



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Construcción)

“Caracterización y actividad puzolánica de la ceniza de corteza de bambú”

Opción de titulación

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias (Construcción)

Presenta:

José Roberto López González

Dirigido por:

Dr. José Luis Reyes Araiza

Dr. José Luis Reyes Araiza
Presidente

Firma

Dr. José de Jesús Pérez Bueno
Secretario

Firma

Dr. María de la Luz Pérez Rea
Vocal

Firma

Dr. Alejandro Manzano Ramírez
Suplente

Firma

M. I. Rubén Ramírez Jiménez
Suplente

Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

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

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre, 2017

Resumen

En este proyecto se presenta el estudio e investigación de la caracterización físicas y químicas de la ceniza de la corteza del bambú, y se muestra el método científico para determinar la actividad puzolánica del material. Todo este esfuerzo en orden de apoyar a reducir la cantidad de CO_2 que produce la industria del cemento, dando una alternativa a la amplia lista de materiales sustitutos, que además echa mano del aprovechamiento de residuos agrícolas; los cuales presentan altos contenidos de sílice y/o alúmina, contenidos que los hace candidatos a ser utilizados como puzolanas. Las puzolanas son materiales que, en presencia de hidróxido de calcio y agua, producen silicatos de calcio hidratados (C-S-H) en su interacción. Dentro de las puzolanas artificiales se encuentra la clase N, estipulada en la norma ASTM C618, la cual representa a las puzolanas crudas o calcinadas. Para clasificar a la ceniza de corteza de bambú, se hace necesaria su caracterización. En este trabajo se estudiaron cuatro escenarios: 2, 4, 6 y 8 horas de calcinación constante a $600^\circ C$. El material producto de la calcinación ha sido estudiado por los métodos de Difracción de rayos X (DRX) y Fluorescencia de rayos X (FRX), para determinar su estructura mineralógica y los porcentajes de contenidos de óxidos, principalmente SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 . La actividad puzolánica se determina a través de los métodos de: Índice de Actividad Resistente (I.A.R.) y la Prueba de Frattini. Los resultados tanto de la caracterización (DRX y FRX), como de la actividad puzolánica (I.A.R. y Prueba de Frattini), son positivos, en todos los casos, ya que; la caracterización muestra una mineralogía amorfa y la suma porcentual de los tres óxidos mencionados se encuentra por arriba del 70.00%, clasificando al material como puzolana clase N y, la actividad puzolánica por I.A.R. muestra una resistencia a la compresión en cubos de mortero, con sustitución del cemento por ceniza, por encima del 75.00%, comparada con mezclas de control y, la Prueba de Frattini muestra a la ceniza de corteza de bambú, como un punto por debajo de la isoterma de solubilidad. Con estos resultados se concluye en la consecución de los objetivos, así como el cumplimiento de la hipótesis experimental. De esta manera se aporta al desarrollo científico de materiales sustitutos al cemento a través del aprovechamiento de residuos agrícolas, demostrando que dicho material cumple con las normas estipuladas, confiriéndole la clasificación de puzolana y observando una alta actividad puzolánica de éstos.

Palabras clave: Corteza de bambú, ceniza, puzolana, actividad puzolánica.

Summary

In this project, the study and investigation of the physical and chemical characterization of the bamboo cortex ash (BCA) is presented, and the scientific method to determine the pozzolanic activity of the material is shown. All this effort in order to help reduce the amount of CO_2 produced by the cement industry, giving an alternative to the extensive list of substitute materials, which also makes use of agricultural waste; which present high contents of silica and / or alumina, contents that make them candidates to be used as pozzolans. Pozzolans are materials that, in the presence of calcium hydroxide and water, produce hydrated calcium silicates (C-S-H) in their interaction. Within artificial pozzolans is class N, stipulated in ASTM C618, which represents crude or calcined pozzolans. To classify the BCA, it is necessary its characterization. In this work four scenarios were studied: 2, 4, 6 and 8 hours of constant calcination at $600^\circ C$. The calcination product has been studied by the X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (FRX) methods, to determine its mineralogical structure and the percentage of oxide contents, mainly SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 . Pozzolanic activity is determined through the methods of: Strength Activity Index (S.A.I.) and Frattini Test. The results of both the characterization (DRX and FRX), as well as the pozzolanic activity (S.A.I. and Frattini Test), are positive, in all cases, since; the characterization shows an amorphous mineralogy and the percentage sum of the three oxides mentioned is above 70.00%, classifying the material as pozzolan class N; and the pozzolanic activity by S.A.I. shows a compressive strength in mortar cubes, with replacement of cement by ash, above 75.00%, compared to control mixtures, and Frattini Test shows BCA as a point below the solubility isotherm. With these results, it is concluded in the accomplishment of the objectives, as well as the fulfillment of the experimental hypothesis. A contribution to the scientific development of substitute materials to cement through the use of agricultural residues is done, demonstrating that this material complies with the stipulated standards, conferring the classification of pozzolana and observing a high pozzolanic activity.

Keywords: Bamboo cortex, ash, pozzolana, pozzolanic activity.

DEDICATORIA

Para Ana, mi esposa.

Y para todos los que ya no están con nosotros.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento para el desarrollo de esta investigación.

A todos los miembros de la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, dirigida por el Dr. Manuel Toledano Ayala. Con mención especial al Dr. José Luis Reyes Araiza por su apoyo y asesoría, así como a los docentes de la Maestría en Ciencias (Construcción) por los cursos y atenciones recibidas.

A los compañeros de las maestrías en Construcción, Hidráulica, Estructuras y Geotécnica, con los que se ha creado un lazo estrecho, por su ayuda, buen humor y ánimos.

A la futuros M.C., Mirelle Zúñiga y Jorge Granados, por su amistad y apoyo; así como a la Dirección de Vinculación Tecnológica.

Al respaldo de parte del Dr. Mario Rodríguez, Dra. Beatriz Millán Malo y Dr. Erick Rivera Muñoz, del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la U.N.A.M. Sin ustedes esta tesis hubiera quedado inconclusa.

Especialmente a mis amigos, todos, por su cariño y apoyo.

Amorosamente, a mi familia; a mis padres, suegros, hermanos, cuñadas y cuñados; por el sustento incondicional, paciencia y aliento.

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Definición del Proyecto.....	10
1.2 Justificación e importancia.....	10
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo general.....	12
1.3.2 Objetivos particulares	13
1.4 Hipótesis.....	13
2. ANTECEDENTES	14
2.1 Bambú	14
2.1.1 México y el bambú.	14
2.2 El cemento portland y el concreto.....	16
2.3 Puzolanas.....	16
2.3.1 Puzolanas naturales.....	17
2.3.2 Puzolanas artificiales	17
2.3.2.1 Ceniza volante	17
2.3.2.2 Humo de sílice.....	18
2.3.3 Residuos agrícolas como sustitutos del cemento.....	19
2.3.3.1 Ceniza del bagazo de caña de azúcar. <i>Bagasse ash</i> (BA)	19
2.3.3.2 Ceniza de la mazorca de maíz. <i>Corn cob ash</i> (CCA).....	22
2.3.3.3 Ceniza de paja de trigo. <i>Wheat Straw Ash</i> (WSA).....	24
2.3.3.4 Ceniza de desechos de olivo. <i>Olive Waste Ash</i> (OWA).....	24
2.3.3.5 Ceniza de la cascarilla de arroz. <i>Rice husk ash</i> (RHA).....	25
2.3.3.6 Ceniza de la hoja de bambú. <i>Bamboo leaf ash</i> (BLA).....	27
2.3.4 <i>Frattini test</i>	30
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	35
3.1 Cemento portland.....	35
3.1.1 Composición química del cemento.....	36
3.1.2 Proceso de hidratación del cemento portland	38
3.1.3 Agua para mezcla.....	41
3.2 Puzolanas.....	42
3.2.1 Puzolanas clase N	42

3.3 Actividad puzolánica.....	43
3.3.1 Método de Frattini	44
3.4 Análisis físicos y químicos.....	45
3.4.1 Análisis mineralógico estructural: Difracción de rayos X.....	45
3.4.2 Composición química: Fluorescencia de rayos X.....	46
4. METODOLOGÍA.....	48
4.1 Desarrollo experimental	48
4.1.1 Obtención y secado del material	48
4.1.2 Incineración.	48
4.1.3 Molienda y tamizado.	49
4.1.4 Análisis de composición química (FRX).....	50
4.1.5 Análisis de estructura mineralógica (DRX).....	50
4.1.6 Selección del material óptimo.....	51
4.1.7 Evaluación de la resistencia a la compresión en cubos de morteros (índice de actividad de resistencia).....	51
4.1.7.1 Materiales y procedimientos presentes en las mezclas de mortero (cemento-puzolana).....	52
Cemento	52
Agregado fino.....	52
Agua	53
Mezclado	53
Fluidez.....	54
Llenado de los cubos.....	54
Curado	55
Pruebas mecánicas	55
4.1.8 Evaluación de la actividad puzolánica a través de la Prueba de Frattini.	56
5. RESULTADOS	58
5.1 Obtención y secado del material	58
5.2 Incineración.....	58
5.3 Molienda y tamizado.	60
5.4 Análisis de composición química (FRX)	61
5.5 Análisis de estructura mineralógica (DRX)	64
5.5.1 Análisis de los principales minerales.....	64

5.6 Selección de muestra óptima.....	66
5.7 Evaluación de la resistencia a la compresión en cubos de mortero (Índice de Actividad de Resistencia).	67
5.8 Evaluación de la actividad puzolánica a través de la Prueba de Frattini.	73
5.7.1 Preparación de reactivos	75
5.7.1.1 Solución de ácido clorhídrico 0.1N.....	75
5.7.1.2 Solución de hidróxido de amonio 1:1.....	75
5.7.1.3 Solución de oxalato de amonio 5%	75
5.7.1.4 Solución de ácido sulfúrico 1:1	76
5.7.1.5 Solución de permanganato de potasio 0.05	76
5.7.1.6 Solución indicadora de anaranjado de metilo y agua destilada.....	76
5.7.2 Valoración de soluciones titulantes	76
5.7.2.1 Valoración de ácido clorhídrico 0.1N	77
5.7.2.2 Valoración de permanganato de potasio 0.05N.....	77
5.7.3 Resultados de la prueba de Frattini	78
6. CONCLUSIONES.....	81
7. ANEXOS.....	84
8. BIBIOGRAFÍA	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Composición química de (BA)(Frías et al., 2007)	20
Tabla 2.2. Composición química de la ceniza de la mazorca de maíz (CCA) (Adesanya and Raheem, 2010).....	23
Tabla 2.3 Propiedades físicas y químicas del cemento portland y WSA (Biricik et al., 1999).....	24
Tabla 2.4. Composición química del cemento y OWA utilizado en el estudio (Al-Akhras et al., 2009).....	25
Tabla 2.5. Composición química de RHA(peso%)(Gonçalves and Bergmann, 2007)	27
Tabla 2.6. Composiciones de óxido (Dwivedi et al., 2006)	28
Tabla 2.7. Composición química de BLA (Villar-Cociña et al., 2011).....	29
Tabla 2.8. Cantidad y tipo de metales pesadas que se encuentran en las cenizas de bambú (mg / kg) (Liu et al., 2016).	30
Tabla 3.1 Composición química del cemento portland.	36
Tabla 3.2 Compuestos y óxidos principales en el clínker.	37
Tabla 3.3 Requerimientos químicos. (ASTM C618, 2003).....	42
Tabla 3.4 Requerimientos físicos. (ASTM C618, 2003).....	42
Tabla 4.1 Cantidad de materiales para seis cubos de mortero. (ASTM C311, 2004)	53
Tabla 4.2 Tolerancia de ensayo de muestras a compresión (ASTM C109, 2012)	56
Tabla 4.3 Muestras experimentales necesarias para prueba de Frattini	57
Tabla 5.1 Nomenclatura de muestras para incineración.....	59
Tabla 5.2 Efecto de la incineración en la masa de la corteza de bambú.	60
Tabla 5.3 Porcentajes de retenidos en el tamizado	60
Tabla 5.4 Dimensiones y peso de las muestras de BCA	63
Tabla 5.5 Resultados de análisis de composición química por FRX.....	63
Tabla 5.6 Comparación de la composición química de la muestra BCA-6 y puzolana natural.	66
Tabla 5.7 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para cubos de morteros, mezcla de control.....	71
Tabla 5.8 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para cubos de morteros, mezcla de ensayo A.	72
Tabla 5.9 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para cubos de morteros, mezcla de ensayo B.	72
Tabla 5.10 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para cubos de morteros, mezcla de sustitución con puzolana natural.	73
Tabla 5.11 Resultados de requerimientos físicos, ASTM C618.	73
Tabla 5.12 Valoración de HCl.....	77
Tabla 5.13 Valoración de $KMnO_4$	78
Tabla 5.14 Cálculo de resultados de la prueba de Frattini para BCA-6hrs	78
Tabla 5.15 Cálculo de resultados de la prueba de Frattini para PN, A y C	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Consumo energético (PJ) de la manufactura e industria de la construcción y la tendencia de emisiones (Gg de CO_2 eq.)(SEMARNAT, 2010).....	11
Figura 2.1 Ilustración del bambú: <i>Guadua Angustifolia</i>	15
Figura 2.2 Campo brillante de la muestra de ceniza de BA2, rica en óxidos de calcio (Microscopía electrónica de barrido) (Morales et al., 2009).	21
Figura 2.3 Partículas fibrosas y finas presentes en las muestras de BA (Bahurudeen et al., 2015).....	21
Figura 2.4 Apariencia del bagazo de caña de azúcar (Bahurudeen et al., 2015).....	22
Figura 2.5 Prueba de resistencia a la compresión (Oladipupo Olafusi and Olutoge Festus, 2012).	22
Figura 2.6 Prueba de tracción en concreto (Oladipupo Olafusi and Olutoge Festus, 2012).	23
Figura 2.7. Microscopía electrónica de partículas de OWA.....	25
Figura 2.8. (a) Cascarilla de arroz cruda (b) ceniza de cascarilla de arroz (Zain et al., 2011)	26
Figura 2.9. Apariencia de la hoja de bambú (Villar-Cociña et al., 2011).....	28
Figura 2.10. Apariencia de la ceniza de la hoja de bambú (Villar-Cociña et al., 2011).....	28
Figura 2.11. Morfología de la ceniza de bambú (Villar-Cociña et al., 2011).....	29
Figura 2.12 Ensayo Frattini (Sánchez de Rojas et al., 2001).....	31
Figura 2.13 Resultados de la Prueba de Frattini, 7 y 28 días (A. Tironi et al., 2012a)	32
Figura 2.14. a) Ensayo de puzolanicidad según Frattini (Guzmán et al., 2011); b) Resultados de la prueba de Frattini para SCBA1 y SCBA2, de 7 y 28 días de curado (Torres Agredo et al., 2014)	34
Figura 3.1. Morfología de la portlandita (Boumiz et al., 1996).	40
Figura 3.2 Gráfica de solubilidad de CaO en presencia de álcalis. (NTC 1512, 2003).....	45
Figura 3.3 Ejemplo de difractograma, Cuarzo (Dwivedi et al., 2006)	46
Figura 4.1 Producto de incineración de material crudo, 600°C durante 6 horas.....	49
Figura 4.2 Equipo Bruker S2 Puma.....	50
Figura 4.3 Equipo Rugaku Miniflex II.....	51
Figura 4.4 Ilustración, Cemento marca Moctezuma CPC 30R, tipo 1	52
Figura 4.5 Arena de sílice.....	53
Figura 4.6 Mesa de Flujo.....	55
Figura 4.7. Orden de apisonado en el moldeo de los especímenes de ensayo (ASTM C109, 2012).....	55
Figura 5.1 <i>Guadua angustifolia</i> en estado crudo	58
Figura 5.2 Efecto de la incineración de muestras BCA.....	59
Figura 5.3 Muestra BCA-8 después de calcinación.	61
Figura 5.4 Muestra dentro del equipo Bruker X-Flash Pusa S2.....	62
Figura 5.5 Muestras compactadas BCA-4, BCA-6, BCA-2.....	62
Figura 5.6 Prensa mecánica	62
Figura 5.7 Patrones de difracción de rayos x de ceniza de corteza de bambú para cuatro diferentes tiempos de incineración, 2, 4 6 y 8h. (C: Cristobalita, Q: Cuarzo, H: Hematita, W: Wuestita, St: Stishovita, S: SiO_2 , MC: Calcita).....	65

Figura 5.8 Comparación de difractogramas entre puzolana natural y muestra BCA-6.....	67
Figura 5.9 Moldes cúbicos	68
Figura 5.10 Materiales necesarios para la elaboración de especímenes de mortero.....	68
Figura 5.11 Materiales mezcla de mortero (control)	69
Figura 5.12 Cantidades para elaboración de mortero de ensayo (ceniza)	69
Figura 5.13 Especímenes de mortero. Mezcla de control.....	70
Figura 5.14 Especímenes de mortero. Mezcla de ensayo A (ceniza-cemento)	70
Figura 5.15 Especímenes de mortero. Mezcla de ensayo B (ceniza-cemento)	71
Figura 5.16 Curado de especímenes en agua saturada con cal.....	71
Figura 5.19 Curado en saturación de muestras combinación cemento-BCA 80-20(%) y muestras de control (cemento-100%)	74
Figura 5.20 Reactivos preparados	75
Figura 5.21 Resultados prueba de Frattini: Puzolana Natural (NP), Ceniza de corteza de bambú (BCA-6hrs), Cemento (CPC), Arena sílica (A).....	80

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Proyecto

En este proyecto se presenta el estudio e investigación de la caracterización física y química de la ceniza de la corteza del bambú, material proveniente de residuos agrícolas, y se muestra el desarrollo científico para la utilización de ésta como agente puzolánico en mezclas de mortero, así como la influencia de la sustitución parcial del cemento por ceniza de la corteza del bambú en el desarrollo de la resistencia a la compresión de dichas mezclas.

1.2 Justificación e importancia

La cultura imperante en la mecánica productiva industrial ha sido la de producir y tirar. Es decir, ha sido una sociedad de consumo y vertedero, que se ha llevado hasta los extremos, definiéndose como insostenible. Con la globalización de la economía y los medios de producción, hay quienes piensan que se puede transferir este problema a los países productores, pero es un asunto de todos; quizá de una manera inmediata para el sector en el que se produce el desecho, ya que es éste quien deben lidiar con el material generado, buscando alternativas de manejo efectivo de los desechos e incluso la exploración de aplicaciones en sectores como el farmacéutico, industrial, agrícola, entre otros. Quizás esto sea posible a corto plazo, pero la realidad se impondrá, y la cultura del reciclaje se convertirá en un método de supervivencia a nivel mundial (Aguilar, 2009)

Cierto es que la tecnología utilizada en la fabricación del clínker de cemento Portland (el más extensamente utilizado), no es accesible para ciertas regiones o países; además, en la actualidad se hace una fuerte crítica, desde el punto de vista medioambiental, al gran impacto que tiene la producción de clínker, debido a las elevadas emisiones de CO_2 que son generadas. La gran demanda de concreto (principal producto hecho con cemento) ha generado que la producción de cemento portland se incremente año tras año hasta alcanzar en la actualidad una producción mundial superior a los 3,000 millones de toneladas (SEMARNAT, 2010) ; además las previsiones indican que la producción seguirá en aumento esencialmente para el área de África y Latinoamérica.

Hoy en día, la industria que genera la mayor cantidad de polímeros inorgánicos es la del cemento portland; varios materiales crudos como el carbonato de calcio, arcillas y sílice son fundidas a temperaturas de entre 1375-1475°C, En estos procesos, sin embargo, producen una gran cantidad de CO_2 , qué, con el tamaño de la producción de la industria del cemento y del concreto, abonan a las emisiones de gases de efecto invernadero, esto sin incluir el uso de combustibles fósiles; en México ésta ocupa el 2do lugar en producción de emisiones de CO_2 (SEMARNAT, 2012)(Figura 1.1).

Ahora, como se mencionaba, 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%. Investigaciones recientes han dado con la conclusión de que algunos subproductos del sector industrial y/o agrícola tienen un alto contenido de sílice y/o de alúmina; dentro de los que se puede contar a las cenizas de bambú.

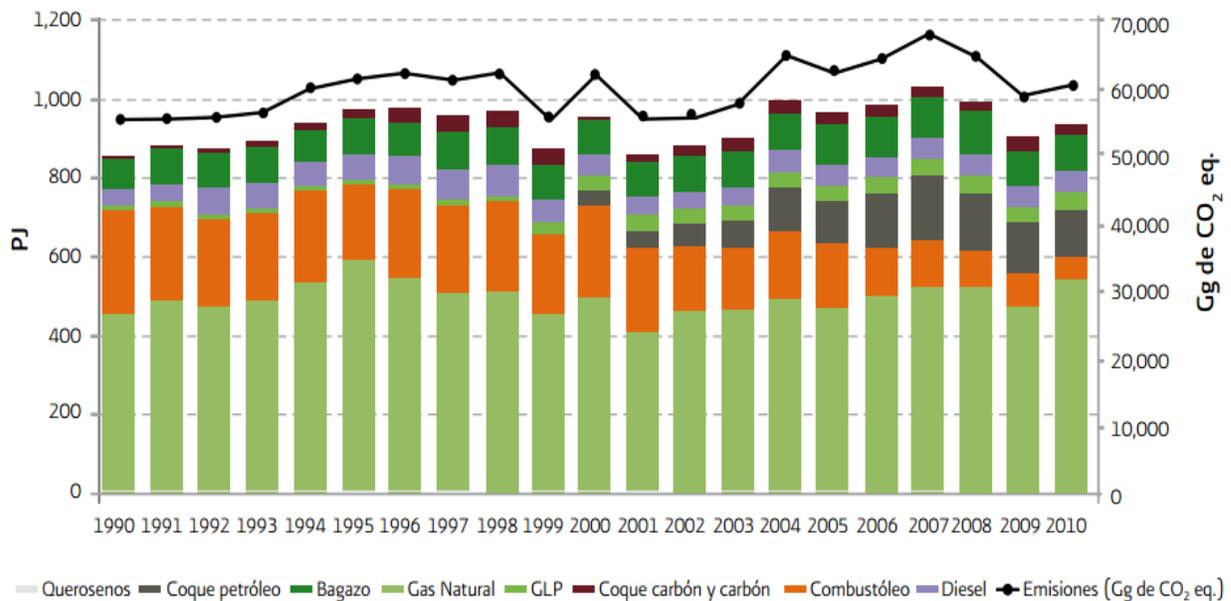


Figura 1.1 Consumo energético (PJ) de la manufactura e industria de la construcción y la tendencia de emisiones (Gg de CO₂ eq.)(SEMARNAT, 2010)

Por otra parte, la nación mexicana está sentada en una mina de oro verde (refiriéndose al bambú) que yace semi abandonada en espera de ser descubierta por dos razones contundentes: la discriminación de la planta y la falta de apoyo (Tierra Fértil, 2014).

El bambú es probablemente el de más rápido crecimiento y alto rendimiento de los recursos naturales y materiales de construcción disponibles para la humanidad. Sin embargo, el uso de bambú genera otros residuos no utilizados aún. En algunos países, significativas cantidades de bambú son procesados, lo que genera un gran volumen de residuo sólido. Brasil, por ejemplo, es el principal productor de bambú los países de América Latina y en la región de la Amazonía solo el área de cultivo de bambú está cerca de 180.000 km². En Brasil, la producción de papel solo consume alrededor de 500 kTon/año de cultivo bambú, que generan 190 kTon/año de residuos agrícolas. Estos desechos se queman a menudo en los vertederos abiertos, impactando negativamente el entorno.(Bambusetum, 2012)

El cultivo del bambú en México representa una oportunidad de negocio en seis estados del país: Tabasco, Veracruz, Chiapas, Colima, Nayarit y Puebla, aunque también hay presencia de producción en Guerrero, Oaxaca y Morelos; donde la producción de la planta deja una derrama económica de 70 mil pesos por hectárea. En general, estas entidades cuentan actualmente con más de 1,200 hectáreas destinadas a la siembra de la planta y, ya se tienen contempladas hectáreas que son susceptibles de sembrárseles bambú.

La meta es llegar a unas 30 mil hectáreas en la próxima década (Coordinadora Nacional de las Fundaciones Produce (COFUPRO), 2016).

Sin embargo, el manejo de residuos de bambú en México no se encuentra documentado; no obstante, las diferentes zonas de México donde existen o se proponen cultivo el bambú como medio de apoyo económico, suponen un desaprovechamiento de los residuos de bambú que son o podrían ser incinerados.

Además, se desconoce si en México se haya estudiado el uso potencial de este residuo aplicado a la industria de la construcción, así como se desconocen datos que indiquen la contaminación generada por la quema del bambú, en orden de poder ser comparada con la fabricación del cemento, puesto que esta investigación contempla la reutilización de ceniza ya generada, se deja la discusión sobre este tipo de contaminación para un estudio posterior a este.

De igual manera, el uso de estos materiales residuales puzolánicos supone un beneficio medioambiental doble, por un lado el sustituir parte de cemento, cuya fabricación produce emisiones de dióxido de carbono, y por otro lado el consumo de los materiales residuales de otros procesos industriales, que de no utilizarse, tendrían que almacenarse en vertederos controlados (Rosković and Bjegović, 2005)

Con esta investigación se puede aspirar a una innovación necesaria en cuestión de nuevos materiales derivados de desechos agrícolas, que sirvan como sustitutos a los tradicionales; en orden de reducir las emisiones que la producción de éstos supone; aspirando además, a generar interés de parte de los sectores de la industria del cemento, productores de concreto y cultivadores de bambú, generando una nueva industria, que tenga como objetivo el aprovechamiento de los desperdicios de esta planta, en respuesta a la creciente necesidad del sector de la construcción y sectores de prefabricados de concreto (no solamente para México, donde la producción de bambú se mantiene relativamente baja, sino también para aquellos países que cultivan esta planta en mayor cantidad) de reducir emisiones de gases de efecto invernadero, ya que este producto podría sustituir parcialmente al cemento portland, dependiendo, por supuesto, de las propiedades que ésta investigación arroje.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Caracterizar a la ceniza de la corteza del bambú, buscando, a través de análisis físicos y químicos, recabar la información necesaria para determinar si este material constituye una puzolana, clase N; de acuerdo con la norma ASTM C618.

