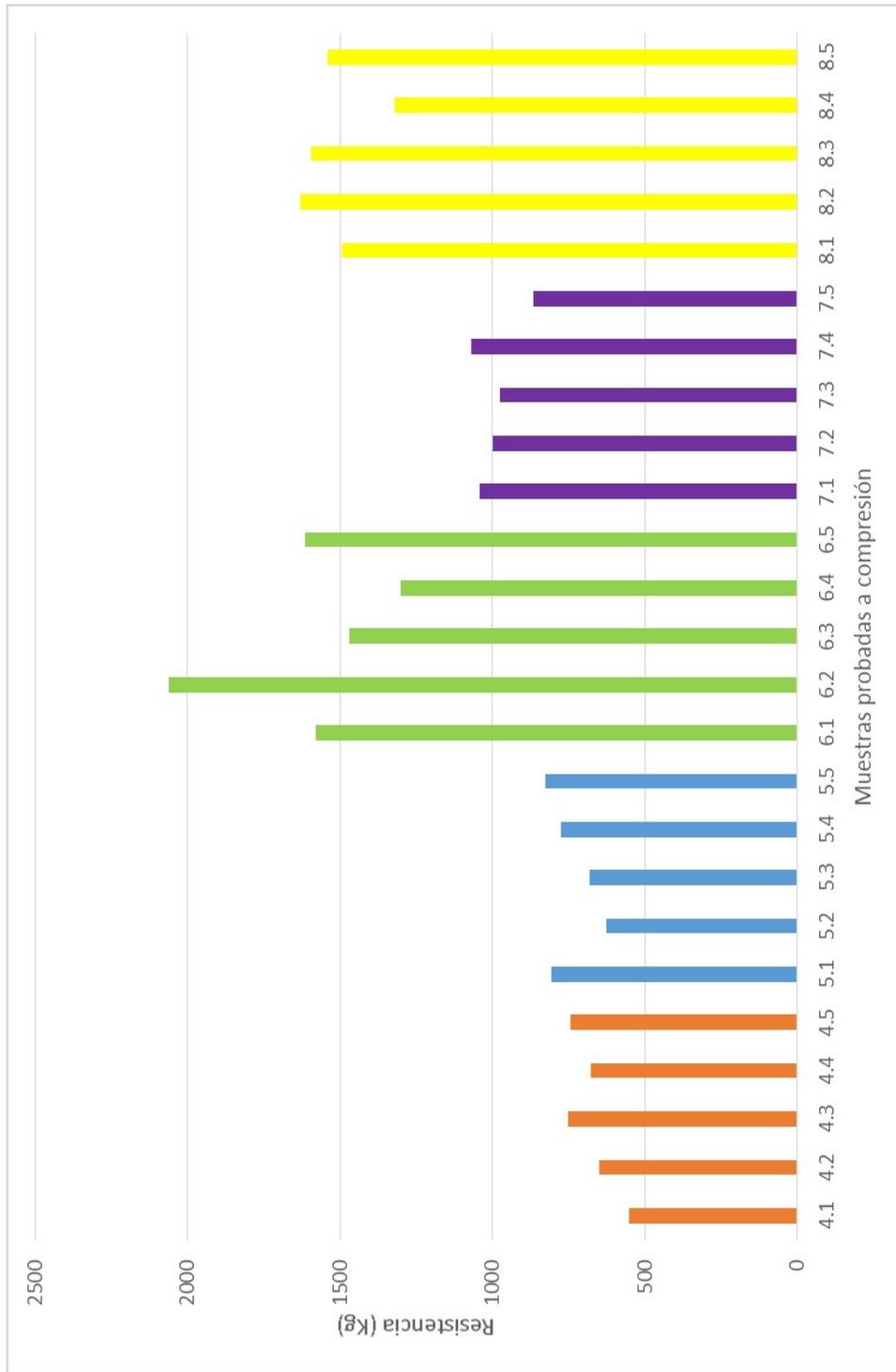


FIGURA 5.22: Gráfico con los resultados de la prueba a compresión en probetas con concreto.

6. CONCLUSIONES

El uso de puzolanas como material de sustitución de cemento es muy eficiente para modificar algunas de las propiedades esenciales de concretos y morteros, tales como la resistencia, la durabilidad y el costo que significa reemplazar al cemento por alguna puzolana.

En esta investigación se determinó la sustitución de 20% de puzolanas con cemento, ya que el estado de arte ha venido demostrando que ésta es la proporción más alta que puede presentar buenos resultados. Dentro de las proporciones se utilizaron tres puzolanas más, aparte de la ceniza de bambú, esto esperando que al unir dos o más puzolanas se obtengan mejores resultados de las pruebas a compresión. Dentro de las puzolanas utilizadas tenemos la cáscara de arroz, la ceniza de cáscara de arroz y fly ash.

Los resultados mostrados en el capítulo anterior nos muestran un indicio de lo que podría llegar a ser la ceniza de bambú con un potencial puzolánico interesante, teniendo en cuenta que dentro de sus componentes cuenta con sílice en un porcentaje de entre 20 y 30%, aunque de aluminio no llega ni a un 1%; dando material para investigaciones futuras.

El trabajo presentado en esta investigación todavía queda lejos de llegar a verdaderas conclusiones sobre la composición de la ceniza del tallo de bambú, puesto que es un material que no se había estudiado de esta manera, normalmente lo hemos visto utilizado como elemento estructural hasta pulpa para papel; aunque es bueno iniciar a buscar otras alternativas que no impacten tanto al ecosistema.