A través de ensayos físicos y químicos, determinar la actividad puzolánica del material, corroborando con esto los resultados obtenidos de la caracterización.

1.3.2 Objetivos particulares

- a. Obtener y clasificar a la corteza del bambú, a través de pruebas físicas y químicas.
- b. Seleccionar la muestra óptima de ceniza con características de puzolana de acuerdo con la definición de la ASTM C618.
- c. Medir la actividad puzolánica del material, de acuerdo con el ensaye de Frattini.
- d. Medir el índice de actividad de resistencia del material, de acuerdo con la norma ASTM C311.
 - a. Crear probetas de mortero que integren la sustitución parcial (20%) de cemento por ceniza de la corteza del bambú.
 - b. Medir la resistencia a la compresión de cada uno de los especímenes.

1.4 Hipótesis

La ceniza de la corteza del bambú, cumple con las características físicas y químicas mínimas necesarias, de acuerdo con la norma ASTM C 618, para ser considerada como puzolana clase N y, en sustitución parcial del 20% cemento portland, incrementa la resistencia a la compresión de mezclas de mortero.

2. ANTECEDENTES

2.1 Bambú

El Bambú o guadua realmente no es un árbol, es una HIERBA o PASTO gigante, es una planta leñosa que pertenece a la familia de las gramíneas y por lo tanto a la familia del arroz, el trigo, el maíz, etc., taxonómicamente a la *Poaceae* o *Gramineae* y de la cual existen en el mundo cerca de 1.000 especies, principalmente en áreas tropicales y subtropicales, de las cuales 500 de ellas se encuentran en América.

Al bambú lo constituye un sistema de raíces fuerte y abundantes, el cual está conformado por un rizoma o caimán; es de crecimiento rápido, crece un 30% más rápido que cualquier árbol, alcanzando alturas de hasta 60 metros con diámetros que oscilan entre 10 y 30 cm, su desarrollo definitivo se logra de 3 a 6 años de haber sido sembrado, mientras que las especies leñosas pueden tardar hasta 20 años para poder ser aprovechadas. “Es una especie exigente de luz. Aunque es tolerante a suelos pesados, crece usualmente sobre suelos sueltos, profundos y bien drenados, prefiriendo proximidades de ríos y quebradas” (Teneche, 2012). El bambú genera más oxígeno comparado con las especies leñosas, debido al rizoma radial, que sirve para la retención y acumulación de agua en los suelos.

Como material en la construcción tiene una alta demanda debido a su versatilidad, siendo utilizado para la construcción de puentes, cubiertas e incluso edificación de baja altura. Es un material de resistencia a la tensión alta en relación a su peso (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 la 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 (Bambusetum, 2012).

Algunas de las especies de bambú son realmente aptas para la construcción, incluso se han llegado a implementar algunas especies para la construcción de muebles, artesanías y joyas, otras sirven como ornamentales; sin embargo, en ninguno de los casos se evidencia el aprovechamiento de su corteza para la fabricación de materia prima para el sector de la construcción o industria (Scurlock et al., 2008)

2.1.1 México y el bambú.

En México, la producción total de bambú es de 1,200 hectáreas, con miras a alcanzar las 3,000 hectáreas en la próxima década (COFUPRO, 2016).

El cultivo del bambú en México se concentra en los estados: Tabasco, Veracruz, Chiapas, Colima, Nayarit y Puebla; donde la producción de la planta deja una derrama económica de 70 mil pesos por hectárea.

El estado de Chiapas se destaca por ser el de mayor importancia, mientras que Oaxaca repunta como el estado con mayor cantidad de especies endémicas. En Veracruz, a los alrededores de Orizaba y Xalapa, se encuentra la mayor producción del bambú del país, justamente aquí es donde más se ha avanzado en el cultivo y la implementación del bambú en aspectos constructivos, principalmente con el aprovechamiento de la *Guadua*.

La *Guadua* se distingue por sus entrenudos gruesos, sus cúmulos espinosos y largos; además de contar con dimensiones que alcanzan alturas de hasta 25 metros y diámetros de entre 10 y 20 centímetros; se clasifica dentro de la familia de las *Poaceae*, subfamilia *Bambusoideae*, subtribu *Guaduinae* y género *Guadua*. El nombre genérico de *guadua* derivó del nombre vernáculo o común dado por las comunidades indígenas de Colombia y Ecuador. 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 las regiones nudosas y por las hojas de forma triangular (Figura 2.1)



Figura 2.1 Ilustración del bambú: *Guadua Angustifolia*.

Las cinco especies de *Guadua* en México son:

- *Guadua aculeta*
- *Guadua amplexifolia*
- *Guadua longifolia*
- *Guadua paniculata*
- *Guadua velutina*

Además de la *Guadua angustifolia*, introducida al país, la cual puede crecer hasta un metro por día. Su primer corte puede ser hecho entre los tres y cinco años después de plantado, requiriendo suelos sueltos, fértiles, con mediana profundidad, húmedos, pero no inundables. Los suelos derivados de aluviales son los preferidos por la especie, especialmente suelos areno-limosos y arcillo-limosos de colores amarillos o amarillo-rojizos. El promedio mínimo de precipitación anual requerido para el correcto desarrollo

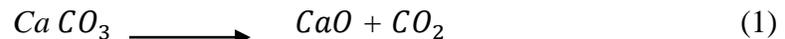
del bambú es de 1300 mm, bien distribuidos, y el promedio máximo anual es de 5000mm. El rango de temperatura óptimo oscila entre 20 y 26°C y una humedad relativa de 80% (Nieto, 1985).

2.2 El cemento portland y el concreto.

El concreto, tal como se le conoce hoy en día, es un material de construcción constituido básicamente por agregados inertes, de tamaño máximo limitado, que cumplen con ciertas características mecánicas, químicas y granulométricas, unidos por una pasta formada por un conglomerante (cemento) y agua. A esta mezcla básica pueden añadirse, en el proceso de mezclado, otros productos o materiales, para mejorar determinadas características.

Hoy en día, se considera al cemento y sus mezclas, como el rey universal de los materiales de construcción debido a sus indiscutibles ventajas: trabajabilidad y ductilidad, altas resistencias a compresión e incorporación de acero de refuerzo y monolitismo (Ma-tay Pinel, 2014).

Una razón que justifica el que este material haya alcanzado el lugar de privilegio que tiene, es que está formado por materiales abundantes y relativamente baratos, la producción de concreto a nivel mundial está por encima de las 3,000 millones de toneladas y en aumento; sin embargo, las tecnologías utilizadas en la fabricación del clínker de cemento portland han sido criticadas desde el punto de vista medioambiental, debido a las grandes emisiones de CO_2 que provoca el proceso de clinkerización, en el cual se produce la cocción del clínker, es la reacción de descarbonatación de la caliza ($CaCO_3$).



En dicha reacción, por una parte, se pierde el 44% de materia prima caliza en forma de emisiones de CO_2 directamente a la atmósfera, acompañados de otros óxidos; lo cual supone una contaminación generalizada a gran escala y un impacto medioambiental innegable, en México la producción del cemento ocupa el 2º lugar en producción de emisiones de CO_2 , solo por debajo de aquellas referentes a la generación de energía (SEMARNAT, 2010).

2.3 Puzolanas

El término puzolana está descrito en la norma ASTM C125, (2013) como “Material silíceo o silíceo-aluminoso que por sí solo posee poco o nulo valor cementante, pero que estando en forma finamente dividida y en presencia de la humedad, puede reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes”

La utilización de puzolanas y materiales cementantes en la industria del cemento y del concreto han ido cobrando importancia cada vez mayor a últimas fechas. Son varios los

beneficios conseguidos con el uso de este material, entre los que destacan las mejoras mecánicas, durabilidad y beneficios medioambientales.

La clasificación de puzolanas mayormente aceptada se muestra en la norma UNE-EN 197-1, (2011), concerniente al origen de éstas (naturales o artificiales), también especifica que las puzolanas deben estar compuestas principalmente por óxidos de silicio y óxidos de aluminio reactivos; así como pequeñas cantidades de óxido de hierro y otros óxidos.

2.3.1 Puzolanas naturales

Son mayoritariamente materiales de origen volcánico, la proyección violenta del magma en la atmósfera produce un enfriamiento rápido, proporcionándole al material un carácter vítreo.

Este tipo de puzolanas han estado siendo utilizadas desde hace más de dos mil años, ya que la civilización romana antigua fue la primera que produjo morteros hidráulicos utilizando este tipo de material. Muchas de las construcciones realizadas en aquella época perduran hasta nuestros días, poniendo de manifiesto la durabilidad de los materiales empleados.

2.3.2 Puzolanas artificiales

Las puzolanas artificiales se definen como residuos o subproductos industriales de diversos orígenes y características, que tienen como carácter principal a la actividad puzolánica. Término que incluye dos parámetros, la cantidad de cal combinada por la puzolana y la velocidad a la cual se ha consumido dicha cal. Ambos parámetros dependen de la naturaleza de las puzolanas y la calidad y calidad de sus fases activas (Amahjour, 2000).

Las puzolanas naturales más empleadas es la ceniza volante o *fly ash* y el humo de sílice, la cual proviene de la combustión del carbón y es ampliamente utilizada como adición al cemento portland. Su utilización en mezclas ha incrementado debido al que representa mejoras en las propiedades del concreto con un menor costo de producción.

2.3.2.1 Ceniza volante

Las mezclas de cemento y ceniza volante han demostrado tener varias ventajas, presentadas en las siguientes investigaciones, como:

- Idorn and Henriksen (1984), encontraron que el uso de este material, reduce la pérdida de agua de la mezcla por sangrado.
- Ravina and Mehta (1986), mediante sustitución de 35% a 50% de cemento por *fly ash*, hubo disminución de entre el cinco y siete por ciento de demanda de agua para lograr el revenimiento requerido.
- En mezclas de mortero, Douglas and Pouskouleli (1991), presentaron las primeras investigaciones sobre el efecto de la ceniza volante en mezclas de morteros, haciendo sustituciones desde un 50% hasta 100% de cemento por ceniza.

Investigación similar a la de Siddique (2004), sobre ceniza volante clase F, concluyendo que puede ser utilizada hasta una proporción de partes iguales para la elaboración de prefabricados.

- La resistencia a sulfatos de las mezclas de concreto puede aumentar debido a la continua reacción de la ceniza volante con los hidróxidos generados en el concreto, reacción que reduce la porosidad. (Torii and Kawamura, 1994)
- Li *et al.*, (2000) estudiaron la activación y la microestructura de la ceniza volante, gracias a la activación de la ceniza con hidróxido de sodio e hidróxido de calcio. Resultando en muestras con alta porosidad y bajas resistencias a la compresión.
- Jiang and Malhotra (2000) presentan en su artículo, una investigación sobre la reducción de demanda de agua en concreto con *fly ash*; reportando grandes reducciones de demanda de agua (casi hasta el 20%), además del incremento de la resistencia a la compresión de la mezcla con proporciones más altas de ceniza volante.
- Hanehara *et al.*, (2001) buscaron la influencia que tiene la temperatura de curado con el desarrollo de la reactividad puzolánica, encontrando resultados remarcables referentes a la cantidad de días necesarios para que este efecto se imponga en las mezclas.
- En mezclas de concreto, con sustitución del 15, 25, 33, 42, 50 y 58%, Oner *et al.*, (2005), manejan distintos contenidos de aguas y fueron muestreados a las edades de 28 y 180 días. Concluyendo que la ceniza volante se había estado utilizando más como un agregado fino que como un cementante.
- Shetty (2008) argumenta que, incorporando en la cantidad adecuada de puzolanas en una mezcla, se modifican ciertas propiedades de los morteros y concretos frescos y endurecidos, como:
 - Alta defensa frente a los sulfatos y cloruros.
 - Alta resistencia frente al agua de mar.
 - Aumento de la impermeabilidad, debido a la reducción de grietas en el fraguado.
 - Reducción del calor de hidratación.
 - Incremento en la resistencia a la compresión.
 - Aumento de la resistencia a la Abrasión.
 - Aumento en la durabilidad del concreto.
 - Disminuye la necesidad de agua.
- Yazici and Arel (2012), reportan que el desarrollo y velocidad de la resistencia de mezclas de mortero está relacionada al tipo de ceniza volante, cemento y sus proporciones, además de que la relación entre la resistencia de tensión y compresión comparada entre mezclas de concreto con y sin ceniza es la misma.

2.3.2.2 Humo de sílice.

El humo de sílice es un subproducto de las industrias de producción de las aleaciones de ferrosilicio. Este proceso de producción del silicio tiene lugar a temperaturas superiores a 2000°C, generando un humo que contiene micropartículas esféricas de dióxido

de silicio amorfo. Esta es la razón por la que el producto se denomina humo de sílice o, también debido a su forma y composición química, “microsílice”, y “sílice volatilizada”.

Las principales características del humo de sílice son las siguientes:

- **Finura:** El humo de sílice está formado por partículas esféricas muy finas de un tamaño que oscila entre 0.01 y 1 μm en su estado no densificado.
- **Morfología:** Las partículas tienen una morfología esférica; este hecho hace que se obtenga una buena dispersión en la matriz conglomerante, lo que mejora las características de los morteros y concretos. Contiene más de un 80% de sílice amorfa, este hecho hace que su actividad puzolánica sea muy alta, lo que tendrá influencia sobre la mejora de las resistencias mecánicas.
- **Carácter vítreo muy elevado:** En su producción en las industrias metalúrgicas, las temperaturas son muy elevadas, seguidas de un enfriamiento brusco que impide la formación de cristales.

Como adición al concreto las proporciones empleadas suelen oscilar entre el 5-10% con respecto al peso de cemento. Un exceso del humo de sílice sólo sirve como *filler*, que actúa de forma física y que suele tener una demanda de agua elevada.

2.3.3 Residuos agrícolas como sustitutos del cemento

Los también conocidos como SCM por las siglas en inglés de *Supplementary Cementitious Materials*, son considerados como una variante de puzolanas artificiales, reconocibles bajo la descripción de la clase N, mencionada en la Norma ASTM C618, (2003) como: “Puzolanas naturales crudas o calcinadas que cumplan con los requisitos aplicables para la clase tal como se dan en la presente, tales como algunas tierras de diatomeas; Tobas y cenizas o pumitas volcánicas calcinadas o no calcinadas; Y diversos materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tales como algunas arcillas y pizarras”

Son productos ricos Óxido en Sílice (SiO_2) y Aluminio (Al_2O_3), dichos materiales pueden ser utilizados potencialmente como un adsorbente de iones metálicos, lo cual no afecta el ambiente. Estos materiales tienen muchas ventajas, como: reducción de permeabilidad y ataque de sulfatos en el concreto, reducen segregación, incrementan la resistencia y durabilidad, la resistencia a las reacciones químicas de congelamiento y calor, y trabajabilidad. Existen una gran cantidad de ejemplos de este tipo de puzolanas, como:

2.3.3.1 Ceniza del bagazo de caña de azúcar. *Bagasse ash* (BA)

El bagazo de la caña es el producto de la cogeneración y combustión de la caña de azúcar. Enormes cantidades de ceniza de bagazo de caña se producen anualmente en países en vías de desarrollo como India, Tailandia, Brasil, Pakistán, Filipinas, Indonesia y Malasia (Chusilp et al., 2009; Rukzon and Chindaprasirt, 2012; Montakarntiwong et al., 2013). El proceso de producción de la ceniza del bagazo es el siguiente:

- a) Corte de caña y transporte al molino.

- b) Proceso de molienda, de donde se extrae el primer producto que terminará siendo azúcar.
- c) De la molienda se extrae el bagazo.
- d) Se pasa por un proceso de cogeneración y combustión, para la utilización del bagazo como fuente de energía
- e) La ceniza del bagazo de la caña es producida al final de la cadena industrial.

Se ha definido a éste como un prometedor material puzolánico y ha sido exitosamente utilizado como suplemento del cemento portland; tanto para concretos como para morteros. Cordeiro *et al.*, (2012) reportaron que, con una sustitución del 40% en peso de cemento por BA, disminuyó significativamente el aumento máximo de temperatura adiabática de concreto convencional.

Además, la ceniza bagazo de la caña de azúcar producida con calcinación al aire a 600°C y una velocidad de calentamiento de 10°C/min presenta sílice amorfa, una superficie amplia y un bajo contenido de carbono (Cordeiro et al., 2009). Del mismo modo, una mezcla de concreto utilizando BA no sólo reduce las emisiones de CO_2 en el mundo, sino también aumenta el valor de mercado de los materiales de desecho (Chusilp et al., 2009; Rukzon and Chindaprasirt, 2012; Montakarntiwong et al., 2013). Las pérdidas por calcinación en este material se presentan por arriba del 10%, sin embargo, no tiene un efecto perjudicial en sus propiedades como aglutinante, aun así, pérdidas por debajo del 10% proveen un excelente material puzolánico.

Tabla 2.1 Composición química de (BA)(Frías et al., 2007)

Óxidos (%)	800°C	1000°C
SiO_2	70.20	70.99
Al_2O_3	1.93	2.08
Fe_2O_3	2.09	2.25
MgO	1.95	2.01
CaO	12.20	12.44
Na_2O	0.50	0.56
K_2O	3.05	3.10
SO_3	4.10	4.25
Perdida por calcinación	1.81	0.52

Ganesan *et al.*, (2007) utilizaron mezclas que integraban, en proporciones del 5 al 30%, de sustitución en peso del cemento por ceniza de bagazo. Se extrajo BA de manera controlada a 650°C por una hora. La mezcla de control (1:3:3) se mantuvo en una relación agua cemento del 0.53 y fue preparada para especímenes cúbicos (100mm x 100mm x 100mm), encontrando que hasta un 20% del cemento portland podría ser sustituido por BA sin efectos adversos, e incluso presentando resistencias más altas en los primeros días, reducción en la permeabilidad y apreciable resistencia a la permeabilidad y difusión de cloruros, todo esto abonando a la durabilidad del concreto reforzado.

Frías *et al.*, (2007) y Morales *et al.*, (2009)(Figura 2.2) plantean diferentes escenarios de calcinación del bagazo, aplicando temperaturas de entre 800 y 1000°C, utilizando microscopios electrónicos de barrido (fig. 2.2) y difracción de rayos X, apreciaron que la morfología de este material cambia en presencia de sílice y aluminio (Tabla 2.1), concluyendo que la temperatura tiene una influencia directa con la reactividad puzolánica, ya que no solamente cambia la morfología sino también la mineralogía del material.

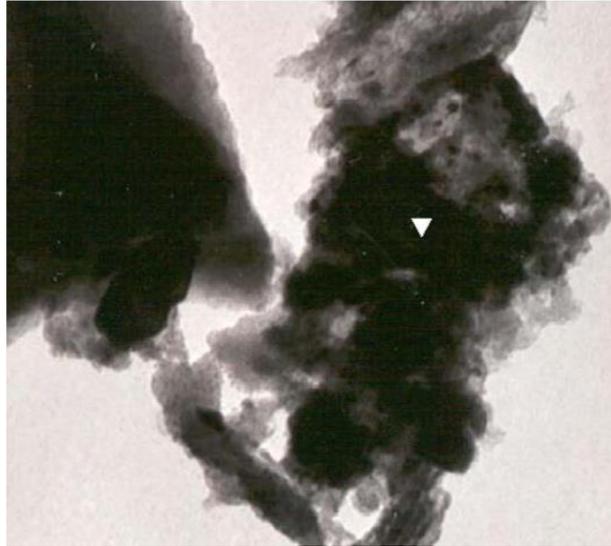


Figura 2.2 Campo brillante de la muestra de ceniza de BA2, rica en óxidos de calcio (Microscopía electrónica de barrido) (Morales et al., 2009).

El esfuerzo a compresión óptimo fue obtenido por el espécimen con proporción de 20% del peso del cemento a 28 días y 90 días. Rukzon and Chindaprasirt, (2012) reportaron un esfuerzo de 68.6 MPa a 28 días.

Se puede concluir que las partículas de BA son más pequeñas que las de cemento portland, por ello el agua necesaria para la mezcla incrementa, al mismo tiempo que la superficie de reacción; acelerando el proceso de fraguado, debido a su alto contenido de sílice y alúmina.



Figura 2.3 Partículas fibrosas y finas presentes en las muestras de BA (Bahurudeen et al., 2015)

Bahurudeen *et al.*, (2015) reportó nueva metodología, en la cual la parte fibrosa del bagazo de caña fue retirada, encontrando mejores resultados de actividad puzolánica (fig. 2.3-2.4).



Figura 2.4 Apariencia del bagazo de caña de azúcar (Bahurudeen et al., 2015)

2.3.3.2 Ceniza de la mazorca de maíz. *Corn cob ash (CCA)*

Es el desecho más fino derivado de la combustión del maíz y el elote. Para el año 2000, la producción mundial se estimó de 589 millones de toneladas de grano de maíz en 139 millones de hectáreas (FAO, 2014).

Estudios previos (Adesanya, 1996; Adesanya and Raheem, 2009a, 2010) observaron que la ceniza de la mazorca del maíz contiene un 65% de sílice y combinaciones de óxido de aluminio y óxido de sílice en un rango del 70%-75% (Tabla 2.2). Mostrando que la CCA puede ser utilizada como SCM en el concreto, con la sustitución de cemento portland en proporciones de 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 15%, 20% y 25%, observando incremento en el tiempo de fraguado; mayor que las mezclas de control.



Figura 2.5 Prueba de resistencia a la compresión (Oladipupo Olafusi and Olutoge Festus, 2012).

Por lo tanto, este material reduce el calor por hidratación del concreto. Más aun, éstos autores llevaron a cabo más pruebas en morteros, evaluando la trabajabilidad y la

resistencia a la compresión en concretos (Adesanya and Raheem, 2009b), con una relación agua cemento de entre 0.5 y 0.7. y proporciones de 1:11/2:3:4 y 1:3:6, respectivamente.

Concluyendo que la resistencia a la compresión de mezclas de concreto-CCA está por debajo de lo común en los primeros días, pero incrementa significativamente, con una mezcla optima de sustitución de CCA en 8%.

Por último Oladipupo Olafusi and Olutoge Festus, (2012) corrieron pruebas en probetas cúbicas (150mm x 150mm x 150mm) y cilíndricas de concreto (100mm (diámetro) y 200mm) para estimar la resistencia a la compresión y tracción (fig.5-6), respectivamente, en mezclas de concreto con sustitución parcial del 0% (control), 10% y 20%.

Exponiendo como resultados que los concretos que integran CCA no alcanzan su resistencia de diseño a 28 días.



Figura 2.6 Prueba de tracción en concreto (Oladipupo Olafusi and Olutoge Festus, 2012).

Tabla 2.2. Composición química de la ceniza de la mazorca de maíz (CCA) (Adesanya and Raheem, 2010)

Compuestos	Porcentaje de composición (%)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
SiO_2	67.33	65.39	66.41	66.38
Al_2O_3	7.34	9.14	5.97	7.48
Fe_2O_3	3.74	5.61	3.97	4.44
CaO	10.29	12.89	11.53	11.57
MgO	1.82	2.33	2.02	2.06
SO_3	1.11	1.10	1.01	1.07
Na_2O	0.39	0.48	0.36	0.41
K_2O	4.20	4.92	5.64	4.92
Total				
$SiO_2+Al_2O_3$	74.97	74.53	72.38	73.86

2.3.3.3 Ceniza de paja de trigo. *Wheat Straw Ash (WSA)*.

La ceniza de la paja del trigo se ha estudiado como material puzolánico; Steenari and Lindqvist, (1998) hacen un primer acercamiento al material en combinación con aditivos como caolinita y dolomita, y observan las reacciones que estas combinaciones tienen a altas temperaturas, descubriendo la formación de óxidos y silicatos en temperaturas arriba de 800°C, concluyendo que el contenido de sílice en la WSA es del 73% y encontrando propiedades puzolánicas en aquellas mezclas calcinadas a 670°C, mientras proponen una etapa de preliminar de quemado.

Con estos resultados Biricik *et al.*, (2000)(Tabla 2.3) y Al-Akhras and Abu-Alfoul, (2002) investigan en mezclas de mortero resistentes a sulfatos y morteros de autoclave, respectivamente, de ahí se desprende el conocimiento de que un enfriamiento rápido de la muestra después de calcinada, se traduce en una mejor actividad puzolánica del material; proponen pruebas de resistencia a compresión y flexión, y concluyen que el reemplazo de cemento por la WSA beneficia a la resistencia a la compresión de morteros en solución al ataque de sulfatos, mientras que a flexión las muestras no son satisfactorias.

Tabla 2.3 Propiedades físicas y químicas del cemento portland y WSA (Biricik et al., 1999).

Propiedades químicas (%)	Cemento portland	WSA
SiO_2 , soluble	20.60	54.24
SiO_2 , no soluble	0.38	29.56
Al_2O_3	6.14	4.55
Fe_2O_3	3.72	1.05
CaO	63.65	12.54
MgO	1.29	2.39
SO_3	2.55	1.49
Pérdida por calcinación	1.42	7.22

2.3.3.4 Ceniza de desechos de olivo. *Olive Waste Ash (OWA)*.

Muy de la mano de las investigaciones hechas sobre la ceniza de la paja de trigo, Arvelakis *et al.*, (2002) toma una combinación de ésta y el residuo del olivo, para evaluar su comportamiento en condiciones de combustión, como una alternativa de conversión de residuos agrícolas, ofreciendo una medida económica y con beneficios ambientales. Más aún, Al-Akhras *et al.*, (2009) ahonda en el tema, proponiendo a los desechos del olivo (OWA) (Tabla 2.4) como SCM y evalúa el comportamiento de concretos, que integren a este material, expuestos a altas temperaturas (Figura 2.7). En su experimentación expone mezclas con proporción de sustitución del 0, 7,15 y 22%, una relación agua cemento de 0.5 Y 0.7, con y sin contenido de aire. Sus resultados mostraron un incremento en la resistencia del concreto a altas temperaturas, comparadas con la resistencia residual a la compresión de

muestras de control de concreto simple. En sustitucion de 0% a 22% incrementó del 52% al 71% a 400°C y de 23% a 43% a 600°C. Demostrando así, que la inclusion de OWA a mezclas de concreto reducen grietas y deterioro debidas a altas temperaturas que, facilmente, pueden producirse por incendios accidentales.

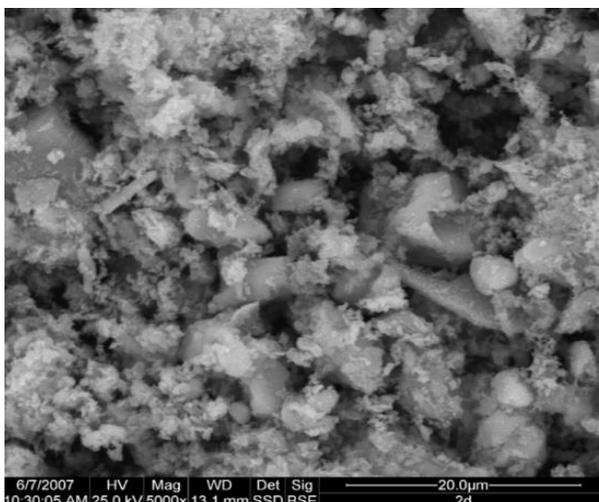


Figura 2.7. Microscopía electrónica de partículas de OWA.

Tabla 2.4. Composición química del cemento y OWA utilizado en el estudio (Al-Akhras et al., 2009).

Compuesto (%)	Cemento	OWA
SiO_2	20.5	25.3
Al_2O_3	5.6	7.4
Fe_2O_3	3.8	4.6
CaO	64.5	42.4
SO_3	2.1	3.7
Pérdida por calcinación	0.80	9.5

2.3.3.5 Ceniza de la cascarilla de arroz. *Rice husk ash (RHA)*.

La cascarilla se forma en la etapa del crecimiento del arroz, formado una piel alrededor del grano. No tiene interés comercial después del proceso de producción. La industria del arroz es de las más importantes en ciertos países como China, India, Indonesia, Malasia y Bangladesh. Hacia el final del 2013, la producción de arroz alcanzó los 742 millones de toneladas, cantidad que incrementa año con año (FAO, 2013), de las cuales más del 20% es cascarilla. La baja densidad de este residuo es una ventaja (Khan et al., 2012); por ejemplo: países con basta producción de arroz, han aprovechado este residuo para contrarrestar los problemas de vertederos, dado que éste puede abarcar grandes extensiones de terreno. Una enorme cantidad de ceniza de cascarilla de arroz (RHA) se produce globalmente, estimada en 7.5 millones al año, con una tasa de crecimiento del

1.1% anualmente (FAO, 2013). Sin embargo, la conversión de este desecho como material par a la industria de la construcción ha traído un impacto positivo al medio ambiente al mismo tiempo que para la sociedad, reduciendo la contaminación de suelos y aire.



(a)



(b)

Figura 2.8. (a) Cascarilla de arroz cruda (b) ceniza de cascarilla de arroz (Zain et al., 2011)

RHA es un producto orgánico, derivado del proceso industrial del arroz, que a través de la calcinación puede adquirir propiedades puzolánicas. El color de la RHA puede ir del gris al negro, dependiendo de la materia prima, el método de incineración, tiempo y temperatura de calcinación. RHA, pasada por temperaturas de 600°C- 800°C, mostró contenidos de sílice amorfa de entre el 85% y 90% (Gonçalves and Bergmann, 2007; Rodríguez De Sensale, 2010; Zain et al., 2011). Visto físicamente, RHA es una masa bastante rugosa después de la molienda (Figura 2.8, a.b) que depende de los distintos tipos

de arroz, la composición del suelo, el año de cosecha, temperatura de combustión, método de enfriado y condiciones geográficas.

Las partículas del RHA tienen un tamaño promedio de 5 a 10 micrones (Rodríguez De Sensale, 2010), en la Tabla 2.5 se muestran las propiedades físicas y químicas de este material, mismas que corresponden a las necesarias para ser considerada como puzolana (Papadakis, 2000; Papadakis et al., 2002a; Papadakis et al., 2002b), como está asentado en la Norma ASTM C618 (2003), definidas como silicatos o aluminosilicatos, que poseen poco o nulo valor cementante, pero en presencia del hidróxido de calcio compone materiales que reacciona con propiedades de ésta índole.

Tabla 2.5. Composición química de RHA(peso%)(Gonçalves and Bergmann, 2007)

Muestras	A	B	C
SiO_2	90.55	80.85	89.43
Al_2O_3	1.03	0.09	0.37
P_2O_5 *	0.33	0.44	0.44
SO_3	0.16	0.06	0.06
K_2O	0.94	0.35	0.35
CaO	1.32	0.33	0.33
Cr_2O_3 *	0.03	0.02	0.01
MnO	0.01	0.06	0.07
Fe_2O_3	0.08	0.06	0.08
Cl*	-	0.02	0.07
C	5.15	17.57	8.15

*Componentes volátiles

La cantidad de dióxido de silicio (SiO_2), óxido de hierro (Fe_2O_3) y óxido de aluminio (Al_2O_3) en la ceniza no debe estar por debajo de 70% y la pérdida por ignición debe de ser de hasta 12% (ASTM C618, 2003).

2.3.3.6 Ceniza de la hoja de bambú. *Bamboo leaf ash (BLA)*.

El bambú es un producto natural que se regenera, si es manejada correctamente por agricultores; aunque se cree que el bambú es un árbol, en realidad es pasto gigante que proviene de la familia *Poaceae*, la cual tiene características parecidas a la madera (Agarwal et al., 2014; Farrelly, 1984). El bambú obtiene su madurez en 3 años, comparándolo con la madera, la cual toma 20 años aproximadamente (Abdul Khalil et al., 2012; Waite 2009), por esta y varias propiedades más, el bambú se ha convertido en la fuente más viable para la construcción sustentable. Quizá, el bambú sea uno de los recursos naturales de mayor rendimiento y de crecimiento más rápido.

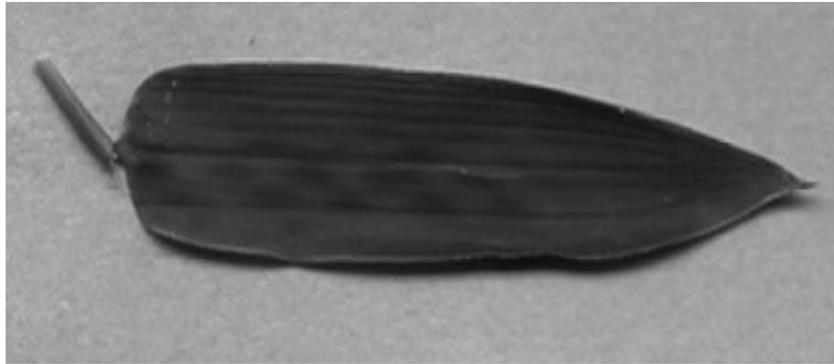


Figura 2.9. Apariencia de la hoja de bambú (Villar-Cociña et al., 2011).



Figura 2.10. Apariencia de la ceniza de la hoja de bambú (Villar-Cociña et al., 2011)

En su artículo Dwivedi *et al.*, (2006)(fig. 9-10), como su nombre lo indica “*A new pozzolanic material for cement industry: Bamboo*”; se presenta por primera vez un acercamiento a la utilización de este material con potencial puzolánico (Tabla 2.6) y, al igual que Singh *et al.*, (2007), investiga el proceso de hidratación de la ceniza de la hoja del bambú como aglutinante, con una proporción óptima del 20% de sustitución por peso de cemento, lo cual lo hace equiparable al cemento portland.

Tabla 2.6. Composiciones de óxido (Dwivedi et al., 2006)

Composicion (%)	Cemento	BLA
SiO_2	21.40	75.9
Al_2O_3	5.03	4.13
Fe_2O_3	4.40	1.22
MgO	1.35	1.85
CaO	61.14	7.47
Na_2O	0.24	0.21
K_2O	0.48	5.62
SO_3	2.53	-
Perdida por calcinación	1.29	-

La composición química de la ceniza (Figura 2. 11) de la hoja de bambú fue estudiada por primera vez en 2011 por Villar-Cociña *et al.*, (2011)(Tabla 2.7) encontrando que prácticamente se comprende por sílice en concentraciones de alrededor de 80%, para calcinaciones de hoja de bambú a 600°C por dos horas, proponiendo un modelo difuso para describir la reacción puzolánica del material con hidroxilo de calcio.

Tabla 2.7. Composición química de BLA (Villar-Cociña et al., 2011)

Composición química	Óxidos (%)
SiO_2	80.4
Al_2O_3	1.22
Fe_2O_3	0.71
MgO	0.99
CaO	5.06
Na_2O	0.08
K_2O	1.33
SO_3	1.07
P_2O_5	0.56
MnO	0.20
ZnO	0.07
Pérdida por calcinación	8.04

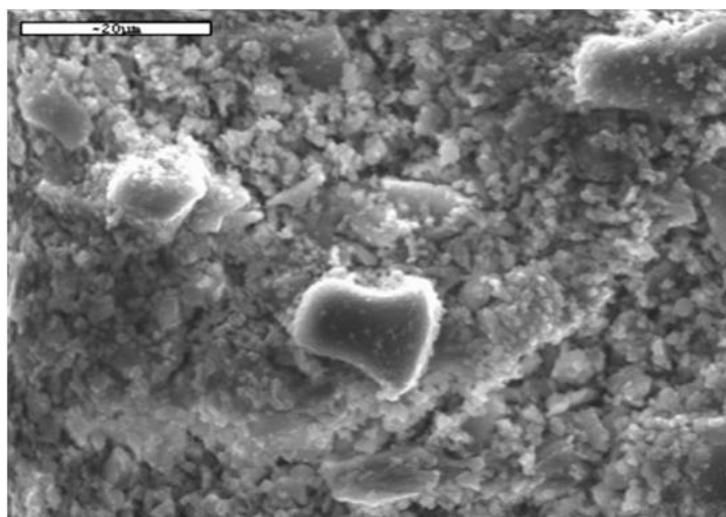


Figura 2.11. Morfología de la ceniza de bambú (Villar-Cociña et al., 2011).

Frías *et al.*, (2012) toman la metodología del autor anterior y utilizando diferentes técnicas (FRX, DRX, microscopio electrónico de barrido, entre otras) analizan el comportamiento puzolánico del material en mezclas aglutinantes con cemento portland, concluyendo con la alta actividad puzolánica de este material. Posteriormente Asha *et al.*, (2014) y Dhinakaran and Chandana, (2016) integran las metodologías de calcinación y caracterización del material expuestas, en mezclas de concreto que integran distintos porcentajes de sustitución de cemento portland, encontrando una reducción en la resistencia

a la compresión de mezclas de concreto a medida del aumento en la sustitución parcial del material, aunque los contenidos de sílice son los adecuados. Sin embargo, aun cuando esta reducción se mantiene en el orden del 10% por debajo de la resistencia a compresión en mezclas de control, las características de durabilidad y resistencia a cloruros y ácidos incrementan en un 10%.

En 2015 Roselló *et al.*, realizan la microscopía la ceniza hojas del bambú y de la ceniza de las hojas del vástago de la caña; resultando en una diferenciación en el contenido de sílice entre ambas (alto contenido para hoja de bambú y viceversa), observando distintos tipos de fitolitos (células específicas, reservas de sílice en plantas), éstas células mantienen su formas después de la calcinación a altas temperaturas de entre 250 y 850°C.

Muy parecido a estos resultados, fueron los encontrados por Liu *et al.*, (2016) en el análisis de la combustión del bambú, en dicha investigación se separa al material en capas (corteza, capa central, capa interior y hojas), encontrando dos picos en el proceso de combustión; el primero correspondiente a la quema de materia volátil y el segundo correspondiente a la calcinación de “*biochar*”. Haciendo una comparación se establece que tanto la corteza como la hoja del bambú tienen un bajo potencial combustible, lo cual nos indica que estas partes es donde se encuentran las mayores concentraciones de compuestos como los óxidos de sílice, potasio y magnesio (Tabla 2.8).

Tabla 2.8. Cantidad y tipo de metales pesadas que se encuentran en las cenizas de bambú (mg / kg) (Liu et al., 2016).

COMBUSTIBLES	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fi	Zn
Corteza	233.6	264.6	29.6	450.5	1224.0	579.7	3.1	111.8	233.6
Capa central	195.8	195.7	22.7	82.8	3103.0	421.7	2.2	73.5	195.8
Capa interior	234.3	208.8	33.2	94.0	2539.9	974.6	2.1	121.2	234.3
Hojas	429.7	923.8	324.2	784.5	9761.6	2525.1	27.1	681.6	429.7

2.3.4 Frattini test

Este método de caracterización, en el cuál se determina la actividad puzolánica del material en potencia; ha sido, mayormente, empleado en investigaciones acerca de materiales inertes, cristalinos e inorgánicos; en casos como:

- Arcillas cocidas

Sánchez de Rojas *et al.*, (2001) plantean el reaprovechamiento de residuos cerámicos (ladrillos, tejas, bovedillas, blocks, etc.), a través de la trituración y molienda, como materiales puzolánicos. Para determinar la puzolanicidad de éstos, utilizan el método de prueba de Frattini, en especímenes de mortero que contengan 80% de cemento y 20% de arcilla

cocida. Encontrando una “actividad puzolánica destacable”, comparados con otros subproductos industriales a la edad de 28 días (Figura 2.12)

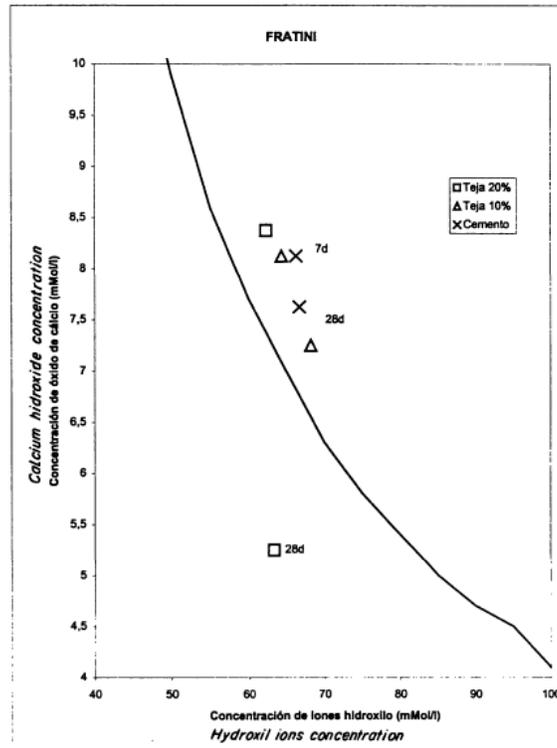


Figura 2.12 Ensayo Frattini (Sánchez de Rojas et al., 2001)

- Caolines

La investigadora Alejandra Tironi y sus colaboradores, de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, presenta una serie de trabajos relacionados al aprovechamiento de cinco tipos de caolinita natural, de diferentes regiones de Argentina; todas ellas calcinadas a 700°C. Usando el método de Frattini, concluyen: que, para las muestras, de la uno a la cuatro, de caolín, los puntos dentro de la gráfica se mantienen muy por debajo de la isoterma de solubilidad, indicando que contienen una alta actividad puzolánica, caso contrario para la muestra número cinco que, aunque se mantiene debajo de la isoterma, el punto se ubica muy cerca de ella; tanto a siete como a 28 días, indicando que el material no es puzolánicamente activo (Figura 2.13) (A. Tironi *et al.*, 2012a; A Tironi *et al.*, 2012b; Tironi *et al.*, 2013; Tironi *et al.*, 2014)

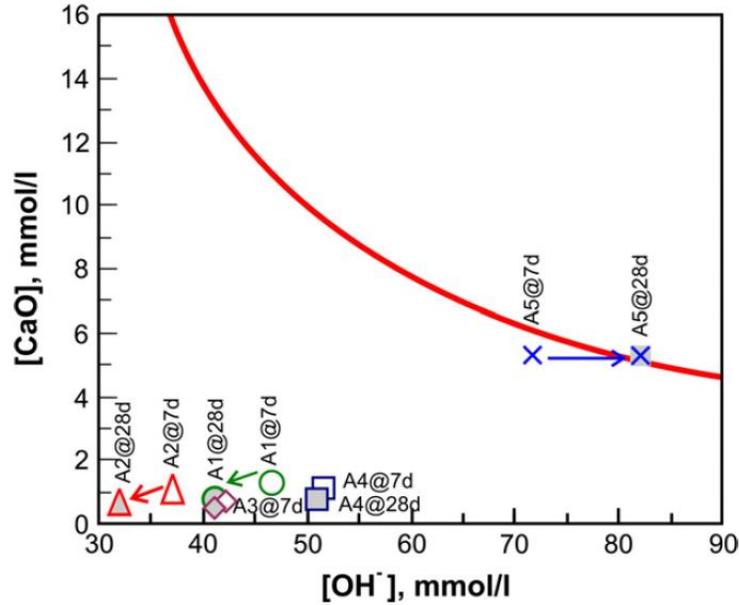


Figura 2.13 Resultados de la Prueba de Frattini, 7 y 28 días (A. Tironi *et al.*, 2012a)

- Metacaolín

En el trabajo de investigación de Talero (2005), se evalúa el desempeño de la formación de etringita, de mezclas de cemento y metacaolín; para ello se observa la actividad puzolánica de mezclas del 80-20, 70-30 y 60-40 de sustitución cemento-metacaolín, a través de la prueba de Frattini. Encontrando resultados positivos para todos los experimentos.

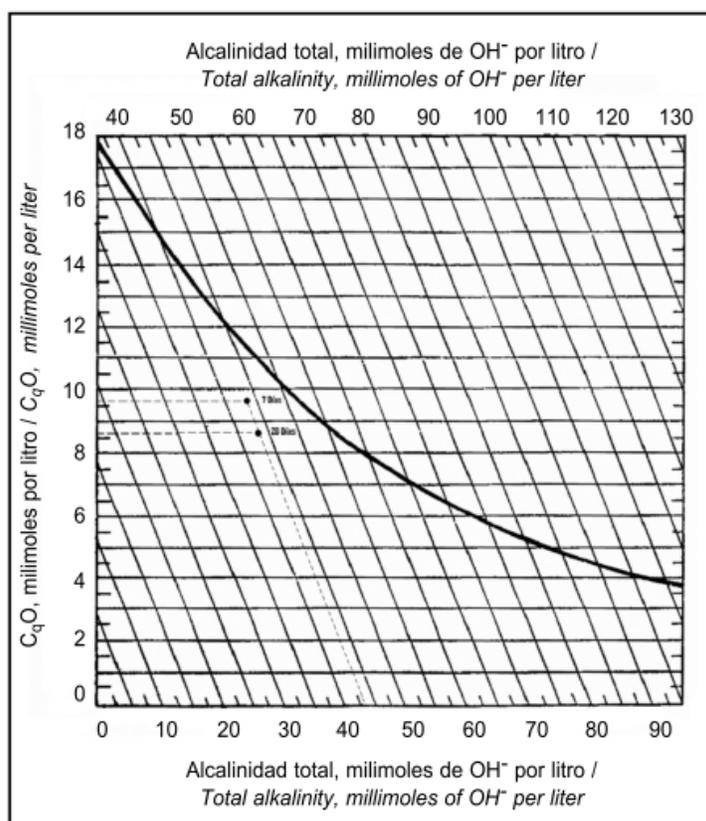
- Materiales granulares provenientes de actividades volcánicas.

En el estudio llamado “Valoración y efectos puzolánicos del material volcánico del Puracé” (Burgos Galindo *et al.*, 2015) se presentan los resultados experimentales de caracterización y evaluación puzolánica del material procedente del volcán Puracé, ubicado en el departamento de Cauca, Colombia. Para ello, el material fue analizado a través de SEM, FRX, DRX, análisis termo-gravimétricos, método de Frattini de actividad puzolánica, índice de actividad puzolánica, entre otros. El estudio presenta la evaluación de mezclas en un rango del 0-40% de sustitución. Los resultados indican que, pasados 7 días de contacto entre los materiales, el consumo de los iones de calcio y la alcalinidad total no fueron suficientes, por lo que el material se ubica en la zona no puzolánica de la curva de saturación. Sin embargo, al aumentar el tiempo de reacción a 28 días, la alcalinidad total y la concentración de CaO en la solución disminuyeron, por lo que el material logra ubicarse en la región puzolánica de la curva, corroborando los resultados obtenidos por el método mecánico (índice de actividad puzolánica).

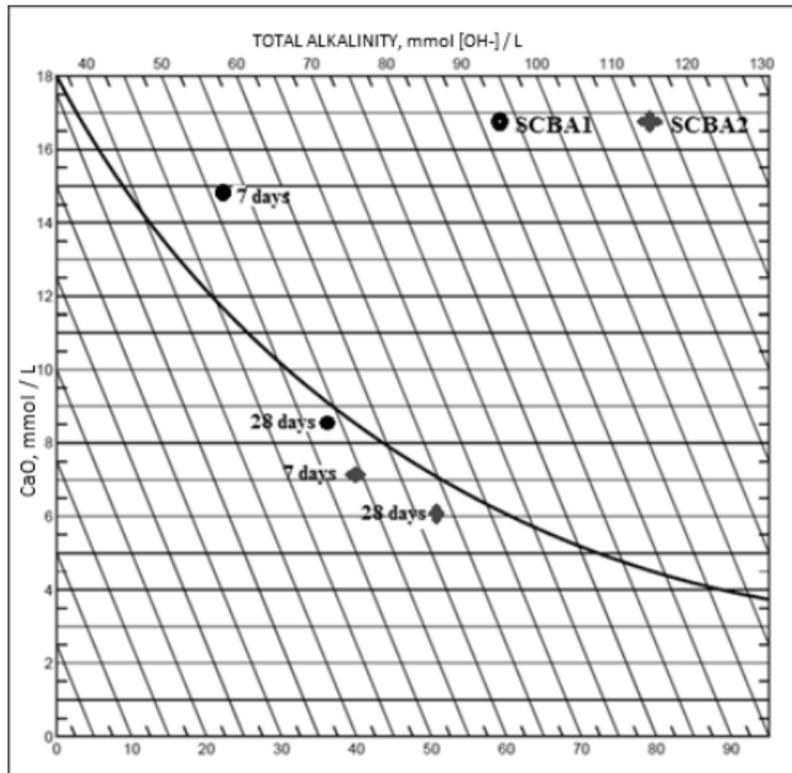
Sin embargo, existen investigaciones donde se ha aplicado esta prueba a la metodología utilizada para determinar la actividad puzolánica de materiales de desechos agrícolas, principalmente de la hoja y del bagazo de caña de azúcar (BA), Guzmán *et al.*, (2011) y Torres Agredo *et al.*, (2014), respectivamente.

En ellas se menciona que el material fue sometido a las pruebas de caracterización usuales, presentadas en anteriores trabajos: DRX, SEM, FRX, índice de actividad puzolánica y ensayo de Frattini. Muy similar a lo presentado en este mismo trabajo de investigación.

En la Figura 2.14, pueden observarse los resultados de ambos estudios, donde la actividad puzolánica de ambos materiales se muestra positivo en la gráfica de saturación de CaO.



(a)



(b)

Figura 2.14. a) Ensayo de puzolanicidad según Frattini (Guzmán et al., 2011); b) Resultados de la prueba de Frattini para SCBA1 y SCBA2, de 7 y 28 días de curado (Torres Agredo et al., 2014)

Por último, Donatello *et al.*, (2010), discute acerca de los resultados obtenidos, conforme a la comparación entre los métodos de índice de actividad resistente (IAR) y el método de Frattini (MF), ambos métodos utilizados en este mismo trabajo de investigación; concluyendo que, “existe una correlación significativa entre los resultados de estas dos pruebas”; todo ello, a través de la comparación entre los resultados de IAP y MF, en pruebas aplicadas a metacaolines y arenas utilizadas como puzolana.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este capítulo se hace una descripción de los términos 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 aglutinante o adhesivo del concreto. Está compuesto, principalmente, por óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro, hasta en un 95%. El cemento debe de cumplir con las especificaciones de la ASTM C150, (2014) "Especificación Normalizada para cemento Portland", produciendo mezclas de mortero de altas resistencias, además de que cuenta con la cualidad de ser compatible con diferentes aditivos y adiciones usados en la industria, así como de los agregados (Estévez and Gutiérrez, 1990). Dependiendo de la clase del cemento utilizado en las mezclas, ya sean concreto o mortero, se logran variaciones en la resistencia a la compresión y a la tensión de la mezcla.

En la actualidad existen diferentes tipos de cementos, de acuerdo con la clasificación de la ASTM, tales como:

- Cemento tipo I:
 - Utilizado cuando no se requieran las propiedades especiales de cualquier otro tipo.
 - Sin propiedades especiales.
 - Uso: todo tipo de obras.
 - Compatible con aditivos.
- Cemento Tipo IA
 - Cemento incorporado de aire para los mismos usos que el Tipo I.
- Cemento tipo IP
 - Mayor porcentaje de puzolana.
 - Propiedades hidráulicas.
 - Usado en climas de elevadas temperaturas y climas lluviosos.
- Cemento tipo II
 - Para uso general, con características de resistencia moderada a los sulfatos
 - Menor calor de hidratación
 - Usado en climas con temperaturas elevadas, construcciones cerca de la orilla del mar y selva donde hay presencia de aguas servidas.
- Cemento tipo IIA
 - Cemento incorporado de aire para los mismos propósitos del tipo II.
- Cemento tipo II (MH)
 - Para uso general, con características de calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos
- Cemento tipo II (MH)A
 - Cemento incorporado de aire para los mismos propósitos que el tipo II (MH).
 - Elevada resistencia a los climas helados y resistencia moderada a los sulfatos.