REFERENCIAS

- Almeida, F. C. R., Sales, A., Moretti, J. P., and Mendes, P. C. D. (2015). Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. *Construction and Building Materials*, 82:31–38.
- Amu, O. O. and Adetuberu, A. A. (2010). Characteristics of bamboo leaf ash stabilization on lateritic soil in highway construction. *International Journal of Engineering and Technology*, 2(4):212–219.
- Aprianti, E., Shafiqh, P., Bahri, S., and Farahani, J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes - A review. *Construction and Building Materials*, 74:176–187.
- Asha, P., Salman, A., and Kumar, R. A. (2014). Experimental Study on Concrete with Bamboo Leaf Ash. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 3(6):46–51.
- Bernal Camacho, J. M. (2009). *Durabilidad En Estructuras De Concreto Armado, Localizadas Frente a La Costa*. PhD thesis.
- Boumiz, A., Vernet, C., and Cohen Tenoudji, F. (1996). Mechanical properties of cement pastes and mortars at early ages. *Advanced Cement Based Materials*, 3(3-4):94–106.
- Douglas, E. and Pouskouleli, G. (1991). Prediction of compressive strength of mortars made with portland cement - blast-furnace slag - fly ash blends. *Cement and Concrete Research*, 21(4):523–534.
- Estévez, J. M. G. and Gutiérrez, M. P. A. (1990). *Hormigón de alta resistencia:: estado actual de conocimientos*. Ministerio de Fomento.
- Ghavami, K. (2005). Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement and Concrete Composites*, 27(6):637–649.

- González-López, J. R., Ramos-Lara, J. F., Zaldivar-Cadena, A., Chávez-Guerrero, L., Magallanes-Rivera, R. X., and Burciaga-Díaz, O. (2015). Small addition effect of agave biomass ashes in cement mortars. *Fuel Processing Technology*, 133:35–42.
- Hanehara, S., Tomosawa, F., Kobayakawa, M., and Hwang, K. (2001). Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste. *Cement and Concrete Research*, 31(1):31–39.
- Idorn, G. M. and Henriksen, K. R. (1984). State of the art for fly ash uses in concrete. *Cement and Concrete Research*, 14(4):463–470.
- Jiang, L. and Malhotra, V. (2000). Reduction in water demand of non-air-entrained concrete incorporating large volumes of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30(11):1785–1789.
- Kanning, R. C., Portella, K. F., Bragança, M. O. G. P., Bonato, M. M., and Dos Santos, J. C. M. (2014). Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 54:460–465.
- Li, D., Chen, Y., Shen, J., Su, J., and Wu, X. (2000). Influence of alkalinity on activation and microstructure of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30(6):881–886.
- Madurwar, M. V., Ralegaonkar, R. V., and Mandavgane, S. A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 38:872–878.
- Malhotra, V. and Ramezani-pour, A. (1994). *Fly Ash in concrete*. CANMET, second edi edition.
- Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. (1998). *Concrete: estructura, propiedades y materiales*. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto.

- Moraes, J., Akasaki, J., Melges, J., Monzó, J., Borrachero, M., Soriano, L., Payá, J., and Tashima, M. (2015). Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars. *Construction and Building Materials*, 94:670–677.
- Nakanishi, E. Y., Frías, M., Martínez-Ramírez, S., Santos, S. F., Rodrigues, M. S., Rodríguez, O., and Savastano, H. (2014). Characterization and properties of elephant grass ashes as supplementary cementing material in pozzolan/Ca(OH)₂ pastes. *Construction and Building Materials*, 73:391–398.
- Oner, A., Akyuz, S., and Yildiz, R. (2005). An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(6):1165–1171.
- Ravina, D. and Mehta, P. K. (1986). Properties of fresh concrete containing large amounts of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 16(2):227–238.
- Rubio Luna, G. (2007). *Arte y mañas de la guadua*. Info Art, Bogotá, Colombia.
- Salazar Jaramillo, A. (2002). *Síntesis de la Tecnología del Concreto. Una manera de entender a los Materiales Compuestos*. Corporación CONSTRUIR.
- Siddique, R. (2004). Properties of concrete incorporating high volumes of class F fly ash and san fibers. *Cement and Concrete Research*, 34(1):37–42.
- Singh, N. B., Das, S. S., Singh, N. P., and Dwivedi, V. N. (2007). Hydration of bamboo leaf ash blended Portland cement. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 14(1):69–76.
- Tangpagasit, J., Cheerarot, R., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K. (2005). Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Cement and Concrete Research*, 35(6):1145–1151.

- Torii, K. and Kawamura, M. (1994). Effects of fly ash and silica fume on the resistance of mortar to sulfuric acid and sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 24(2):361–370.
- Umoh, A. A. and Femi, O. O. (2013). Comparative evaluation of concrete properties with varying proportions of periwinkle shell and bamboo leaf ashes replacing cement. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 6(5):570–580.
- Vaibhav, V., Vijayalakshmi, U., and Roopan, S. M. (2015). Agricultural waste as a source for the production of silica nanoparticles. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 139:515–520.
- Valdez, P., Das, T., and Rivera, R. (2004). Evaluación de la velocidad de hidratación en sistemas puzolanas naturales-portlandita. *Ciencia UANL*, 7(2):190–195.
- Villar-Cociña, E., Morales, E. V., Santos, S. F., Savastano, H., and Fr??as, M. (2011). Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters. *Cement and Concrete Composites*, 33(1):68–73.
- Villar-Cociña, E., Valencia-Morales, E., González-Rodríguez, R., and Hernández-Ruíz, J. (2003). Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A kinetic-diffusive model. *Cement and Concrete Research*, 33(4):517–524.
- Yazici, S. and Arel, H. (2012). Effects of fly ash fineness on the mechanical properties of concrete. *Indian Academy of Sciences*, 37(3):389–403.