- Cemento tipo III
 - Para usar cuando se desea alta resistencia temprana.
 - Estribos de puentes, presas, etc.
 - Presencia del silicato cálcico.
 - Partículas más finas
- Cemento tipo IIIA
 - Cemento incorporado de aire para los mismos usos que el Tipo II (MH),
 - 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.
 - Controla la temperatura del cemento con respecto al clima.
 - Logra equilibrar 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 (Tabla 3.1) del cemento portland varía dependiendo del tipo y uso, componentes primarios, secundarios y otros. Los límites y componentes son los siguientes:

Tabla 3.1 Composición química del cemento portland.

Componentes primarios	Componentes secundarios	Otros componentes
CaO	MgO	Mn_2O_3
SiO_2	SO_3	P_2O_5
Al_2O_3	K_2O, Na_2O	TiO_2
Fe_2O_3	CaO Libre, residual insoluble, Pérdida por ignición. CO_2 (materia orgánica)	Fluoruros

3.1.1. Composición química del cemento.

Los componentes químicos necesarios para la fabricación del cemento provienen de diferentes minerales, por ejemplo: la piedra caliza aporta el CaO , arcillas aportan SiO_2 y el Al_2O_3 , la hematita aporta Fe_2O_3 .

La materia prima pasa por un proceso de horneado a $1450^\circ C$ de temperatura, donde se recombinan los cuatro elementos esenciales antes mencionados, produciendo clínker.

Dentro de la composición química (Tabla 3.2) del cemento se presentan los siguientes óxidos y compuestos.

Tabla 3.2 Compuestos y óxidos principales en el clinker.

Óxido	Abreviatura	Compuesto	Abreviatura
CaO	C	$3CaO.SiO_2$	C3S
SiO_2	S	$2CaO.SiO_2$	C2S
Al_2O_3	A	$3CaO.Al_2O_3$	C3A
Fe_2O_3	F	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C4AF
MgO	M	Ca(OH ₂)	CH
SO_3	S	$4CaO.3Al_2O_3.SO_3$	C4A3S
H_2O	H	$3CaO.2SiO_2.3H_2O.CaSO_4.2H_2O$	CSH ₂

Se muestra una breve descripción de los óxidos presentes:

- Óxido de calcio (CaO): Se obtiene de la calcinación de las rocas (calizas o dolomías); con alto contenido de carbonato de calcio, a una temperatura de 900°C.
- Bióxido de silicio (SiO_2): Se encuentra en las variedades cristalizadas de cuarzo, tridimita, cristobalita y en de manera amorfa en la sílice fundida. La sílice pura o cuarzo, estable a temperatura ordinaria, se transforma a 573°C en cuarzo, cristalizando en prismas hexagonales (densidad: 2,65 y dureza 2,7); a 870°C se obtiene la tridimita, y a 1470°C se forma la cristobalita (densidad: 2,33). 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 $SiO_2.H_2O$, o SiO_3H_2 (ácido meta silícico), y el $SiO_2.2H_2O$ o SiO_4H_4 (ácido orto-silícico), 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. La alúmina se halla combinada en la arcilla y la eliminación de la sílice da origen a la formación de dos óxidos hidratados, el diásporo y la hidrargirita o gibstia, siendo la bauxita una mezcla de ambas.
- Óxido férrico (Fe_2O_3): Muy abundante en la naturaleza; en el cemento portland se encuentra en pequeñas dosis, pues proviene de las impurezas de las arcillas. Este óxido da el color grisáceo al cemento.
- Silicatos de calcio: el óxido de calcio y el bióxido de silicio reaccionan a elevada temperatura, formando los siguientes compuestos.
 - Silicato mono-cálcico o meta-silicato: cristaliza en el sistema monoclinico, es inerte hidráulicamente.
 - Silicato bicálcico u orto-silicato: existen tres formas alotrópicas, apreciándose en las escorias de altos hornos y en los cementos portland ricos en este compuesto.
- Luminatos de calcio: se forman cuatro compuestos definidos:

- Aluminato monocálcico: se obtiene combinando alúmina y carbonato de calcio por encima de 950°C, se funde a 1660°C y se cristaliza en el sistema monoclínico, tiene propiedades hidráulicas.
- Aluminato tricálcico ($3CaO.Al_2O_3$): 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 ($5CaO.3Al_2O_3$): 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 ($3CaO.5Al_2O_3$): 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: $CaO.Fe_2O_3$ y el ferrito bicálcico: $2CaO.Fe_2O_3$. Se funde a 1216°C, no teniendo propiedades hidráulicas, hallándose en los cementos aluminosos y metalúrgicos

3.1.2. Proceso de hidratación del cemento portland

En la norma ASTM C150 se estima, a través de ecuaciones, la composición teórica o potencial de los compuestos del cemento portland, y suponen que las reacciones químicas de la formación de los compuestos del clínker, han avanzado hasta su equilibrio termodinámico, y que la presencia de impurezas tales como el óxido de magnesio y los álcalis puede ser ignorada.

El fraguado y el endurecimiento del cemento portland ocurre como resultado de la reacción de hidratación entre los compuestos del clínker, el yeso y el agua, la cual genera calor, mejor conocido como calor de hidratación. Estas reacciones se producen a diferentes velocidades y están influenciadas unas con otras. Las fases del cemento portland que participan en este proceso son:

- Alita: solución sólida del silicato tricálcico dopado con impurezas iónicas. 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 la solución.
- Belita: solución sólida de silicato dicálcico dopado con impurezas iónicas puede existir en cinco formas estructurales diferentes, se hidrata más lentamente que la alita.
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.
- Solución sólida del aluminato tricálcico: 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 depende de la cantidad y calidad de los iones alcalinos que se encuentran en su estructura

- Ferrita: ferro aluminato de calcio. Forma productos similares a la solución sólida del aluminato tricálcico, donde el hierro sustituye parcialmente a la alúmina en la estructura del cristal de etringita y monosulfoaluminato hidratado.
- Sulfato de calcio en forma de anhidrita. Es añadido al cemento portland para controlar el tiempo de fraguado, para mantener la estabilidad volumétrica y en una proporción adecuada, desarrollar en la pasta de cemento, la máxima resistencia mecánica a la compresión.

El C-S-H es la principal fase de hidratación y es la responsable de la resistencia mecánica de las pastas de cemento, exhibe poca cristalinidad, en su estructura pueden quedar embebidos iones como Mg, Al, K, Na o SO_4 .

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 y puede producir poros en la matriz, 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 proceso de la hidratación depende de:

- La tasa de disolución de las fases participantes
- 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 hidratado.

Boumiz *et al.*, (1996) proponen la descripción del proceso de hidratación, el cual es descrito en cinco etapas:

- Etapa I: Periodo de mezclado.

Durante esta etapa, los iones son liberados por las diversas fases que entran en la solución, de manera rápida y exotérmica. La superficie del cemento es parcialmente cubierta con silicatos de calcio hidratados, los cuales son originados de las fases intersticiales y de las diferentes formas de los sulfatos de calcio presentes.

- Etapa II: Periodo de aletargamiento.

En esta etapa se incrementa rápidamente el contenido de iones Ca y el pH en el agua de mezclado, al grado de obstaculizar la disolución de las fases del clínker. La generación de calor decae considerablemente, pero no se detiene. Una pequeña cantidad de C-S-H se forma durante este periodo. La fase acuosa llega a ser saturada por iones Ca, pero

no hay precipitación del Ca(OH)_2 , debido a su baja tasa de generación comparada con la de C-S-H.

- Etapa III: Fraguado inicial.

La reacción de hidratación es activada cuando la portlandita comienza a precipitar, ocurre cuando prácticamente no hay silicatos en la fase acuosa; el repentino consumo de iones Ca y OH acelera la disolución de los componentes aun no disueltos en el cemento. La generación de calor se incrementa lentamente al principio y llega a ser más rápida en la etapa posterior.

Usualmente el fraguado inicial ocurre en este periodo, excepto cuando algo de rigidez del mortero ocurre debido al desarrollo de 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, resultado en una rigidez progresiva de la pasta.

- Etapa IV: Endurecimiento.

En la mayoría de los cementos portland hay menos sulfato de calcio que la cantidad necesaria para reacción con la fase de aluminatos, además que durante el fraguado los iones SO_4 son inicialmente consumidos por la formación de la etringita. Esto, usualmente, ocurre entre las 9 y las 15 horas después del mezclado inicial. Esta reacción genera calor y resulta en la aceleración de la hidratación de las fases de los silicatos.

Los productos de la 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. Ellos aparecen como una red porosa de fibras de C-S-H, agujas de etringita, planas de monosulfoaluminato y cristales hexagonales apilados de portlandita (Figura 3.1).

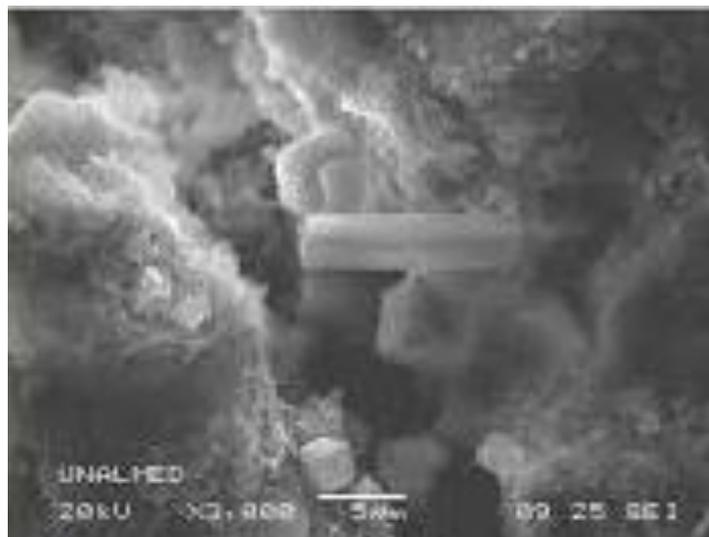


Figura 3.1. Morfología de la portlandita (Boumiz et al., 1996).

- 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 aun no hidratadas a través de esta capa. La hidratación es disminuida principalmente debido a que la tasa de difusión es controlada por las moléculas a través de las capas de hidratos, y la pasta de cemento hidratado aparece como una pasta masiva compacta y amorfa.

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

1.1.3 Agua para mezcla

El agua de mezcla cumple con dos funciones importantes, permitir la hidratación del cemento y hacer la mezcla manejable. De toda el agua que se emplea en la preparación de un mortero o concreto, parte hidrata el cemento y el resto no presenta ninguna alteración y con el tiempo se evapora, dejando vacíos, los cuales disminuyen la resistencia y la durabilidad del material. La cantidad de agua que requiere el cemento para su hidratación se encuentra alrededor del 25 y el 30% de la masa del cemento, pero con esta cantidad la mezcla no es manejable, para que la mezcla empiece a poder ser manipulable, se requiere como mínimo una cantidad de agua del orden el 40% de la masa del cemento (Rivera L, 2014)

Como norma general se considera que el agua es adecuada para producir mezclas si su composición química indica que es apta para el consumo humano, sin importar si ha tenido o no un tratamiento preliminar; sin embargo, hay situaciones en que esto 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 mezclas de cemento.

Los requisitos de calidad del agua de mezclado 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 propiedades de las mezclas.

Las sustancias orgánicas contenidas en aguas naturales, afectan considerablemente el fraguado inicial del cemento; las aguas que tengan un color oscuro, olor pronunciado, o aquellas en las cuales sean visibles formaciones de colores verdosos, deben de ensayarse. Se debe de tener especial cuidado con los altos contenidos de azúcar en el agua porque pueden ocasionar retardo en el fraguado.

Las cantidades permisibles de contenidos inorgánicos son más amplios, pero en algunas partes puede tener cantidades suficientes para causar un deterioro gradual. Los mayores iones que se presentan, usualmente, en aguas naturales son calcio, magnesio, sodio, potasio, sulfatos, cloruros nitratos y, menos frecuente, carbonatos. Las aguas que

contengan un total combinado de estos iones comunes que no sea mayor de 2 g/l (2000ppm), son generalmente adecuadas como agua de mezcla (Rivera L, 2014)

3.2 Puzolanas

El término puzolana incluye "todos los materiales inorgánicos, tanto naturales como artificiales, capaces de combinarse directamente con la cal o con la procedente de la hidratación de los cementos, a temperatura ambiente y en presencia de agua, para formar compuestos similares a los originados en la hidratación de los componentes principales del cemento Portland"(Soriano, 2007).

El uso de puzolanas y materiales cementantes en la industria del cemento y del concreto ha ido cobrando una importancia cada vez mayor en las últimas décadas. Son varios los beneficios conseguidos con el uso de puzolanas, entre ellos se puede destacar la mejora de resistencias mecánicas, el aumento de durabilidad y en muchos casos beneficios económicos y medioambientales.

Además, el uso de estos materiales residuales puzolánicos supone un beneficio medioambiental doble, por un lado el sustituir parte de cemento, cuya fabricación produce emisiones de dióxido de carbono, y por otro lado el consumo de los materiales residuales de otros procesos industriales, que de no utilizarse, tendrían que almacenarse en vertederos controlados (Rosković and Bjegović, 2005)

3.2.1 Puzolanas clase N

En la norma ASTM C618 se hace mención a tres tipos de puzolanas: clase N, clase f y clase C; dentro de las cuales, la últimas dos provienen de subproductos de cenizas de alto horno del carbón. Sin embargo, la clase N se describe como "Puzolanas crudas o calcinadas que contengan las características requeridas..." Dichas características se enlistan a continuación (Tabla 3.3 y 3.4):

Tabla 3.3 Requerimientos químicos. (ASTM C618, 2003)

Material		ASTM C618
		Clase N
1	Pérdida en calcinación	LOI (%) 10.0%, máx.
2	Dióxido de silicio	SiO_2
3	Óxido de aluminio	Al_2O_3 70.0%, min
4	Óxido de Hierro (III)	Fe_2O_3
6	Óxido de Azufre	SO_3 5.0% máx.
7	Contenido de humedad	% 3.0% máx.
8	Óxido de sodio	NaO 1.50% máx.

Tabla 3.4 Requerimientos físicos. (ASTM C618, 2003)

	Material	ASTM C618 Clase N
1	Finura (cantidad retenida máxima cribada húmeda en la malla no 325)	34%
2	Índice de actividad resistente (con cemento portland, a 7 días, mínimo, porcentaje del control)	75%
3	Agua requerida, máximo, porcentaje del control	115%

Del mismo modo, la norma ASTM C618 hace notar dos datos importantes:

- La determinación de los límites y composición química establecida no predice el desempeño de las puzolanas naturales con cemento hidráulico, pero colectivamente ayudan a describir la composición y la uniformidad del material.
- El índice de actividad resistente en mezclas con cemento portland es una medida de reacción puzolánica que puede variar según sean los materiales (puzolana y cemento)

3.3 Actividad puzolánica

Cuando se da la interacción en una mezcla, el cemento portland y la puzolana, en presencia de agua, participa por una parte la cal y los álcalis liberados por la reacción de la hidratación del cemento, y por la otro los óxidos presentes en la puzolana; la presencia de la puzolana en el sistema de hidratación modifica la manera en que compuestos principales del cemento se hidratan, afectando el calor de hidratación, contenido de portlandita, la cantidad de agua combinada y el grado de reacción de los componentes.

Es difícil determinar el mecanismo de la reacción puzolánica de manera acertada, debido a la naturaleza de la interacción entre la puzolana y el hidróxido de calcio (Khalil et al., 2013; Cobreros et al., 2015)

Existen diferentes factores que deben ser considerados como influyentes en la reacción puzolánica, como lo son:

- Las fases activas de la puzolana (Características químicas- mineralógicas)
- Proporción de sustitución cemento-puzolana.
- Cal disponible
- Dimensiones de la puzolana
- Relación agua/cemento 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 contribuye a la resistencia mecánica de las pastas, especialmente a edades avanzadas; de igual manera, la

reacción puzolánica en los álcalis contribuye a disminuir la reacción álcali agregados en el concreto (Asha et al., 2014)

Los hidratos encontrados en la pasta endurecida de las pastas cemento-puzolana, son similares a las pastas de cemento sin ellas, dichos hidratos son:

- C-S-H (silicatos de calcio hidratado)
- Carbonato de calcio (CaCO₃)
- Etringita
- Hidratos de aluminato de calcio
- Monosulfoaluminato

Malhotra and Ramezaniyanpour (1994), proponen como mecanismo principal de reacción puzolánica una disolución controlada por difusión y describen las reacciones que existen entre las fases de C3S y C3A y la puzolana. El C-S-H formado por la hidratación del C3S precipita como hidratos de alta relación Ca/Si sobre la superficie del grano y como hidrato poroso con baja relación Ca/si sobre la superficie de la partícula puzolánica. El ataque de la superficie de la puzolana en agua, trae consigo una capa amarga sobre la superficie de la puzolana rica en Si y Al, que va incrementando su espesor a medida que se combinan con los iones Ca²⁺. Este mecanismo ha sido reproducido en una buena cantidad de ocasiones, en las diferentes aplicaciones de residuos agrícolas como puzolanas (Dwivedi et al., 2006; Al-Akhras et al., 2009; D. A. Adesanya and Raheem, 2009b; Cordeiro et al., 2012; Frías et al., 2012; Bahurudeen et al., 2015; Cobreros et al., 2015)

3.3.1 Método de Frattini

Este método, basado en el *British Standard Method BS EN 196-5: 2005*, evalúa la actividad puzolánica con base en la concentración de iones de calcio Ca²⁺ (expresado como óxido de calcio, CaO), presente en la solución acuosa en contacto con el cementante (80 % cemento + 20 % puzolana), de acuerdo a la cantidad máxima de hidróxido de calcio con la que una puzolana se puede combinar y a la velocidad a la cual ocurra esta reacción, el material de estudio se ubicará en la zona puzolánica o no puzolánica de la curva de saturación de Frattini

Además de observar los datos de consumo de distintas disoluciones empleadas como titulantes, activadores y soluciones; se observa los cambios del pH del material, transformado en la alcalinidad de la muestra; éste dato, en conjunto con la cantidad de titulante para determinar la concentración de la disolución de óxido de calcio (CaO), indican los ejes del diagrama de Frattini (Figura 3.2), que indica si el material tiene como propiedad química la actividad puzolánica, como ya se había mencionado.

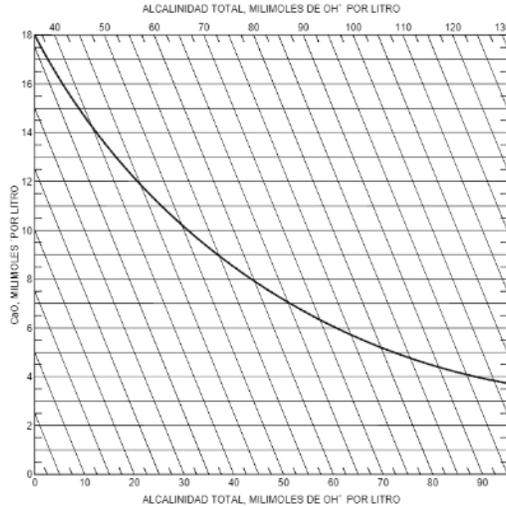


Figura 3.2 Gráfica de solubilidad de CaO en presencia de álcalis. (NTC 1512, 2003)

3.4 Análisis físicos y químicos

En orden de determinar las propiedades químicas y mineralógicas de la puzolana a tratar, varios autores (Dwivedi et al., 2006; Singh et al., 2007; Villar-Cociña et al., 2011; Frías et al., 2012) proponen la utilización de las siguientes dos técnicas:

3.4.1 Análisis mineralógico estructural: Difracción de rayos X

Las técnicas de difracción se basan en la interacción de la estructura cristalina de un sólido con una fuente de rayos x, dicha estructura consiste en la repetición periódica de átomos o moléculas que forman este sólido en las tres direcciones del espacio.

Sobre esta estructura tridimensional se pueden trazar infinitos planos paralelos donde cada uno de los cuales pasará por una serie de puntos. Si tomamos uno de estos planos, a una cierta distancia existirá otro plano donde la distribución de puntos que corta será la misma, a la distancia entre estos dos planos se llama distancia interplanar “d”, tendremos infinitos planos paralelos a distancias múltiplos de “d”. si por dos de estos planos de la estructura se hace incidir un haz de rayos x, se da el siguiente fenómeno:

Si el frente de ondas que se difracta por el primer plano lo hace con un ángulo θ , el frente de ondas del segundo plano también se va difractar con un ángulo θ , con esta nueva trayectoria que se describe si los dos frentes no están en fase ocurre una interferencia destructiva y se anula uno al otro, pero si los dos salen en fase, hay una interferencia constructiva y el haz difractado no se anula y es detectable, esto ocurre cuando la diferencia de recorrido entre los dos frentes es un múltiplo de la longitud de onda λ y matemáticamente: $2d \sin\theta = n\lambda$ (Ley de Bragg), como cada familia de planos tiene una distancia d, vamos a detectar estos planos a diferentes ángulos, y los resultados serán diferentes según la estructura de lo que estemos midiendo, por lo que podemos caracterizar las fases que componen la muestra en base a los diferentes “picos” de detección que son en realidad las reflexiones de los planos de cada fase, para una rápida identificación se tienen

tabulados los valores de las diferentes fases en fichas y se comparan con los resultados obtenidos, dichas tablas son llamadas “difractogramas” (Figura 3.3).

La cristalografía de rayos X se utiliza no solo para obtener estructuras desconocidas, sino también para determinar la composición de muestras de suelos o minerales, así como para la identificación de metales y otros elementos. Cada sustancia mineral forma cristales con una celda unidad y simetría determinada, que resulta en un patrón de difracción característico. La difracción por el método de polvo es muy usada para este tipo de aplicaciones, por ser sencillo comparar el espaciado entre los anillos de difracción con los valores compilados por el *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS)

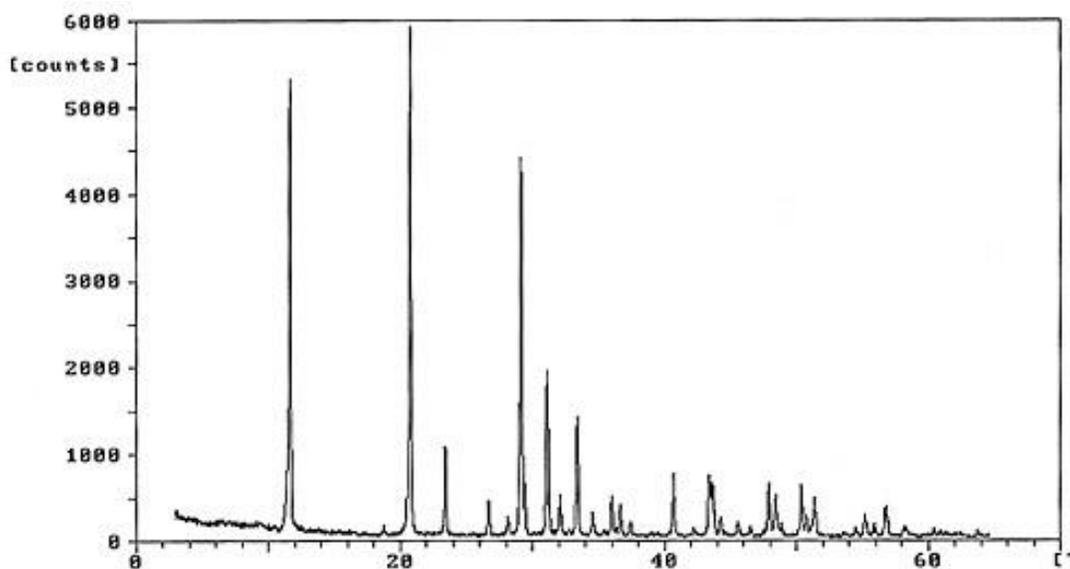


Figura 3.3 Ejemplo de difractograma, Cuarzo (Dwivedi et al., 2006)

3.4.2 Composición química: Fluorescencia de rayos X

Este método consiste en emisión de rayos X secundarios (o fluorescentes) característicos de un material que ha sido excitado al ser «bombardeado» con rayos X de alta energía o rayos gamma. Este fenómeno es muy utilizado para análisis elemental y análisis químico, particularmente en la investigación de metales, vidrios, cerámicos y materiales de construcción, así como en la de geoquímica, ciencia forense y arqueología.

El principio físico de reside en que al exponer un material a rayos X de longitudes de onda cortas o a rayos gamma, pueden ionizarse los átomos que constituyen el material. La ionización consiste en eyección de uno o más electrones desde el átomo. Puede ocurrir si a éste se le expone a radiación cuya energía exceda la del potencial de ionización.

Tanto los rayos X como los rayos gamma pueden ser suficientemente energéticos para desprender electrones fuertemente ligados en los orbitales internos del átomo. Tal remoción electrónica deja en condición inestable a la estructura electrónica del átomo, y los

electrones de orbitales más elevados “caen” hacia el orbital más bajo, que luego ocupan los huecos de los electrones internos desprendidos.

En esta caída, o transición, se genera energía mediante emisión de un fotón. El valor de la energía de este corpúsculo es igual a la diferencia de energía entre los dos orbitales involucrados. Por lo tanto, el material emite radiación cuya energía es característica de los átomos componentes del material. El término *fluorescencia* se usa para denominar el fenómeno por el cual la absorción de radiación de una energía específica genera reemisión de radiación de una energía diferente, generalmente menor.

4. METODOLOGÍA

En esta sección se describen los materiales utilizados para evaluar el índice de la resistencia de mezclas de mortero, que integren ceniza de corteza de bambú en sustitución parcial del cemento; así mismo como la metodología para la caracterización de este tipo de material puzolana.

Se definieron una serie de pasos en la metodología para la caracterización y evaluación de la actividad puzolánica de la ceniza de corteza de bambú. La ejecución depende de la disponibilidad de los recursos para la ejecución. A continuación, se describen dichos pasos.

- 1) Obtención y secado del material.
- 2) Incineración.
- 3) Molienda y tamizado.
- 4) Análisis de composición química (FRX).
- 5) Análisis de estructura mineralógica y morfológica (DRX y SEM).
- 6) Selección de material óptimo
- 7) Evaluación de la resistencia a la compresión en cubos de morteros (índice de actividad resistente).
- 8) Evaluación de la actividad puzolánica a través de la Prueba de Frattini.

4.1 Desarrollo experimental.

4.1.1. Obtención y secado del material

Existen procesos y tratamientos para el desarrollo de esta investigación que pasan por el plano del conocimiento empírico, pasos como el corte y secado del material obedecen al sentido común del accionar para el secado de cualquier otro material, utilizando el recurso más poderoso e inagotable de la luz solar.

La corteza es retirada de manera manual del tallo de bambú, procurando que las muestras de bambú obtenidas no excedan los cinco milímetros de espesor; una vez retiradas, es necesario el secado del material al sol. El bambú utilizado se clasifica como *Guadua Angustifolia* y proviene de los plantíos ubicados en la comunidad de Cuetzalán, Puebla.

4.1.2 Incineración.

En lo respectivo a la incineración, se toma como referencia los estudios realizados por Villar-Cociña *et al.*, (2011), que en sus investigaciones sostiene que para calcinar el material es necesario que este permanezca dentro de un horno eléctrico a 600°C durante dos horas, como complemento y en caso necesario de que dicho equipo no estuviere disponible para esta investigación se tomará en cuenta los procesos desarrollados por Martirena *et al.*, (2006) que sostiene que es posible construir un incinerador *in situ* con las características necesarias para que el proceso de calcinación sea posible.

Las muestras crudas en estado seco del material se incineran en una mufla marca Felisa modelo FE-363, perteneciente al Laboratorio GRUTAR del Laboratorio de Hidráulica, en la Facultad de ingeniería de la U.A.Q., durante distintos periodos de tiempo (2, 4, 6 Y 8 horas) a una temperatura constante de 600°C, de conforme con la experimentación presentada en distintos trabajos mencionados en la sección 2.3.3.6.; con ello se asegura la calcinación de cualquier materia orgánica dentro del material (figura 4.1).



Figura 4.1 Producto de incineración de material crudo, 600°C durante 6 horas.

El objetivo del proceso de incineración, es el de remover la fase orgánica del material (proteínas y grasas). Sin embargo, debido al calor, es posible que se originen nuevas fases en el material, además de nuevos componentes cristalinos.

4.1.3 Molienda y tamizado.

Posteriormente se lleva el material producto de incineración a un mortero de cerámica para el total aprovechamiento de la ceniza, la cual se tamiza por la criba no. 200, utilizando una cribadora mecánica según la especificación de la Norma ASTM C618 (2003).

De esta manera se reducirá el tamaño de la ceniza hasta alcanzar el tamaño necesario (30 micrómetros), aunque aún es necesario un proceso de tamizado de material para utilizar una muestra homogénea que esté por debajo de los 90 micrómetros en el diámetro de sus partículas, desechando cualquier resto que sea improcedente en la caracterización del material, esto alcanzado al hacer pasar el material, como fue mencionado, a través de una serie de tamices montados en el equipo tamizador de características Ro-Tap o equipo similar, que consta de un vibrador que produce mecánicamente a los tamices un movimiento de vaivén en sentido horizontal y circular, mientras un golpe en sentido vertical por medio de un martillo que asegura un zarandeo uniforme (ASTM D422, 1998)

4.1.4 Análisis de composición química (FRX)

Las muestras se caracterizan en un equipo Bruker S2 Puma (figura 4.2), propiedad del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la Universidad Nacional Autónoma de México, campus Juriquilla. Bajo la supervisión del Dr. Erick M. Rivera Muñoz y de la Dra. Beatriz Millán Malo, con el objetivo de obtener los porcentajes de óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de fierro (III), entre otros.



Figura 4.2 Equipo Bruker S2 Puma

4.1.5 Análisis de estructura mineralógica (DRX).

Los patrones de difracción de rayos X se obtienen utilizando un difractómetro Rigaku Miniflex-II que funciona a 35 kV, 15 mA con una longitud de onda de radiación ($\text{CuK}\alpha$) de $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ (figura 4.3) propiedad del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la Universidad Nacional Autónoma de México, campus Juriquilla. Bajo la supervisión del Dr. Erick M. Rivera Muñoz y de la Dra. Beatriz Millán Malo, con el objetivo de identificar las fases cristalinas de óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de fierro (III), principalmente.



Figura 4.3 Equipo Rugaku Miniflex II

4.1.6 Selección del material óptimo

Una vez analizadas las características químicas y mineralógicas del material, se hace la selección de aquella que mejor parezca cumplir con los requerimientos establecidos en la norma ASTM C618; en orden observar la actividad puzolánica del material a través del método de Frattini, además del desempeño de la resistencia a la compresión de mezclas de mortero, donde se sustituya cemento por este material en un 20%.

Ambas pruebas analizan, desde un enfoque químico y físico, respectivamente, la actividad puzolánica del material seleccionado.

4.1.7 Evaluación de la resistencia a la compresión en cubos de morteros (índice de actividad de resistencia).

Los cubos de mortero son realizados y muestreados en las instalaciones del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, seleccionando un porcentaje de 20.00% de sustitución ceniza-cemento.

Estos cubos deben ser ensayados a compresión simple, obteniendo los resultados de la muestra que mejor califique como puzolana, según el análisis de contenidos y difractogramas, a la edad de 7 días. Los resultados se comparan con otros resultados obtenidos de una mezcla de control con la misma edad.

Los resultados de las pruebas mencionadas son evaluados, comparados y discutidos para poder conjeturar una conclusión sobre la actividad puzolánica del material, así como la que mejor satisfaga a la hipótesis de esta investigación.

4.1.7.1 Materiales y procedimientos presentes en las mezclas de mortero (cemento-puzolana)

Cemento

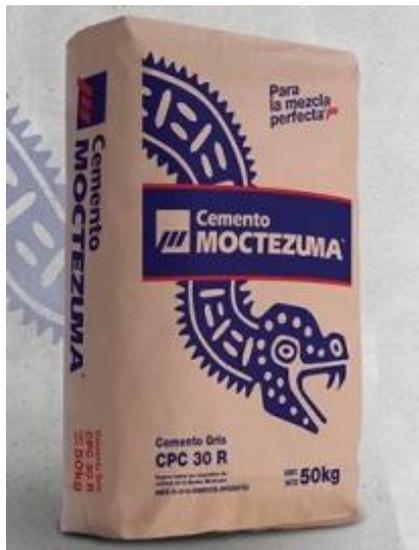


Figura 4.4 Ilustración, Cemento marca Moctezuma CPC 30R, tipo 1

El cemento portland utilizado corresponde a un Cemento Combinado CPC 30R (Figura 4.4) de la empresa cementera Moctezuma adquirido en la presentación de saco de 50 kg: dicho cemento es usado y recomendado para todo tipo de construcción u obra civil que no requiera especificaciones reglamentarias y sin ningún tipo de aditivo especial, este cemento también cumple con los lineamientos establecidos en la norma vigente mexicana la NMX- C-414-ONNCCE-2009 Industria de la Construcción –Cementos Hidráulicos-Especificaciones y métodos de prueba.

Agregado fino

Según lo especificado en la norma ASTM C109 (2012), la arena utilizada para realizar los especímenes debe ser **arena de sílice natural**; conforme a los requisitos para arena graduada en la especificación ASTM C778 (2003).

Por lo tanto, el agregado fino consta de Arena Sílica, traída de Cerro Azul, Guanajuato (Figura 4.5); la arena sílica es un compuesto resultante de la combinación de la sílice con el oxígeno. Su composición química está formada por un átomo de sílice y dos átomos de oxígeno, formando una molécula estable: SiO_2 .



Figura 4.5 Arena de sílice

Sus usos derivan principalmente por sus propiedades químicas y físicas, entre lo que destaca su dureza, resistencia química, piezoelectricidad, alto punto de fusión, transparencia y piroelectricidad.

Este tipo de arenas contiene una buena distribución de partículas (Anexo B), tiene bajo contenido de finos, lo cual ayuda en los requerimientos de agua de la mezcla, reduciendo la porosidad de los morteros y concretos.

Agua

El agua utilizada para la creación de los cubos de mortero tiene la característica de ser potable, adecuada para consumo humano; análisis y muestreo de las partículas contenidas en el agua no fueron requeridas.

Mezclado

Las cantidades de los materiales a mezclar están dadas por la norma ASTM C 311 (2004), en los siguientes montos (Tabla 4.1) :

Tabla 4.1 Cantidad de materiales para seis cubos de mortero. (ASTM C311, 2004)

Materiales	Mezcla de Control	Cemento-Puzolana
Cemento portland, g	500	400
Puzolana, g		100
Arena, g	1375	1375
Agua, mL	242	mL de agua requerido para fluidez \pm 5 del control

El mezclado del mortero utilizado en la investigación se realiza en un equipo de batido, respetando las Normas (ASTM C305, 2002; ASTM C311, 2004; ASTM C109, 2012) se deben mezclar primero la puzolana y el cemento, seguido del agua esperando una fluidez.

El proceso de mezclado corre de la siguiente manera:

- Al recipiente se le vierte el agua, dejando reposar la probeta durante 30 segundos.
- Se agrega el cemento, y se deja reposar la mezcla durante 30 segundos.
- Se enciende la mezcladora eléctrica, a velocidad baja y se mezcla durante 30 segundos.
- Al cumplir con los 30 segundos en velocidad baja y sin apagar la mezcladora se adiciona la arena normalizada durante 30 segundos.
- Se detiene la mezcladora, se sube a velocidad media y se mezcla durante 60 segundos.
- Se apaga la mezcladora y se deja la mezcla en reposo durante 90 segundos, evitando que pierda humedad.
- Finalmente, se mezcla a velocidad media durante otros 30 segundos.

Fluidez

Posterior a la preparación de la mezcla, se determina el flujo de acuerdo con el procedimiento dado en el método de ensayo ASTM C1437 (2001), el cual utiliza una mesa de flujo (figura 4.6), un molde cilíndrico y aplica una serie de golpes al mortero.

Al cono se le adiciona con tres capas de mezcla, distribuyéndola con 25 golpes cada una, y finalmente se retira el cono y se le aplican 25 golpes en 15 segundos a la mezcla sobre la mesa de flujo.

El mortero se extiende hasta lograr un diámetro máximo, es así como el porcentaje que resulta entre el diámetro inicial y final, determina el porcentaje de fluidez de la mezcla.

Llenado de los cubos

Antes del llenado se deben de preparar una cantidad de seis moldes cúbicos de 50 milímetros, ajustados herméticamente, separables en no más de dos lados. Dichos moldes deben ser recubiertos por una película delgada de desecofrante a las caras interiores y placas de base, evitando cualquier exceso del desecofrante; y se sellan las superficies donde las mitades del molde se juntan.

Se completa la consolidación del mortero en los moldes por un apisonador manual, haciendo capas de 25 milímetros y compactando con 32 golpes, en cuatro rondas de ocho golpes (figura 4.7)



Figura 4.6 Mesa de Flujo

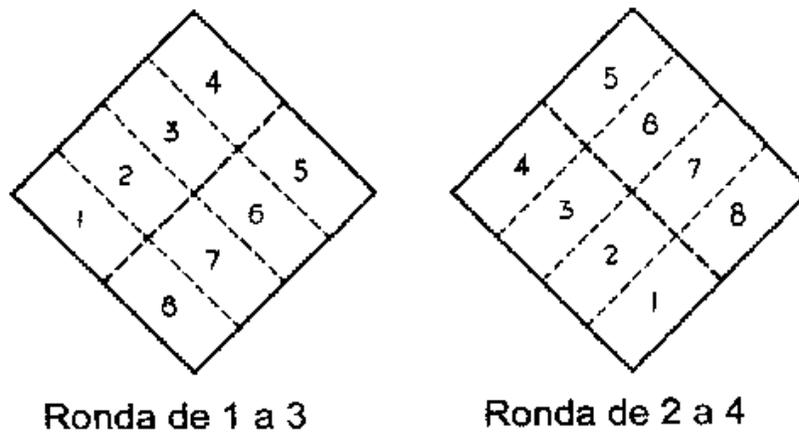


Figura 4.7. Orden de apisonado en el moldeo de los especímenes de ensayo (ASTM C109, 2012)

Curado

El curado de los cubos de mortero se realizará bajo condiciones controladas, respetando la norma ASTM C109, que menciona la utilización de un cuarto húmedo. Luego los especímenes se sumergen en agua saturada de cal, en tanques de almacenaje de materiales no corrosivos.

Pruebas mecánicas

Determinación de resistencia a la compresión.

Se ensayan los especímenes inmediatamente después de sacarlos del agua de almacenaje, todos los especímenes de ensayo deben de ser rotos dentro de la tolerancia admisible siguiente (Tabla 4.3):

Tabla 4.2 Tolerancia de ensayo de muestras a compresión (ASTM C109, 2012)

Edad de Ensayo	Tolerancia Admisible
24 horas	$\pm 1/2$ h
3 días	± 1 h
7 días	± 3 h
28 días	± 12 h

Se debe de aplicar carga a las caras del espécimen que estuvieron en contacto con las superficies verdaderamente planas del molde, a una velocidad relativa de movimiento entre las platinas de la prensa correspondiente a una carga sobre el espécimen con el rango de 900 a 1800 N/s.

Se registra la carga total máxima indicada por la máquina de ensayo, y se calcule la resistencia a la compresión como sigue:

$$fm = P/A \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

fm = Resistencia a la compresión en MPa, o lb/pulg²

P = Carga total máxima en N, (lb)

A = Área de la superficie cargada mm² (pulg²).

Tanto los especímenes de 50 mm como los de (2 pulg) pueden ser usados para la determinación de la resistencia a la compresión, si se utilizan unidades SI o pulgada-libra. Sin embargo, deben usarse unidades coherentes para la carga y el área para calcular la resistencia en las unidades seleccionadas. Si el área de sección transversal de un espécimen varía en más del 1.5% de la nominal, se usa el área real para el cálculo de la resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión de todos los especímenes de ensayo aceptables hechos de la misma muestra y ensayados en el mismo período debe ser promediada e informada a 0.1 MPa (10 lb/pulg²) más cercanos.

4.1.8 Evaluación de la actividad puzolánica a través de la Prueba de Frattini.

La prueba de Frattini, establecida en la norma británica BS EN 196-5:2005 y en la norma colombiana NTC 1512-5, muestra como resultado, a través de un análisis químico, la actividad puzolánica de un material.

Véase el Anexo A, para observar el objeto, ensayos, principio, apartados y equipo, reactivos, procedimientos y cálculos de la prueba.

En este documento, como ya antes se había mencionado, las muestras se realizan a partir del material óptimo seleccionado de la caracterización del BCA. Estas muestras sustituyen el 20.00% del cemento de la mezcla.

El método establece que todas las pruebas se realicen por triplicado, en mismas condiciones y procesos. Por lo tanto, se realizan seis muestras: las primeras tres para ser evaluadas a 7 días de curado en saturación, si en los resultados se observa una actividad puzolánica negativa; las siguientes tres muestras serán evaluadas a los 28 días de curado, según indica el método (Figura 4.1).

Tabla 4.3 Muestras experimentales necesarias para prueba de Frattini

Muestras	Curado	Cemento (g)	BCA-6hrs (g)	Agua (g)
1,2 y 3	7 días	16	4	100
4, 5 y 6	28 días	16	4	100
C1, C2 y C3*	7 días	20	0	100

*Las muestras C1, C2 y C3: control.

Las pruebas de actividad puzolánica por el método de Frattini son realizadas y evaluadas en las instalaciones del Laboratorio GRUTAR, dentro de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la U.A.Q. Con la supervisión de la Q.F.B. Mirelle Zúñiga y el I.Q. Jorge Granados Medina.

5. RESULTADOS

5.1 Obtención y secado del material

El material en estado seco, fue obtenido por parte del Dr. José Luis Reyes Araiza, dentro de las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la U.A.Q.

Se menciona el estado seco ya que el bambú utilizado se ha mantenido a la intemperie durante un periodo aproximado de seis meses, con lo cual se predice que el contenido de humedad de las piezas de bambú es mínimo; dicho sea de paso, y haciendo alusión a la metodología planteada por (Liu et al., 2016), donde se menciona al bambú como un objeto dividido en 4 fases, se utilizaron métodos manuales para la extracción de la corteza, procurando la formación de especímenes delgados (2 milímetros de espesor, como máximo), para, de tal manera, asegurar que la fase de la corteza estuviera siendo retirada (Liu et al., (2016) la menciona con las siglas OB, “*outer layer of bamboo*”) (Figura 5.1).



Figura 5.1 *Guadua angustifolia* en estado crudo

5.2 Incineración

En orden de hacer una caracterización propia del bambú, se destina una cantidad de al menos cuatro puntos experimentales. Para ello, y basado en la configuración de experimentaciones anteriores, se toma la decisión de utilizar el parámetro de tiempo como variable y una temperatura constante (Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Nomenclatura de muestras para incineración

	Muestras	Temperatura de incineración	Tiempo de incineración
1	BCA-2	600°C	2 horas
2	BCA-4	600°C	4 horas
3	BCA-4	600°C	6 horas
4	BCA-6	600°C	8 horas

Como ya se había establecido, el parámetro de 600°C para todas las muestras corresponde a la eliminación de fases orgánicas del material.

Se recabaron datos de pérdida de masa por incineración de todas las muestras, presentados en la Tabla 5.2.

Se utilizaron una cantidad de nueve flaneras (Figura 5.2), todas ellas colocadas dentro de la mufla y se corrieron incineraciones escalando en 2, 4, 6 y 8 h. de tal manera que pudiera observarse el comportamiento de la pérdida de masa del material



Figura 5.2 Efecto de la incineración de muestras BCA.

Tal como se puede observar en la tabla anterior, la pérdida de masa debido a incineración se mantiene en el orden del 50% a partir de las dos horas; sin embargo, se observa que algo sucede entre la cuarta y la sexta hora, porque a partir de ese punto, la masa del material se mantiene constante, incluso después de la octava hora (Anexo C).

Es menester señalar que, este dato de pérdida de masa del material tiene el objetivo de mostrar el comportamiento del material resultante de la incineración, con la intención de prever el tiempo necesitado para incinerar la cantidad de material requerido por la norma ASTM C311.

Tabla 5.2 Efecto de la incineración en la masa de la corteza de bambú.

MUESTRA	PESO	PÉRDIDA		PÉRDIDA		PÉRDIDA		PÉRDIDA	
	NETO, g	2hrs	(%)	4hrs	(%)	6hrs	(%)	8hrs	(%)
1	51.0	-	-	-	-	7.1	86%	-	-
2	56.0	-	-	-	-	6.7	88%	6.7	88%
3	42.7	-	-	-	-	6.1	86%	6.1	86%
4	28.2	-	-	10.8	62%	-	-	-	-
5	36.7	-	-	11.1	70%	-	-	-	-
6	23.7	-	-	10.5	56%	-	-	-	-
7	31.6	16.9	47%	-	-	-	-	-	-
8	22	16.4	25%	-	-	-	-	-	-
9	29.1	17.1	41%	-	-	-	-	-	-

Este dato nada tiene que ver con lo requerido por la norma como **Pérdida por calcinación**, que ya se ha citado en los resultados de otras investigaciones, ya que, para la obtención de ese dato en particular, la metodología a seguir es distinta.

5.3 Molienda y tamizado.

Para la acción de molienda propuesta, es necesaria la utilización de un mortero de cerámica y, aunque ésta técnica no es la más ampliamente recomendada para la óptima utilización del material; la opción más recomendada (utilización de molino de bolas) estaba fuera del alcance de esta investigación.

Debido a que la técnica utilizada dista de ser la científicamente más confiable, fue imposible utilizar el 100% de la muestra resultante de la incineración, los porcentajes de material que supera el cribado sobre la malla no. 200 se mantuvieron en el orden del 50% aproximadamente.

La norma ASTM C311 menciona, en su apartado sexto, que se debe de efectuar el tamizado del material por la malla no. 200, esto para asegurar que el tamaño de la partícula de puzolana se mantenga en el rango de los 0.09 mm, tamaño similar al de la partícula de cemento. Además, cumpliendo con el requisito de la norma ASTM C618, la finura del material fue observada, al hacerla pasar por la mañana no. 325, observando los siguientes resultados (Tabla 5.3)

Tabla 5.3 Porcentajes de retenidos en el tamizado

Malla	BCA-2, %retenido	BCA-4, %retenido	BCA-6, %retenido
No. 200	57.76	51.93	47.84
No. 325	28.9	25.63	32.91
Fondo	13.34	22.44	19.25

*La muestra de BCA-8 no pudo ser tamizada, debido a la pequeña cantidad de material resultante de la incineración (Figura 5.3)



Figura 5.3 Muestra BCA-8 después de calcinación.

Como puede observarse en los resultados de la tabla anterior, las tres muestras cribadas cumplen con el requisito establecido en la norma ASTM C618, que establece una cantidad máxima del 34.00% de material retenido en la malla no. 325; sin embargo, aun cuando todas las muestras cumplen con esta característica, se deben de tomar en cuenta los porcentajes retenidos en la malla no. 200 ya que, esto significa una mayor cantidad de material a incinerar.

De los ya de por sí bajos porcentajes de material que resiste la acción de la temperatura, se debe considerar que por lo menos el 50% de este no entra dentro del tamaño de partícula óptimo necesario para poder ser utilizado en la fabricación de morteros.

5.4 Análisis de composición química (FRX)

Por medio del análisis de Fluorescencia de rayos X (FRX) realizado con el equipo Bruker X-flash Puma S2 (Figura 5.4), con un tubo de rayos X con potencia de 500W y excitación de hasta 50kV. Se logra determinar la cantidad, en porcentaje, de los componentes químicos presentes en la ceniza, tal como se muestra en la tabla 5.5.

Para la colocación de las muestras dentro del equipo, es necesaria la utilización de una prensa mecánica, en orden de llevar las muestras de un estado sólido suelto, a una forma compactada, del tamaño de una pastilla (figura 5.5 y 5.6).

Para el análisis por fluorescencia de rayos X, se hizo necesario el conocimiento de las dimensiones y peso de cada una de las “pastillas” de material a ensayar (Tabla 5.4)

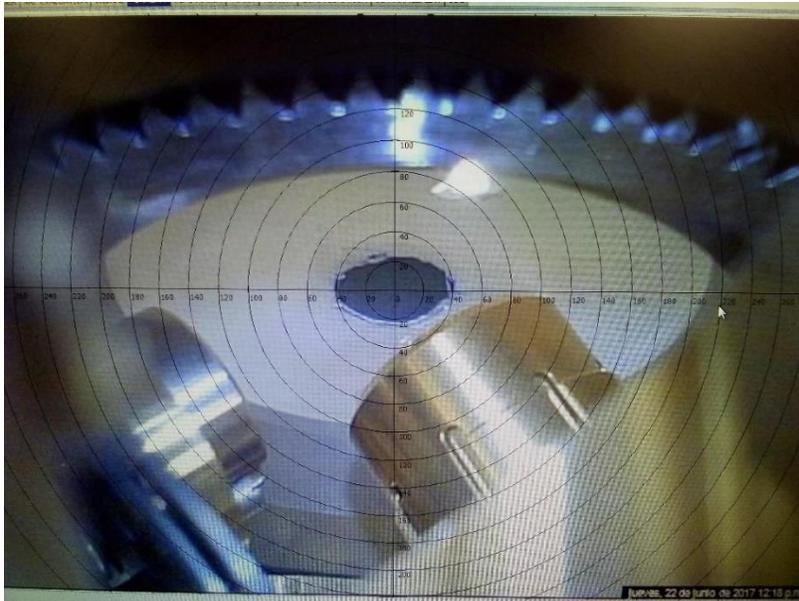


Figura 5.4 Muestra dentro del equipo Bruker X-Flash Pusa S2

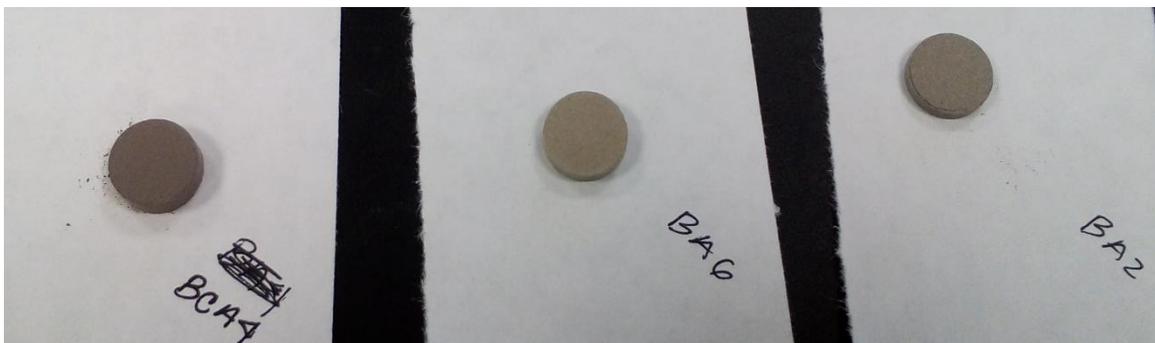


Figura 5.5 Muestras compactadas BCA-4, BCA-6, BCA-2.



Figura 5.6 Prensa mecánica

Tabla 5.4 Dimensiones y peso de las muestras de BCA

Muestra	Dimensiones		Peso (g)
	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	
BCA-2	130	1.8	0.3
BCA-4	130	3.81	0.642
BCA-6	130	2.6	0.479
BCA-8	130	2.18	0.27

Tabla 5.5 Resultados de análisis de composición química por FRX

Composición química	BCA 2h (%)	BCA 4h (%)	BCA 6h (%)	BCA 8h (%)
<i>SiO₂</i>	75.81	60.24	58.59	87.95
<i>Al₂O₃</i>	1.04	5.86	6.85	1.31
<i>Fe₂O₃</i>	0.4	8.21	12.12	0.51
<i>CaO</i>	1.47	4.9	6.19	1.16
<i>K₂O</i>	11.61	8.28	6.89	6.89
<i>P₂O₅</i>	4.27	2.37	-	-
<i>SO₃</i>	2.67	1.82	-	-
<i>MgO</i>	1.48	2.6	3.14	1.21
<i>Na₂O</i>	0.72	4.76	5.82	0.82
<i>TiO₂</i>	-	0.38	-	-
<i>Cl</i>	0.24	0.06	0.01	0.05
<i>CuO</i>	0.09	-	-	-
<i>ZnO</i>	0.09	0.18	-	-
<i>MnO</i>	0.09	0.32	0.39	0.08
<i>Rb₂O</i>	0.05	-	-	-
<i>ZrO₂</i>	-	0.02	-	-

En base a la norma ASTM C618, se logra una revisión de las propiedades de la ceniza, obteniendo la siguiente información.

La suma de los óxidos de sílice, aluminio y hierro (III) debe de ser superior al 70.00% para cenizas tipo N, por lo tanto, con base a esta especificación, y luego de haber obtenido porcentajes mayores a ésta, para todos los casos, se puede inferir que la ceniza de la corteza de bambú puede catalogarse como material puzolánico.

La cantidad de *SO₃* para todos los casos es menor al 4.00%.

La información recabada del análisis de composición química de la ceniza de la corteza del bambú permite inferir que este material puede ser considerado como puzolana; sin embargo, hay pruebas que aún deben ser realizadas para poder verificar el grado de reactividad de la misma.

5.5 Análisis de estructura mineralógica (DRX)

La determinación de las fases cristalinas, estudiada por Difracción de rayos X (DRX), se lleva a cabo para las cuatro muestras de BCA. Las muestras se empaquetaron densamente en un soporte de Al. Los difractogramas toman una amplitud de 5 a 80 ° en una escala de 2θ y 0,02 de tamaño de paso.

Esta técnica permite la identificación de los componentes químicos más representativos de las muestras. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.7.

A grandes rasgos todas las muestras presentan un comportamiento amorfo, sin embargo, existen minerales que pueden ser identificados.

5.5.1 Análisis de los principales minerales.

La cuantificación de los componentes químicos de la ceniza permite identificar cuáles de éstos aparecen con mayor intensidad en el conteo realizado a través de DRX. Los principales componentes mostrados en la figura 5.5 tienen a la Cristobalita, Cuarzo, Óxido de sílice, Hematita y Wuestita como los elementos con los “picos” más pronunciados.

- Cristobalita: Corresponde al compuesto de Óxido de silicio de forma tetragonal, identificado en el *Powder Diffraction Standart* con la ficha número 82-1232.
- Cuarzo: Se identifican dos “picos” correspondientes a dos variantes de cuarzo; ambos correspondientes al compuesto de Óxido de silicio, en forma hexagonal, ambas se diferencian en su densidad y volumen; cuyas fichas corresponden al número 79-1912 y 85-0865, respectivamente.
- Óxido de sílice (Stishotiva): identificado con el pico en Theta= 30.885, de la forma tetragonal, identificado con la ficha no. 82-0513.
- Hematita: del compuesto de Óxido Férrico (Fe_2O_3), de la forma romboidal, cuya ficha corresponde a la numero 72-0469
- Wuestita: del compuesto del Óxido de fierro (FeO), de forma cúbica, cuya ficha es la numero 74-1886.

Para más datos referentes a estos compuestos químicos, en el Anexo D, se adjunta este documento las fichas de *Powder Diffraction Standart*.

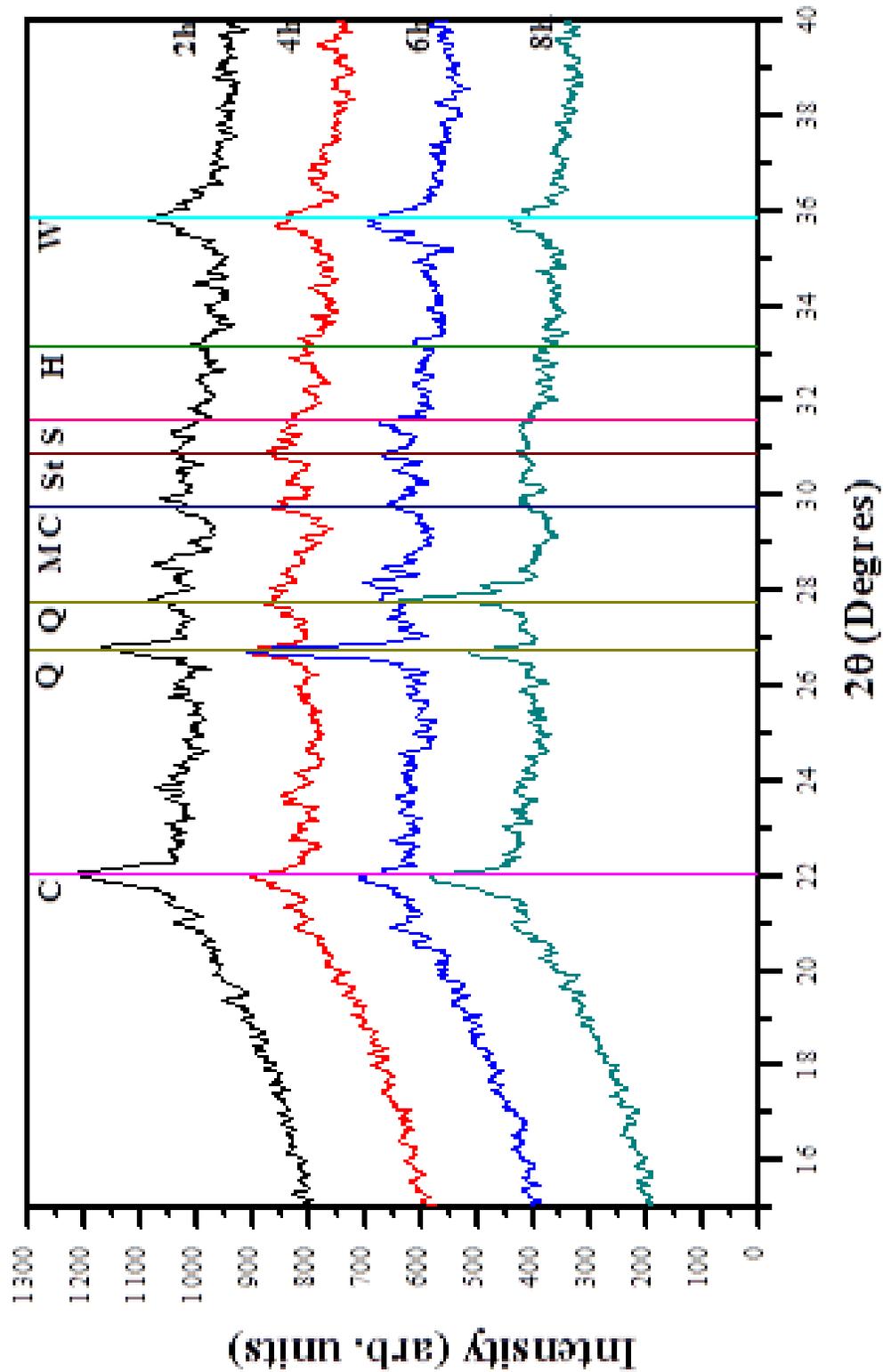


Figura 5.7 Patrones de difracción de rayos x de ceniza de corteza de bambú para cuatro diferentes tiempos de incineración, 2, 4 6 y 8h. (C: Cristobalita, Q: Cuarzo, H: Hematita, W: Wuestita, St: Stishovita, S: SiO_2 , MC: Calcita)

5.6 Selección de muestra óptima.

Observando los resultados entregados por ambos análisis de rayos X, y en correspondencia con el desempeño del material al ser calcinado, se opta por tomar a la muestra **BCA-6** como la óptima para ser muestreada en cubos de mortero, fungiendo como material sustituto del cemento en un 20% de su peso.

Ahora, esta decisión no ha sido tomada a la ligera, los puntos que se evaluaron de todos los análisis previos fueron los siguientes:

¿Porqué BCA-6?

- Desempeño de incineración: Entre la muestra BCA-4 y la muestra BCA-6 sigue existiendo diferencias de masa, que se traducen en pérdidas de material; esto quiere decir que se sigue perdiendo materia orgánica; sin embargo, a partir de la sexta hora de incineración, la muestra se mantiene en masa constante, lo cual se traduce en una pérdida total de materia orgánica, mientras que el calor aplicado afecta ahora directamente a la estructura cristalina de los minerales.
- Fluorescencia de rayos X: Aun cuando las cuatro muestras mostraron unos contenidos de óxidos remarcables, ya que todas las muestras cumplieron con lo establecido en la norma ASTM C618, y mantuvieron por arriba del 70.00% la suma de los óxidos de silicio, aluminio y fierro. La muestra BCA-6 muestra un mayor contenido de Fe_2O_3 , sobre todo si se compara con los contenidos analizados de una puzolana natural. Tabla 5.6.
- Difracción de rayos X: Los difractogramas (Figura 5.5) muestran un comportamiento propio de un material amorfo (para todos los casos), con algunos “picos” identificables, de los cuales el más pronunciado se presenta en la línea de la muestra BCA-6, el cual se ha identificado como Cuarzo de forma hexagonal. Lo cual no significa que exista un mayor contenido de este mineral, sino una fase cristalina identificable de mejor manera, “más cristalina” que las demás, lo cual habla de una re-cristalización de la muestra por efecto de la temperatura de incineración, lo que planea una posible interacción de estas fases activas con el cemento en las mezclas de mortero.

Tabla 5.6 Comparación de la composición química de la muestra BCA-6 y puzolana natural.

Composición química	Puzolana Natural (%)	BCA 6h (%)
SiO_2	50.55	58.59
Al_2O_3	30.74	6.85
Fe_2O_3	0.54	12.12
CaO	0.36	6.19
K_2O	2.81	6.89

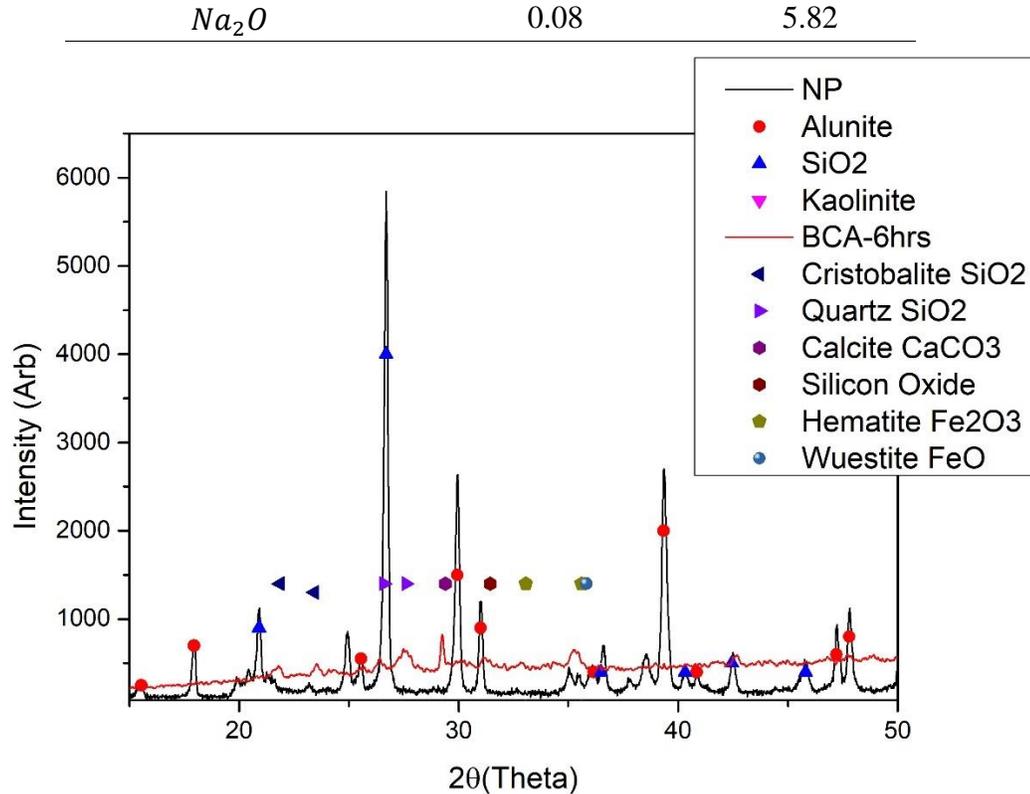


Figura 5.8 Comparación de difractogramas entre puzolana natural y muestra BCA-6

5.7 Evaluación de la resistencia a la compresión en cubos de mortero (Índice de Actividad de Resistencia).

Posterior a la caracterización química de la ceniza de la corteza de bambú, es importante determinar si el material, además de tener un alto contenido de Sílice, se comporta adecuadamente al interior de una mezcla de mortero, verificando que las condiciones teóricas de formación de gel hidratado de calcio (C-S-H), responsable de la resistencia del mortero y el concreto realmente se presenten, demostrando con ello la actividad puzolánica del material.

Existen dos alternativas para hallar el índice de actividad de resistencia, la primera es usar la ceniza como material de adición al material cementante en la mezcla de mortero, y la segunda es usarlo como material de reemplazo del cemento, para el proyecto es utilizada la segunda alternativa, reemplazando un 20,00% del peso del cemento por ceniza de corteza de bambú.

La elaboración de los cubos de mortero se realizó con base en la ASTM C109, elaborando seis cubos de mortero para la mezcla de control y otros seis para la mezcla con la ceniza. Los doce cubos se fallaron a 7 días (Figuras 5.9 y 5.10)



Figura 5.9 Moldes cúbicos



Figura 5.10 Materiales necesarios para la elaboración de especímenes de mortero.

La proporción seleccionada se muestra en la sección 4.1.7; la relación agua/cemento de la mezcla de control fue de 0.484. La relación agua/cemento de la mezcla ceniza-cemento está en función del alcance del $\pm 5.00\%$ de la fluidez de la mezcla de control (ASTM C311), agregando hasta el 115.00% de agua del control (ASTM C618). En una primera mezcla (Mezcla A) de ceniza-cemento, se adicionan 25mL de agua para el mezclado, observando una relación A/C de 0.53 (Figura 5.11 y 5.12), para una segunda mezcla (Mezcla B) se adiciona la cantidad máxima de agua permitida, o sea 278.30mL alcanzado una relación agua/cemento de 0.553.



- Cemento 500.0 g.
- Arena 1375.0 g.
- Agua 242.0 ml. +1.0 de absorción de la arena.

Figura 5.11 Materiales mezcla de mortero (control)



Figura 5.12 Cantidades para elaboración de mortero de ensayo (ceniza)

Para la mezcla de control, el dato de fluidez, se mantiene en 101.1%, mientras que para la mezcla “A”, con reemplazo de ceniza se obtuvo el 72.42%. Con el dato de fluidez debajo del rango establecido por la norma ASTM C618, se dispuso al elaborar otra mezcla (Mezcla “B”) que incorpore 278.30 mL (115.00% mayor que la mezcla de control), encontrando un dato de fluidez del 83.71%; dicho dato se mantiene aún por debajo del rango establecido, sin embargo, las condiciones de trabajabilidad se mejoran de tal manera que se propone realizar las pruebas de resistencia a la compresión en ambas mezclas.

Los especímenes fueron almacenados en un cuarto húmedo de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas, posteriormente se retiraron de los moldes y se almacenaron en un recipiente plástico que contiene agua saturada con cal, tal como lo especifica la norma, hasta el día en que fueron fallados (Figura 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16)



Figura 5.13 Especímenes de mortero. Mezcla de control.



Figura 5.14 Especímenes de mortero. Mezcla de ensayo A (ceniza-cemento)



Figura 5.15 Especímenes de mortero. Mezcla de ensayo B (ceniza-cemento)



Figura 5.16 Curado de especímenes en agua saturada con cal.

Para determinar la resistencia a la compresión, se fallaron los 12 especímenes, 6 de control y 6 con ceniza, a 7 días de elaborados. Los resultados se presentan en la siguiente tabla 5.7, 5.8 y 5.9.

Tabla 5.7 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para cubos de morteros, mezcla de control.

Mezcla de control				
Cubo no.	Peso(g)	Densidad (g/cm ³)	Carga (kg)	f _c (kg/cm ²)
1	282.13	2.152078615	4620.6	179.144412
2	291.41	2.222866158	3873.6	150.447947
3	289.48	2.20814418	4386	169.586588
PROMEDIO				166.392982

Tabla 5.8 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para cubos de morteros, mezcla de ensayo A.

Mezcla de ensayo A				
Cubo no.	Peso(g)	Densidad (g/cm ³)	Carga (kg)	f _C (kg/cm ²)
1	277.83	2.119278353	2359	93.77
2	274.91	2.097004686	2299	90.26
3	278.48	2.124236532	2078	84.03
PROMEDIO				89.36

Tabla 5.9 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para cubos de morteros, mezcla de ensayo B.

Mezcla de ensayo B				
Cubo no.	Peso(g)	Densidad (g/cm ³)	Carga (kg)	f _C (kg/cm ²)
1	293.32	2.237435577	4341.9	162.45
2	288.29	2.199066898	4194.9	159.42
3	288.58	2.201279009	4410.1	168.54
PROMEDIO				163.47

El índice de actividad de resistencia (I.A.R.) para la mezcla de ensayo A se mantiene por debajo del 75.00% impuesto por la norma ASTM C618, alcanzando apenas 52.10% de la resistencia a la compresión de los especímenes de control.

El índice de actividad de resistencia (I.A.R.) para la mezcla de ensayo B alcanza el 98.24% de la resistencia a la compresión de los especímenes de control, sobrepasando el 75.00% establecido por la norma ASTM C618.

En orden de tener un mayor sustento en los resultados anteriores, se decide aplicar este método de evaluación de actividad puzolánica a morteros que utilicen sustitución de cemento por puzolana natural, encontrando los siguientes resultados (Tabla 5.10)

El índice de actividad de resistencia (I.A.R.) para la mezcla de ensayo con sustitución por puzolana natural alcanza el 77.40%, lo cual indica un comportamiento puzolánico del material.

Tabla 5.10 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para cubos de morteros, mezcla de sustitución con puzolana natural.

PUZOLANA NATURAL				
Cubo no.	Peso(g)	Densidad (g/cm ³)	Carga (kg)	f _c (kg/cm ²)
1	286.27	2.18	3561.05	134.79
2	281.46	2.15	3989.45	151.89
3	290.18	2.21	2640.9	99.68
PROMEDIO				128.79

Con todos los resultados mencionados anteriormente, así como evaluar la actividad puzolánica del material, también se puede estimar si el material cumple con los requerimientos físicos asentados en la norma ASTM C618 (véase tabla 3.4), los cuales presentan resultados satisfactorios (Tabla 5.11)

Tabla 5.11 Resultados de requerimientos físicos, ASTM C618.

Material	ASTM C618 Clase N	BCA2h (%)	BCA4h (%)	BCA6h (%)
1 Finura (cantidad retenida máxima cribada húmeda en la malla no 325)	34%	28.9	25.65	32.91
2 Índice de actividad resistente (con cemento portland, a 7 días, mínimo, porcentaje del control)	75%	-	-	(A)52.10 / (B) 98.24
3 Agua requerida, máximo, porcentaje del control	115%	-	-	(A)110.3 / (B)115

5.8 Evaluación de la actividad puzolánica a través de la Prueba de Frattini.

Posterior a la caracterización física y química de la ceniza de corteza de bambú, y con base en los resultados negativos encontrados en la prueba del Índice de Actividad Resistente de parte de la mezcla A, se hace el análisis químico de la actividad puzolánica del material, utilizando para este fin, el método de Frattini, ya mencionado; de tal manera que se pueda discutir sobre la influencia que tiene el agua de mezcla en el desarrollo de la resistencia a la compresión de los morteros utilizados.

Se elaboraron las 9 muestras (6 de BCA-6hrs y 3 de cemento: control), con la intención de ser muestreadas a los siete días (Figura 5.19)



Figura 5.17 Curado en saturación de muestras combinación cemento-BCA 80-20(%) y muestras de control (cemento-100%)

Durante la espera de siete días indicada por la norma NTC 1512 (2003) se realizaron las disoluciones indicadas en la norma (Figura 5.10)

- Ácido clorhídrico (HCl) 0.1 N
- Solución indicadora de anaranjado de metilo
- Solución de hidróxido de amonio (NH₄OH) 1:1
- Solución de oxalato de amonio (C₂H₈N₂O₄) al 5%
- Solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 1:1
- Permanganato de potasio (KMnO₄) 0.05N
- Agua destilada

Para lo cual se hizo necesario el apoyo de las siguientes instancias, en orden de conseguir todos los reactivos.

- Facultad de Química de la U.A.Q:
 - Solución indicadora de anaranjado de metilo
 - Oxalato de amonio (cristalino)
 - Agua destilada
- Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, U.N.A.M.:
 - Hidróxido de amonio
 - Permanganato de potasio
- Laboratorio GRUTAR:
 - Ácido clorhídrico
 - Ácido sulfúrico



Figura 5.18 Reactivos preparados

5.7.1 Preparación de reactivos

5.7.1.1 Solución de ácido clorhídrico 0.1N

Cálculo

El HCl grado reactivo tiene una concentración de 37.0%, lo cual equivale a una solución 12.19M.

Entonces, para medio litro de solución 0.1N el volumen necesario es:

$$V = \frac{(0.1N)(500mL)}{(12.19N)} = 4.10 \text{ mL} \quad \text{Ec. 2}$$

Preparación

Coloque en un matraz aforador de 500mL, aproximadamente 200mL de agua destilada; adicione 4.10mL de HCl concentrado, agite y complete el volumen con agua destilada; homogenice la solución.

5.7.1.2 Solución de hidróxido de amonio 1:1

Cálculo

Esta solución se prepara a partes iguales de volumen entre hidróxido de amonio y agua destilada.

Preparación

Coloque en un matraz aforador de 100 mL, aproximadamente 20 mL de agua destilada, adicione 50mL de hidróxido de amonio, agite y complete el volumen con agua destilada

5.7.1.3 Solución de oxalato de amonio 5%

Preparación

Pesar en una balanza 25.0 gramos de oxalato de amonio; en un vaso de precipitados, colocar 200mL de agua destilada, agregar los cristales de oxalato de amonio al vaso de precipitados, colocar el vaso sobre una mesa agitadora y calentar el vaso hasta que homogenice, pasar la solución a un vaso aforador de 500mL y completar el volumen con agua destilada, agitar para homogenizar.

5.7.1.4 Solución de ácido sulfúrico 1:1

Cálculo

Esta solución se prepara a partes iguales de volumen entre ácido sulfúrico y agua destilada. Teniendo cuidado con la reacción exotérmica que genera calor.

Preparación

Coloque en un matraz aforador de 500mL, aproximadamente 200mL de agua destilada, adicione 250mL de ácido sulfúrico concentrado, agite y complete el volumen con agua destilada, homogenice la solución agitándola debajo de un chorro de agua corriente, para contrarrestar la reacción exotérmica que genera calor.

5.7.1.5 Solución de permanganato de potasio 0.05

Cálculo

Preparación

1. Pese 1.6 g de $KMnO_4$ en una balanza y disuelva en un litro de agua destilada en un vaso de precipitado de 2 litros. 2. Caliente la solución hasta que hierva, mantenga el calor
2. Caliente la solución hasta que hierva, mantenga el calor durante una hora (en un baño maría) y déjese enfriar. El calentamiento de la solución acelera la oxidación de cualquier materia orgánica presente y ayuda a la coagulación del óxido de manganeso (IV).
3. Filtre a través de un crisol con fondo de vidrio poroso aplicando vacío o por gravedad en un embudo conteniendo un trozo de lana de vidrio empacado en el fondo. Todas las operaciones deben efectuarse con recipientes perfectamente limpios y cuidando de no introducir materia orgánica. No filtre sobre papel.
4. La solución así preparada se guarda en un frasco limpio y ámbar en la oscuridad, puede retener su fuerza oxidante durante tres semanas después de lo cual se recomienda valorarla.

5.7.1.6 Solución indicadora de anaranjado de metilo y agua destilada

Ambos reactivos se encontraban preparados y listos para su disposición.

5.7.2 Valoración de soluciones titulantes

Antes de comenzar con las pruebas, es necesario valorar las soluciones que indican tanto la alcalinidad total, como la cantidad de CaO presente en las muestras; por

ello se llevaron a cabo los siguientes análisis, los cuales muestran como resultado, las concentraciones reales de ambas soluciones.

5.7.2.1 Valoración de ácido clorhídrico 0.1N

Para la valoración del ácido clorhídrico al 0.1N, se hace necesaria la preparación de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 0.1N, la cual se realiza de la siguiente manera:

En una balanza pesar un vaso de precipitados de 500 mL. Pesar en el vaso 2.65 g. de Na_2CO_3 . Disolver cuidadosamente con agua destilada y hervida durante 10 minutos para liberar el CO_2 . La reacción es exotérmica. Dejar enfriar la solución. Transferir a un matraz aforado de 500 mL y aforar con agua destilada. Utilizar anaranjado de metilo como indicador, 2 gotas.

En este caso se toma la siguiente ecuación:

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

C_1 : Concentración de HCl

V_1 : Volumen de la solución de HCl empleada en la valoración

C_2 : Concentración de NaOH

V_2 : Volumen de la solución de NaOH empleada en la valoración

Para hacer esta valoración deben de registrarse los valores de ambos volúmenes, así como la concentración del NaOH, despejando de la ecuación (Ec. 3) la concentración del HCl, por lo tanto:

$$C_1 = \frac{C_2V_2}{V_1}$$

Al realizar este proceso de valoración se encontraron los siguientes consumos (Tabla 5.12)

Tabla 5.12 Valoración de HCl

Solución	Concentración(N)	Volumen (mL)
HCl	X	9.966*
Na_2CO_3	0.1	10

*promedio de tres corridas experimentales

Como resultado de la valoración del HCl, se determinó que la concentración real es de 0.09966N

5.7.2.2 Valoración de permanganato de potasio 0.05N

Para la valoración del permanganato de potasio al 0.05N es necesario utilizar oxalato de sodio anhidro ($Na_2C_2O_4$), considerado como un patrón primario debido a su alto grado de pureza y estabilidad al aire. La preparación de la solución de oxalato de sodio al 0.05N se realiza de la siguiente manera:

Se pesan 1.68 gramos en una balanza, transfiera a un vaso de precipitados de 500mL y adicione 200mL de agua destilada, disuelva la sal y transfiera a un vaso aforador de 500mL, agregue agua hasta la marca de aforo.

Al realizar la valoración se encontraron los siguientes consumos (Tabla 5.13)

Tabla 5.13 Valoración de $KMnO_4$

Solución	Concentración(N)	Volumen (mL)
$KMnO_4$	X	17.46*
$Na_2C_2O_4$	0.05	20

*promedio de tres corridas experimentales

Como resultado de la valoración del permanganato de potasio, se determina que la concentración real de la solución es de 0.0572N

5.7.3 Resultados de la prueba de Frattini

A continuación, se muestran los resultados (Tabla 5.14) en los consumos de reactivos empleados en el método, para la determinación de la alcalinidad total (Ia) y el contenido de óxido de calcio (CaO) o índice puzolánico, en mini moles de CaO/l.

Tabla 5.14 Cálculo de resultados de la prueba de Frattini para BCA-6hrs

Muestra	mL de solución de Ia	mL de solución de Ip	mL de $KMnO_4$	mL de HCl	Cálculo Ia	E	Cálculo Ip
BCA6-1	50	200	9.2	40.9	81.8	0.0005244	1.72
BCA6-2	50	200	9	40.9	81.8	0.000513	1.64
BCA6-3	50	200	10.1	41.2	82.4	0.000575	2.07

Para corroborar aún más estos datos, se corrieron pruebas para otros tres distintos materiales (Tabla 5.15):

1. Puzolana Natural (NP), misma con la que se comparada el material BCA-6hrs, en una proporción del 80-20.
2. Arena Sílica (A), misma con que se elaboran los especímenes de mortero, en proporción del 80-20.
3. Cemento (C), mismo con que se elaboran los especímenes de mortero, en proporción 100-0 (control)

Encontrando lo siguientes resultados:

Tabla 5.15 Cálculo de resultados de la prueba de Frattini para PN, A y C

Muestra	ml Solución Ia	ml Solución Ip	KMnO4 ml	HCl ml	Calculo Ia	E	Calculo Ip
CPC1	50	200	17.9	34.8	69.6	0.0010203	6.52266347 5
CPC2	50	200	17.3	34.6	69.2	0.0009861	6.09269172 3
CPC3	50	200	17.1	34.5	69.0	0.0009747	5.95263452 4
A1	50	200	19.2	32.8	65.6	0.00114	7.74080666 8
A2	50	200	19.6	31.5	63	0.000855	7.82040312 8
A3	50	200	19.4	31.2	62.4	0.00041667	7.66161735
NP1	50	200	11.2	35.4	70.8	0.0006384	2.553601
NP2	50	200	10.2	34.7	69.4	0.0005814	2.117958
NP3	50	200	15.2	34.6	69.2	0.0008664	4.703316

Una vez encontrados los datos de alcalinidad e índice puzolánico, se indican los puntos en la gráfica de solubilidad de $Ca(OH)_2$; haciendo un promedio de las tres lecturas, (Figura 5.11)

Como puede observarse, haciendo referencia a lo indicado en la norma Bs En 196-5 y la NTC 1512, los puntos que se encuentran cerca o por encima de la isoterma, corresponden a materiales que no presentan actividad puzolánica, en este caso, este punto corresponde a la arena, que de antemano se conoce su nula actividad puzolánica dado a que se constituye de partículas cristalinas de SiO_2 . El punto correspondiente al cemento cae por debajo, pero muy cercano a la línea, esto corrobora que las pruebas se corrieron con buena precisión, ya que justamente la isoterma corresponde al comportamiento del cemento. Por último, los puntos tanto de la puzolana natural, como del material de ceniza de corteza de bambú, se encuentran por debajo de la línea isoterma, lo cual indica que ambos materiales tienen alta actividad puzolánica.

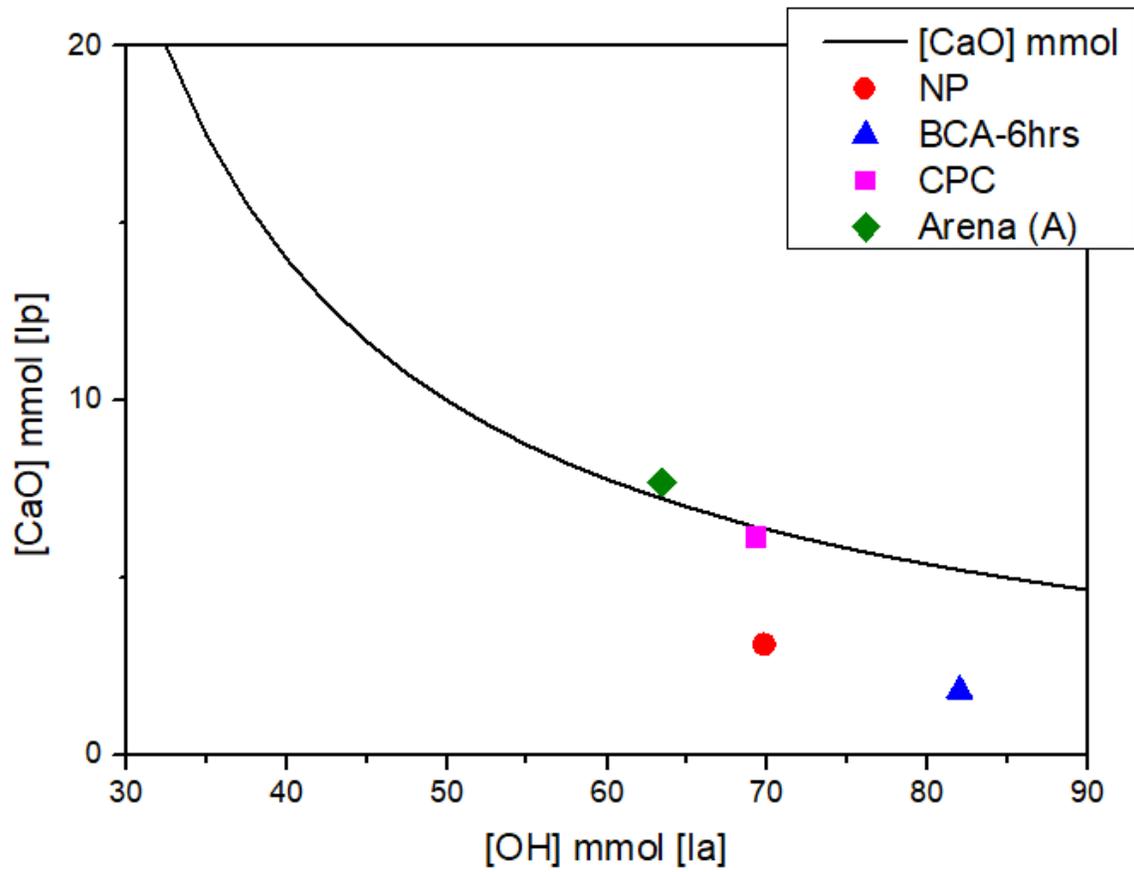


Figura 5.19 Resultados prueba de Frattini: Puzolana Natural (NP), Ceniza de corteza de bambú (BCA-6hrs), Cemento (CPC), Arena sílica (A).

6. CONCLUSIONES

Como bien se describe en la sección 1.3, los objetivos principales del presente trabajo de investigación, son: el de caracterizar a este nuevo material, la ceniza de la corteza del bambú, buscando los datos adecuados, que indiquen si éste constituye una puzolana, de acuerdo con la norma ASTM C618 y, el determinar la actividad puzolánica del mismo.

Para ello, ha sido necesaria la implementación de distintas técnicas y análisis físico-químicos, como: el análisis de la composición química a través de la fluorescencia de rayos X (FRX); el estudio de la estructura mineralógica con la ayuda del análisis por difracción de rayos X (DRX); ambos destinados a la caracterización del material; y la aplicación de las técnicas de la prueba de Frattini y del Índice de Actividad Resistente (IAR), en orden de identificar la actividad puzolánica presente.

El conocimiento adquirido a partir de los estudios previos, descritos en el capítulo número dos de este trabajo, permite identificar y seleccionar de mejor manera a los estudios pertinentes, de caracterización y análisis del material, necesarios; y que pueden entregar como resultado la consecución de los objetivos predispuestos, de la manera más congruente, rápida y adecuada.

No obstante, el proceso por el cual ha pasado esta investigación ha sido experimental, en todos sus aspectos; inicialmente se plantearon escenarios de estudio, con resultados que disponían de poco tiempo para ser alcanzados; sin embargo, el reconocimiento de los alcances y limitaciones de la investigación, han servido para poder aprovechar el factor tiempo a favor del estudio. Además, aprovechando la fundamentación teórica, descrita en el capítulo número tres, ha sido posible la interacción entre lo sabido y la nueva información, de la cual este estudio es producto, ya que ha ayudado a reconocer la veracidad de lo trabajado, ya que de antemano describen los posibles resultados, así como señalan los posibles errores.

De este acercamiento a la caracterización y estudio de la actividad puzolánica de la ceniza de corteza de bambú, se ha generado un valioso aprendizaje, logrando identificar algunos puntos importantes durante todo el proceso, como:

- La obtención del material: Al principio, es dispuesto un material tipo, cortado con equipo y con un espesor de 5.00 mm; sin embargo, es desechado, debido a la poca cantidad de material, el cual no alcanza para todas las corridas experimentales. Por ello, se hace necesaria la extracción del material, directamente del tallo del bambú, por medios manuales, obteniendo la cantidad de material requerida para la experimentación, así mismo, cumpliendo con el espesor establecido en los trabajos previos.
- El tiempo de incineración: Es la actividad que mayor tiempo requiere dentro de esta investigación, principalmente debido a la condición de la mufla, la cual presenta cierto deterioro en su funcionamiento, haciendo

que las escalas de incremento de temperatura sean muy lentas; todos esos tiempos, además, sujetos a la disposición tanto de la mufla como de los encargados del laboratorio.

- La molienda: El procedimiento empleado en esta investigación dista mucho de ser el adecuado para este tipo de trabajos, la utilización de un mortero de cerámica hace que la actividad de molienda resulte tardada y con un margen de recuperación del material muy bajo. La técnica más adecuada es la implementación de un molino de bolas giratorio, el cual hace un trabajo más preciso y en un periodo de tiempo más corto, además de que se asegura un margen de recuperación de casi la totalidad de la muestra de material.

Habiendo resuelto y corregido estos pasos, se logra que la ceniza de corteza del bambú, obtenga una suma de sus componentes: $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$, superior al 70.00%, para todos los tiempos de calcinación experimentados para cenizas tipo N, dispuesto en la norma ASTM C618.

Además, en mayor o menor medida, todas las muestras de BCA, en sus distintos tiempos de incineración, muestran una estructura amorfa, lo cual caracteriza a este tipo de puzolanas calcinadas, proveyéndoles de una mayor actividad puzolánica.

Con base en estos resultados, primeramente, se caracteriza el material, en sus aspectos físicos y químicos; y se asegura que la ceniza de la corteza del bambú (*Guadua Angustifolia*) cumple con los requerimientos básicos estipulados (Véase Tabla 5.5) en la norma ASTM C618, clasificándola dentro de la Clase N, para materiales naturales o calcinados.

Al encontrar resultados negativos para una de las muestras en la prueba del Índice de Actividad Resistente (IAR), se opta por la aplicación de una segunda metodología que demuestre la actividad puzolánica del material, para la cual se selecciona la Prueba de Frattini, un análisis químico que observa la interacción del cemento y la puzolana, y la traduce en la concentración de iones de calcio Ca^{2+} presente en la solución acuosa en contacto con el cementante, de acuerdo a la cantidad máxima de hidróxido de calcio con la que una puzolana se puede combinar y a la velocidad a la cual ocurra esta reacción. De esta manera, los resultados del IAR pueden ser comparados, ya sea acordando con los resultados obtenidos, o demostrando algún tipo de falla en el proceso de la creación o curado de los especímenes de morteros usados.

Los resultados de la prueba de Frattini indican (véase figura 5.11) que la ceniza de corteza de bambú tiene alta actividad puzolánica al quedar debajo de la isoterma de saturación. Esto quiere decir, que existe alguna falla en el proceso de la creación, principalmente en la adición de agua para mezclado de los especímenes de mortero, en la cual radica la única diferencia entre la muestra A y la muestra B, utilizadas en la sección

5.7; estimándolo como un punto medular en la consecución de mayores resistencias a la compresión.

Ahora bien, los resultados obtenidos de caracterización, composición química y estructura mineralógica, son comparados con otro material, en este caso con una puzolana natural, la cual representa un material anteriormente estudiado y el cual presenta resultados satisfactorios en ambos rubros. (véase sección 5.6)

En cuanto a los resultados de la evaluación de actividad puzolánica; haciendo una comparación entre los resultados del I.A.R y del método de Frattini, entre ambos materiales puede ser observada una relación entre ellos; ya que, un menor porcentaje de I.A.R., en el caso de la puzolana, corresponde a un punto más cercano a la isoterma de saturación en la prueba de Frattini y viceversa, para el caso de la ceniza de corteza de bambú.

Para concluir, la caracterización la ceniza de corteza de bambú, presenta un material de alto contenido de sílice, aluminio y hierro, clasificándola como una puzolana clase N, según la norma ASTM C618. El material presenta una alta actividad puzolánica, de manera química y física, demostrada a partir de la aplicación de los métodos estipulados en las normas BS En 196:5 o NTC 1512 y ASTM C618, respectivamente.

Se recomienda que:

- Se utilice un proceso de molienda más efectivo
- En el proceso de elaboración de mezclas con el remplazo de este tipo de puzolanas, no se escatime en el agua para mezclado, sino que se use el máximo permitido, ya que este tipo de mortero presentan poca trabajabilidad y fluidez y se tenga mayor cuidado en el curado.
- Al ser comprobado que los contenidos de óxidos necesarios se muestran por encima del mínimo estipulado en la norma, se trabaje en la experimentación con distintos escenarios de temperatura, tomando como correspondencia los trabajos previos, así como éste.
- Experimentar con el IAR y prueba de Frattini, para las muestras de 2, 4 y 8 horas, determinando la actividad puzolánica de cada una de ellas.

Otros estudios futuros son:

- Diseño de mezclas de concreto con reemplazo de cemento portland por ceniza de corteza de bambú.
- Estudio y aplicación de la prueba de Frattini a otro tipo de materiales residuo de actividades agrícolas, como bagazo de caña de azúcar, cascarilla de arroz; aplicación para otro tipo de materiales prometedores.
- Evaluación del efecto de la temperatura en el incremento o decremento de la actividad puzolánica.
- Análisis de la interacción suelo-ceniza para la estabilización de suelos.

7. ANEXOS

ANEXO A:

**NTC 1512. NORMA TÉCNICA COLOMBIANA.
CEMENTOS. ENSAYO QUÍMICO PARA DETERMINAR LA
ACTIVIDAD PUZOLÁNICA.**

**NORMA TÉCNICA
COLOMBIANA**

**NTC
1512**

2009-04-15

**CEMENTOS.
ENSAYO QUÍMICO PARA DETERMINAR LA
ACTIVIDAD PUZOLÁNICA**



E: CEMENTS. DETERMINATION OF PUZZOLANIC ACTIVITY.
CHEMICAL TEST

CORRESPONDENCIA:

DESCRIPTORES: cemento puzolánico; actividad
puzolánica; cemento.

I.C.S.: 91.100.10

Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)
Apartado 14237 Bogotá, D.C. - Tel. (571) 6076888 - Fax (571) 2221435

Prohibida su reproducción

Primera actualización
Editada 2009-04-28

PRÓLOGO

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, **ICONTEC**, es el organismo nacional de normalización, según el Decreto 2269 de 1993.

ICONTEC es una entidad de carácter privado, sin ánimo de lucro, cuya Misión es fundamental para brindar soporte y desarrollo al productor y protección al consumidor. Colabora con el sector gubernamental y apoya al sector privado del país, para lograr ventajas competitivas en los mercados interno y externo.

La representación de todos los sectores involucrados en el proceso de Normalización Técnica está garantizada por los Comités Técnicos y el período de Consulta Pública, este último caracterizado por la participación del público en general.

La NTC 1512 (Primera actualización) fue ratificada por el Consejo Directivo de 2009-04-15.

Esta norma está sujeta a ser actualizada permanentemente con el objeto de que responda en todo momento a las necesidades y exigencias actuales.

A continuación se relacionan las empresas que colaboraron en el estudio de esta norma a través de su participación en el Comité Técnico 99 Cementos que coordina el Instituto Colombiano de Productores de Cemento como Secretaría Técnica de Normalización.

CALDESA
CEMENTOS ANDINO
CEMENTOS ARGOS
CEMEX COLOMBIA

HOLCIM COLOMBIA
JOOST OOSTRA
SIKA COLOMBIA

Además de las anteriores, en Consulta Pública el Proyecto se puso a consideración de las siguientes empresas:

A.C.I.M. LTDA.
CAMACOL
CEMENTOS DEL ORIENTE S.A.
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
INDUSTRIAS ALIADAS S.A.

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO
MINISTERIO DE COMERCIO
MURCIA MURCIA S.A.
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

ICONTEC cuenta con un Centro de Información que pone a disposición de los interesados normas internacionales, regionales y nacionales y otros documentos relacionados.

DIRECCIÓN DE NORMALIZACIÓN

CONTENIDO

	Página
1. OBJETO	1
2. REFERENCIAS NORMATIVAS	1
3. ENSAYOS	1
3.1 PRINCIPIO DEL MÉTODO.....	1
3.2 APARATOS.....	2
3.3 REACTIVOS	2
3.4 PROCEDIMIENTO CLÁSICO	3
3.5 CÁLCULOS	4
3.6 PROCEDIMIENTO COMPLEXOMÉTRICO SIMPLIFICADO.....	5
DOCUMENTO DE REFERENCIA.....	7
FIGURA	
Figura 1. Gráfica de solubilidad de Ca (OH) ₂ en presencia de álcalis a 40 °C	5

**CEMENTOS.
ENSAYO QUÍMICO PARA DETERMINAR LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA**

1. OBJETO

1.1 Esta norma tiene por objeto establecer el método para determinar la actividad puzolánica en cementos puzolánicos, mediante el ensayo de *Frattini*.

1.2 Esta norma no pretende señalar todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario establecer las prácticas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias. Las mezclas frescas de cemento hidráulico son cáusticas y pueden causar irritaciones en la piel y tejidos, debido a exposición prolongada. Se recomienda el uso de guantes, traje de protección y protección visual. En cualquier caso, se debe tener asistencia médica idónea.

1.3 Los valores se deben expresar de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades véase la NTC 1000 (ISO 1000).

2. REFERENCIAS NORMATIVAS

Los siguientes documentos normativos referenciados son indispensables para la aplicación de esta norma. Para referencias fechadas, se aplica únicamente la edición citada. Para referencias no fechadas, se aplica la última edición del documento referenciado. (incluida cualquier corrección).

NTC 1000, Metrología. Sistema Internacional de Unidades (ISO 1000).

3. ENSAYOS

3.1 PRINCIPIO DEL MÉTODO

3.1.1 En este ensayo se determina la actividad puzolánica comparando la cantidad de hidróxido de calcio presente en una solución acuosa en contacto con el cemento hidratado, con la cantidad de hidróxido de calcio capaz de saturar un medio de la misma alcalinidad.

En un cemento puzolánico, la concentración de hidróxido de calcio en solución es siempre menor que la concentración de saturación.

3.2 APARATOS

3.2.1 Balanza sensible al 0,01 g.

3.2.2 Estufa con termostato capaz de mantener la temperatura a (40 ± 2) °C, preferiblemente de doble puerta.

3.2.3 Frasco Erlenmeyer de fondo plano, de vidrio resistente a los álcalis, de 250 ml a 300 ml de capacidad, con tapón de caucho o de corcho parafinado que asegure un cierre hermético.

3.2.3.1 En caso de no disponer de frasco Erlenmeyer de vidrio resistente a los álcalis, se puede utilizar frasco Erlenmeyer de vidrio común procediendo de la siguiente manera: Se recubren interiormente la totalidad de las paredes con aproximadamente 20 g de parafina, de punto de fusión no inferior a 55 °C, y permitiendo que el exceso solidifique en el fondo del frasco Erlenmeyer dando lugar a una superficie plana y nivelada.

3.2.3.2 En lugar del frasco Erlenmeyer de vidrio recubierto de parafina se puede utilizar un frasco Erlenmeyer plástico resistente a la temperatura del ensayo y a los álcalis del cemento. El polietileno es apropiado para las condiciones del ensayo, pero con cualquier plástico que resulte adecuado para tales condiciones, es indispensable que el frasco Erlenmeyer sea de fondo plano y se use un tapón de caucho, de corcho parafinado o tapa de rosca para asegurar un cierre hermético.

3.2.4 Embudo de placa filtrante, preferiblemente de cuerpo plástico.

3.2.5 Frasco Erlenmeyer con tubular lateral, para filtración con placa filtrante.

3.2.5 Pipetas aforadas, de 50 ml y 100 ml, preferiblemente plásticas.

3.2.6 Embudos, preferiblemente plásticos.

3.2.7 Vasos de vidrio resistente a los álcalis de 400 ml, o plásticos

3.2.8 Agitador magnético

3.2.9 Medidor de pH o cintas de indicador mixto para medición del pH

3.3 REACTIVOS

3.3.1 Solución de ácido clorhídrico aproximadamente 0,1 N.

3.3.2 Solución indicadora de anaranjado de metilo,

3.3.3 Solución de hidróxido de amonio 1:1

3.3.4 Solución de oxalato de amonio al 5 %.

3.3.5 Solución de ácido sulfúrico 1:1

3.3.6 Solución de permanganato de potasio aproximadamente 0,05 N.

3.3.7 Agua destilada.

3.3.8 Reactivos para método complexométrico alterno

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1512 (Primera actualización)

3.3.8.1 Solución aproximadamente 0,01 M de ácido etilendiamino tetraacético sal disódica (EDTA), conservada siempre en recipientes de polietileno.

3.3.8.2 Solución de hidróxido de sodio al 5 %.

3.3.8.3 Ácido calcón carboxílico (reactivo puro)

3.4 PROCEDIMIENTO CLÁSICO

3.4.1 Se preparan dos muestras, en la forma que se indica a continuación, para ser ensayadas a los 7 d y a los 28 d para el caso que el ensayo a 7 d arroje resultado negativo.

3.4.2 Se vierten en un frasco Erlenmeyer 100 ml de agua destilada y se coloca en la estufa provista de termostato a (40 ± 2) °C durante aproximadamente 1 h. Se retira el frasco Erlenmeyer de la estufa y se introducen en él 20 g de la muestra de cemento medidos con una aproximación de 0,01 g.

3.4.2.1 Se tapa inmediatamente, se agita enérgicamente durante 20 s para deshacer los grumos de cemento que se hayan formado y se coloca nuevamente el frasco Erlenmeyer en la estufa, teniendo cuidado de que esté colocado sobre un plano horizontal para que la capa de cemento sedimentada tenga un espesor uniforme.

3.4.2.2 Todas las operaciones fuera de la estufa deben ser realizadas lo más rápido posible, en ningún caso en más de 3 min, para evitar un descenso apreciable de temperatura del contenido del frasco Erlenmeyer.

3.4.3 Transcurridos 7 d ó 28 d, según corresponda, se filtra la solución sobrenadante rápidamente por el embudo de placa filtrante, recogiendo el filtrado en un frasco Erlenmeyer, con tubular lateral. Utilizando una pipeta se transfieren 50 ml del filtrado a un vaso de vidrio resistente a los álcalis o de plástico, de 400 ml de capacidad, se agregan dos gotas de solución indicadora de anaranjado de metilo y se valora la alcalinidad total con solución aproximadamente 0,1 N de ácido clorhídrico.

3.4.4 Una vez alcanzado el punto final de la valoración, se determina la cal en el líquido. Para ello se alcaliniza ésta con unas gotas de amoníaco concentrado. Se calienta hasta ebullición y se precipita la cal añadiendo solución de oxalato amónico al 5 %.

3.4.5 Se deja el vaso sobre un baño María durante 15 min y se separa el precipitado por filtración. Se lava el filtro con el precipitado, utilizando para ello agua destilada fría.

3.4.6 Se retira el filtro con el precipitado del embudo, y se deposita en el vaso donde se hizo la precipitación desdoblado el papel filtro y adhiriéndolo a las paredes del vaso, de tal forma que facilite el lavado del precipitado; se lava el precipitado mediante el chorro de un frasco lavador que contenga agua destilada caliente. Sin separar el filtro de la pared del vaso se añade agua destilada en ebullición, hasta completar un volumen de 200 ml.

3.4.7 Se agregan 10 ml de ácido sulfúrico diluido (1:1) y se calienta hasta que se inicie la ebullición. Se determina la cal en el líquido valorando éste con una solución 0,05 N de permanganato de potasio, hasta observar un color rosado persistente. Una vez logrado, se despega de las paredes y se macera el papel de filtro en el líquido y se sigue añadiendo solución de permanganato hasta observar de nuevo la coloración rosada, persistente durante 10 s.

3.5 CÁLCULOS

3.5.1 Alcalinidad total

La alcalinidad total se calcula con la siguiente fórmula:

$$I_A = \frac{V' \times N \times 1000}{V}$$

en donde

- I_A = alcalinidad total
- V = volumen de la solución ensayada en ml
- V' = volumen de solución de ácido clorhídrico utilizado en la valoración en ml
- N = normalidad de la solución de ácido clorhídrico.

3.5.2 El contenido de óxido de calcio se calcula con la siguiente fórmula

$$I_p = \frac{20 \times V'' \times E}{0,056} = 357,143 \times V'' \times E$$

$$I_p = (1000 / 50 \times V'' \times E) / 0,056$$

en donde

- I_p = contenido de óxido de calcio o índice puzolánico, en milimoles de CaO/l
- V'' = volumen de solución de permanganato de potasio utilizado en la valoración, en ml
- E = equivalente en cal (CaO) de 1 ml de la solución de permanganato empleada.

3.5.3 Expresión de los resultados

En caso de que el punto representativo del contenido en óxido de calcio en función de la alcalinidad total, esté situado por debajo de la isoterma de solubilidad de la Figura 1, el cemento ensayado se considera puzolánico.

3.5.3.1 Si el punto representativo estuviera situado por encima de la isoterma, sobre ella, o muy próximo por debajo, se repite el ensayo sobre la muestra, mantenida 28 días en idénticas condiciones.

3.5.3.2 Si en este nuevo ensayo dicho punto cae por debajo de la isoterma, el cemento se considera puzolánico.

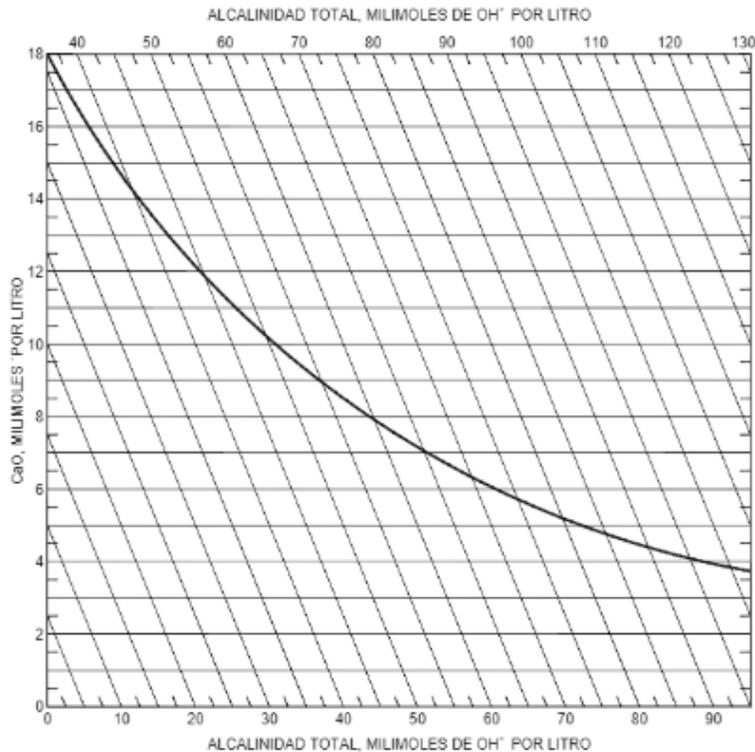


Figura 1. Gráfica de solubilidad de Ca (OH)₂ en presencia de álcalis a 40 °C

3.6 PROCEDIMIENTO COMPLEXOMÉTRICO SIMPLIFICADO

3.6.1 La simplificación del procedimiento de ensayo se basa exclusivamente en la simplificación de la determinación del óxido de calcio presente en la solución, usando como agente titulante el EDTA en medio alcalino y como indicador específico para el calcio, el ácido calcón carboxílico. El procedimiento simplificado es igual al clásico hasta la valoración de la alcalinidad total por titulación con ácido clorhídrico usando la metil naranja como indicador, tal como se describe en el numeral 3.4.3 de esta norma.

3.6.2 A la solución cuya alcalinidad ha sido determinada en el paso anterior se agregan 150 ml de agua destilada, y el vaso que la contiene se coloca sobre el agitador magnético con un imán agitador mediano recubierto de teflón en su interior. Se enciende el agitador y se establece una velocidad de giro hasta obtener una turbulencia tal que evite salpicaduras y se introduce sobre la pared interior del vaso el electrodo del medidor de pH o la cinta plastificada de indicador mixto. Se agrega lentamente solución de hidróxido de sodio al 5% hasta alcanzar un pH de 12, y se añade con la punta de un palillo una pequeñísima cantidad de ácido calcón carboxílico (indicador sólido puro). La solución que contiene el óxido de calcio adquiere así un color rojo vino tinto y el calcio se valora por titulación con la solución de EDTA 0,01 M hasta viraje de rojo a verde. Se registra el volumen empleado de solución de EDTA y su concentración previamente determinada.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1512 (Primera actualización)

NOTA La intensidad y tono del color dependerá de la cantidad de indicadores añadidos (metil naranja y ácido calcón carboxílico), siendo recomendable emplear la mínima cantidad posible de indicadores para disponer de tonos claros donde es más fácil apreciar el viraje de color al final de la titulación.

3.6.3 El contenido de óxido de calcio se calcula mediante la siguiente expresión:

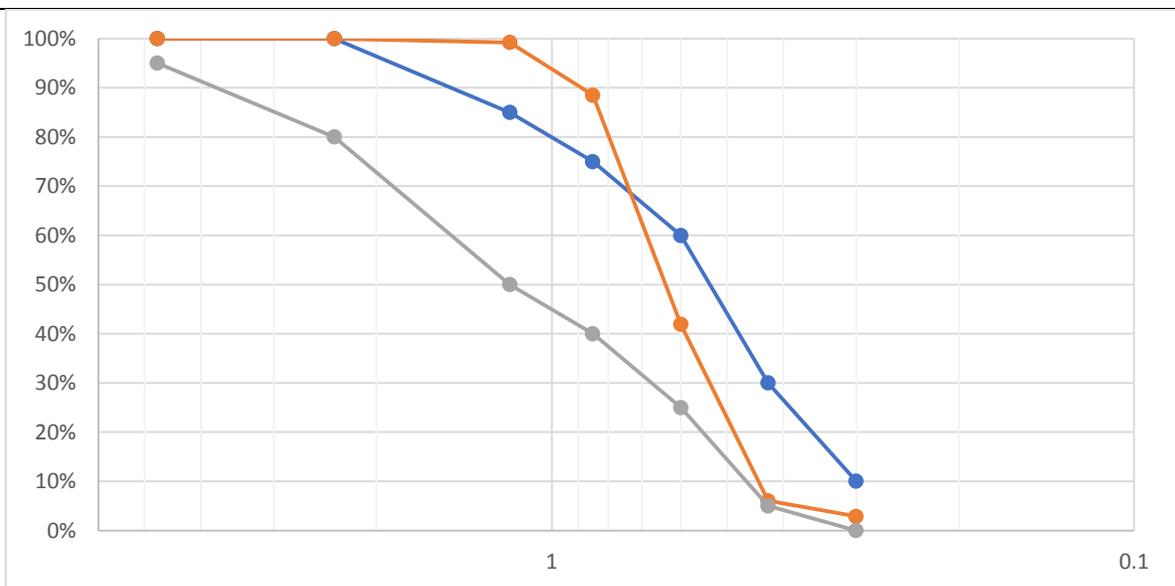
$$Ip = (1\ 000 / 50 \times V \times M)$$

en donde

- Ip* = contenido de óxido de calcio o índice puzolánico, en milimoles de CaO/L
- V* = volumen de solución de EDTA empleado, en ml.
- M* = molaridad de la solución de EDTA, en moles/L

ANEXO B:
GRANULOMETRÍA DE LA ARENA SÍLICA.

Tamiz No.	Abertura de tamiz	Peso tamiz (gr)	Peso retenido + tamiz (gr)	Material retenido (gr)	% retenido	% retenido ac.	% pasa ac.	ASTM C-33	
4	4.75	671.02	671.02	0	0%	0%	100%	95%	100%
8	2.36	465.63	465.63	0	0%	0%	100%	80%	100%
16	1.18	408.03	411.95	3.92	1%	1%	99%	50%	85%
20	0.85	376.7	430.14	53.44	11%	11%	89%	40%	75%
30	0.6	518.56	751.72	233.16	47%	58%	42%	25%	60%
40	0.425	351.39	530.64	179.25	36%	94%	6%	5%	30%
50	0.3	419.86	435.74	15.88	3%	97%	3%	0%	10%
100	0.15	316.54	330.64	14.1	3%	100%	0%	0%	0%
200	0.075	457.32	457.64	0.32	0%	100%	0%	0%	0%
FONDO		433.83	433.9	0.07	0%	100%	0%		
TOTAL				500.14					



ANEXO C:
ANÁLISIS DE CALCINACIÓN DEL MATERIAL: CORTEZA
DE CENIZA DE BAMBÚ

	TARA (gr)	MATERIAL + TARA (gr)	PESO NETO (gr)
1	134.50	185.50	51.00
2	124.40	180.40	56.00
3	124.20	166.90	42.70
4	132.70	160.90	28.20
5	132.40	169.10	36.70
6	132.90	156.60	23.70
7	134.30	165.90	31.60
8	131.80	153.80	22.00
9	132.90	162.00	29.10

	1° QUEMA 600°C-2HRS				2° QUEMA 600°C-4HRS			
	MATERIAL + TARA (gr)	PESO NETO (gr)	PÉRDIDA (gr)	% DE PÉRDIDA	MATERIAL + TARA (gr)	PESO NETO (gr)	PÉRDIDA (gr)	% DE PÉRDIDA
1								
2								
3								
4					133.5	0.80	8.20	91%
5					133.5	1.10	8.30	88%
6					133.4	0.50	8.20	94%
7	136.2	1.90	8.50	82%				
8	133.2	1.40	7.00	83%				
9	135	2.10	8.10	79%				

	TARA (gr)	MATERIAL + TARA (gr)	PESO NETO (gr)	3° QUEMA 600°C-6HRS			
				MATERIAL + TARA (gr)	PESO NETO (gr)	PÉRDIDA (gr)	% DE PÉRDIDA
1	140.9	142.6	1.7	142.6	1.7	10.10	86%
2	140.8	142.9	2.1	142.9	2.1	9.40	82%
3	141.1	142.2	1.1	142.2	1.1	10.80	91%

TARA (gr)	MATERIAL + TARA (gr)	PESO NETO (gr)	4° QUEMA 600°C-8HRS				
			MATERIAL + TARA (gr)	PESO NETO (gr)	PÉRDIDA (gr)	% DE PÉRDIDA	
1							
2	140.8	142.9	2.1	142.9	2.1	6.30	82%
3	141.1	142.2	1.1	142.2	1.1	9.10	91%

ANEXO D:
FICHAS DE *POWDER DIFFRACTION STANDART*

8. BIBIOGRAFÍA

Abdul Khalil, H. P. S., I. U. H. Bath, M. Jawaid, A. Zaidon, D. Hermawan, and Y. S. Hadi. 2012. Bamboo fibre reinforced composites: A review. *Mater. Des.*:353–368.

Adesanya, D. A. 1996. Evaluation of blended cement mortar, concrete and stabilized earth made from ordinary Portland cement and corn cob ash. *Constr. Build. Mater.* 10:451–456.

Adesanya, D. A., and A. A. Raheem. 2009. Development of corn cob ash blended cement. *Constr. Build. Mater.* 23:342–347.

Adesanya, D. A., and A. A. Raheem. 2009a. A study of the workability and compressive strength characteristics of corn cob ash blended cement concrete. *Constr. Build. Mater.* 23:311–317.

Adesanya, D. A., and A. A. Raheem. 2009b. Development of corn cob ash blended cement. *Constr. Build. Mater.* 23:347–352.

Adesanya, D. A., and A. A. Raheem. 2010. A study of the permeability and acid attack of corn cob ash blended cements. *Constr. Build. Mater.* 24:403–409.

Agarwal, A., B. Nanda, and D. Maity. 2014. Experimental investigation on chemically treated bamboo reinforced beams and columns. *Constr. Build. Mater.*:610–617.

Aguilar, J. 2009. Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia. Universidad de Sucre Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería agrícola Sincelejo.

Al-Akhras, N. M., and B. A. Abu-Alfoul. 2002. Effect of wheat straw ash on mechanical properties of autoclaved mortar. *Cem. Concr. Res.* 32:859–863.

Al-Akhras, N. M., K. M. Al-Akhras, and M. F. Attom. 2009. Performance of olive waste ash concrete exposed to elevated temperatures. *Fire Saf. J.* 44:370–375.

Amahjour, F. 2000. Estudio de la Reactividad de las Puzolanas Artificiales: Cenizas Volantes y Humo de Sílice, y su Reutilización en Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

Arvelakis, S., H. Gehrman, M. Beckmann, and E. G. Koukios. 2002. Effect of leaching on the ash behavior of olive residue during fluidized bed gasification. *Biomass and Bioenergy* 22:55–69.

Asha, P., A. Salman, and R. Arun Kumar. 2014. Experimental study on concrete with bamboo leaf ash. *Int. J. Eng. Adv. Technol.* III.

ASTM C109. 2012. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).

ASTM C125. 2013. Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.

ASTM C1437. 2001. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar

1.

ASTM C150. 2014. “Especificación Normalizada para cemento Portland”.

ASTM C305. 2002. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars.

ASTM C311. 2004. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use.

ASTM C618. 2003. Especificación normalizada para Ceniza Volante de Carbón y Puzolana Natural en Crudo o Calcinada para Uso en Concreto.

ASTM C778. 2003. Standard Specification for Standard Sand.

ASTM D422. 1998. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. :1–

8.

Bahurudeen, A., K. Wani, M. A. Basit, and M. Santhanam. 2015. Assesment of Pozzolanic Performance of Sugarcane Bagasse Ash. 28:1–11.

Bambusetum. 2012. Viveros de bambú.

Biricik, H., F. Aköz, I. Berktaş, and A. N. Tulgar. 1999. Study of pozzolanic properties of wheat straw ash. *Cem. Concr. Res.* 29:637–643.

Biricik, H., F. Aköz, F. Türker, and I. Berktaş. 2000. Resistance to magnesium sulfate and sodium sulfate attack of mortars containing wheat straw ash. *Cem. Concr. Res.* 30:1189–1197.

Boumiz, A., C. Vernet, and F. Cohen Tenoudji. 1996. Mechanical properties of cement pastes and mortars at early ages. *Adv. Cem. Based Mater.* 3:94–106.

Burgos Galindo, D. M., L. M. Cardona Ramírez, M. Gordillo Suarez, and S. Delvasto. 2015. Evaluation and pozzolanic and effects of the Puracé volcanic material. *Rev. Esc. Ing. Antioquia* 12:83–93.

Chusilp, N., C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol. 2009. Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Constr. Build. Mater.* 23:3523–3531. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.046>

Cobrerros, C., J. L. Reyes-araiza, A. Manzano-ramírez, R. Nava, M. Rodríguez, M. Mondragón-Figueroa, L. M. Apátiga, and E. M. Rivera-Muñoz. 2015. com Barley Straw Ash: Pozzolanic Activity and Comparison with other Natural and Artificial Pozzolans from México. 10:3757–3774.

Coordinadora Nacional de las Fundaciones Produce (COFUPRO). 2016. Producción y siembra de bambú en México.

Cordeiro, G. C., R. D. Toledo Filho, and E. M. R. Fairbairn. 2009. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. *Constr. Build. Mater.* 23:3301–3303.

Cordeiro, G. C., R. D. Toledo Filho, L. M. Tavares, and E. M. R. Fairbairn. 2012. Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes. *Constr. Build. Mater.* 29:641–646.

Dhinakaran, G., and G. H. Chandana. 2016. Compressive Strength and Durability of Bamboo Leaf Ash Concrete. *10:279–289.*

Donatello, S., M. Tyrer, and C. R. Cheeseman. 2010. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cem. Concr. Compos.* 32:121–127.

Douglas, E., and G. Pouskouleli. 1991. Prediction of compressive strength of mortars made with portland cement - blast-furnace slag - y ash blends. *Cem. Concr. Res.* 21.

Dwivedi, V. N., N. P. Singh, S. S. Das, and N. B. Singh. 2006. A new pozzolanic material for cement industry: Bamboo leaf ash. *Int. J. Phys. Sci.* 1:106–111.

Estévez, J. M. G., and M. P. A. Gutiérrez. 1990. Hormigón de alta resistencia: estado actual de conocimientos.

FAO. 2013. Rice Market Monitor (RMM)

FAO. 2014. Records of Green House Gasses

Farrelly, D. 1984. *The book of bamboo: a comprehensive guide to this remarkable plant, its uses, and its history.* Thames and Hudson, London.

Frías, M., H. Savastano, E. Villar-Cociña, M. I. Sánchez De Rojas, and S. F. Santos. 2012. Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes. *Cem. Concr. Compos.* 34:1019–1023.

Frías, M., E. Villar-Cociña, and E. Valencia-Morales. 2007. Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: Calcining temperature and kinetic parameters. *Waste Manag.* 27:533–538.

Ganesan, K., K. Rajagopal, and K. Thangavel. 2007. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cem. Concr. Compos.* 29:515–524.

Ghavami, K. 2005. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cem. Concr. Compos.* 27:637–649.

Gonçalves, M. R. F., and C. P. Bergmann. 2007. Thermal insulators made with rice husk ashes: Production and correlation between properties and microstructure. *Constr. Build. Mater.* 21:2059–2065.

Guzmán, A., C. Gutiérrez, V. Amigó, R. M. De Gutiérrez, and S. Delvasto. 2011. Valoración puzolánica de la hoja de la caña de azúcar (Pozzolanic evaluation of the sugar cane leaf). *Mater. Construcción* 61:213–225.

Hanehara, S., F. Tomosawa, M. Kobayakawa, and K. Hwang. 2001. Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste. *Cem. Concr. Res.* 31.

Idorn, G. M., and K. R. Henriksen. 1984. State of the art for y ash uses in concrete. *Cement and Concrete Research*, 14(4):463{470. *Cem. Concr. Res.* 14:463–470.

Jiang, L., and V. M. Malhotra. 2000. (2000). Reduction in water demand of non-air-entrained concrete incorporating large volumes of y ash. *Cem. Concr. Res.* 31.

Khalil, N. M., E. M. Hassan, M. M. E. Shakdofa, and M. Farahat. 2013. Beneficiation of the huge waste quantities of barley and rice husks as well as coal fly ashes as additives for Portland cement. *J. Ind. Eng. Chem.* Available

Khan, R., A. Jabbar, I. Ahmad, W. Khan, A. N. Khan, and J. Mirza. 2012. Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete. *Constr. Build. Mater.* 30:360–365.

Li, D., Y. Chen, J. Shen, J. Su, and X. Wu. 2000. Influence of alkalinity on activation and microstructure of fly ash. *Cem. Concr. Res.* 30.

Liu, Z., B. Mi, P. Wei, Z. Jiang, and B. Fei. 2016. Combustion characteristics of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*). *Eur. J. Wood Wood Prod.* 74:255–259.

Ma-tay Pinel, D. E. 2014. Valorización de cenizas de bagazo procedentes de Honduras: Posibilidades de uso en matrices de cemento.

Malhotra, V. M., and A. Ramezaniapour. 1994. Fly Ash in concrete. *Adv. Concr. Technol.* 96.

Martirena, F., B. Middendorf, R. L. Day, M. Gehrke, P. Roque, L. Martínez, and S. Betancourt. 2006. Rudimentary, low tech incinerators as a means to produce reactive pozzolan out of sugar cane straw. *Cem. Concr. Res.* 36:1056–1061.

Montakarntiwong, K., N. Chusilp, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul. 2013. Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry. *Mater. Des.* 49:414–420.

Morales, E. V., E. Villar-Cociña, M. Frías, S. F. Santos, and H. Savastano. 2009. Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation. *Cem. Concr. Compos.* 31:22–28.

Nieto, J. 1985. *El Bambú, estudio del Mercado Mundial.*

NTC 1512. 2003. Cementos. Ensayo químico para determinar la actividad puzolánica.

Oladipupo Olafusi, S., and A. Olutoge Festus. 2012. Strength Properties of Corn Cob Ash Concrete. 3:297–301.

Oner, A., S. Akyuz, and R. Yildiz. 2005. An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete. *Cem. Concr. Res.* 35(6)1165{1171. 35:1165–1171.

Papadakis, V. G. 2000. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cem. Concr. Res.* 30:291–299.

Papadakis, V. G., S. Antiohos, and S. Tsimas. 2002a. Supplementary cementing materials in concrete. Part I: efficiency and design. *Cem. Concr. Res.* 32:1533–1538.

Papadakis, V. G., S. Antiohos, and S. Tsimas. 2002b. Supplementary cementing materials in concrete. Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor. *Cem. Concr. Res.* 32:1533–1538.

Ravina, D., and P. K. Mehta. 1986. Properties of fresh concrete containing large amounts of y ash. , 16(2):227{238.Title. *Cem. Concr. Res.* 16:227–238.

Rivera L, G. A. 2014. *Concreto simple*.

Rodríguez De Sensale, G. 2010. Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials. *Cem. Concr. Compos.* 32:718–725.

Roselló, J., L. Soriano, M. P. Santamarina, J. L. Akasaki, J. L. P. Melges, and J. Payá. 2015. Microscopy Characterization of Silica-Rich Agrowastes to be used in Cement Binders: Bamboo and Sugarcane Leaves. *Microsc. Microanal.* 21:1314–1326.

Rosković, R., and D. Bjegović. 2005. Role of mineral additions in reducing CO₂ emission. *Cem. Concr. Res.* 35:974–978.

Rukzon, S., and P. Chindaprasirt. 2012. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Mater. Des.* 34:45–50.

Sánchez de Rojas, M. I., M. Frías, J. Rivera, M. J. Escorihuela, and F. P. Marín. 2001. Research about the pozzolanic activity of waste materials from calcined clay. *Mater. Construcción* 51:45–52.

Scurlock, J. M. O., D. C. Dayton, and B. Hames. 2008. Bamboo : an overlooked biomass resource ? Office of Transportation Technologies. 19:229–244.

SEMARNAT. 2010. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. :189–246.

SEMARNAT. 2012. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*.

Shetty, M. S. 2008. *Concrete Technology: Theory and Practice*. S. Chand & Company Ltd., New Delhi, India.

Siddique, R. 2004. Properties of concrete incorporating high volumes of class F fly ash and san bers. *Cem. Concr. Res.* 31:27–42.

Singh, N. B., S. S. Das, N. P. Singh, and V. N. Dwivedi. 2007. Hydration of bamboo leaf ash blended Portland cement. *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 14:69–76.

Soriano, L. 2007. Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico Usado (FCC). Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

Steenari, B. M., and O. Lindqvist. 1998. High-temperature reactions of straw ash and the anti-sintering additives kaolin and dolomite. *Biomass and Bioenergy* 14:67–76.

Talero, R. 2005. Performance of metakaolin and Portland cements in ettringite

formation as determined by ASTM C 452-68 : kinetic and morphological differences. *Cem. Concr. Res.* 35:1269–1284.

Tierra Fértil. 2014. Producción de bambú, mina de oro verde.

Tironi, A., C. C. Castellano, V. L. Bonavetti, M. A. Trezza, A. N. Scian, and E. F. Irassar. 2014. Kaolinitic calcined clays – Portland cement system : Hydration and properties. *Constr. Build. Mater.* 64:215–221.

Tironi, A., M. A. Trezza, A. N. Scian, and E. F. Irassar. 2012. Kaolinitic calcined clays : Factors affecting its performance as pozzolans. *Cem. Concr. Compos.* 28:276–281.

Tironi, A., M. A. Trezza, A. N. Scian, and E. F. Irassar. 2012. Incorporation of calcined clays in mortars : porous structure and compressive strength. *Procedia Mater. Sci.* 1:366–373.

Tironi, A., M. A. Trezza, A. N. Scian, and E. F. Irassar. 2013. Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. *Cem. Concr. Compos.* 37:319–327.

Torii, K., and M. Kawamura. 1994. (1994). Effects of fly ash and silica fume on the resistance of mortar to sulfuric acid and sulfate attack. *Cem. Concr. Res.* 24.

Torres Agredo, J., R. Mejía De Gutiérrez, E. Escandón Giraldo, and I. O. González Salcedo. 2014. Characterization of sugar cane bagasse ash as supplementary material for Portland cement. *Ing. e Investig.* 34:5–10.

UNE-EN 197-1. 2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

Villar-Cociña, E., E. V. Morales, S. F. Santos, H. Savastano, and M. Frías. 2011. Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters. *Cem. Concr. Compos.* 33:68–73.

Waite, M. 2009. Sustainable textiles: the role of bamboo and comparison of bamboo textile properties. *J Text Appl Technol*:1–21.

Yazici, S., and H. Arel. 2012. Effects of fly ash content on the mechanical properties of concrete. *Indian Acad. Sci.* 37:389–403.

Zain, M. F. M., M. N. Islam, F. Mahmud, and M. Jamil. 2011. Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. *Constr. Build. Mater.* 25:798–805.