

**CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA DE HOJAS DE BAMBÚ Y SU INFLUENCIA
COMO MATERIAL PUZOLÁNICO EN EL CONCRETO**

DAVID FERNANDO CARDONA CASTRO

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE MAESTRO EN INGENIERÍA**

Asesor: ANA BEATRIZ ACEVEDO JARAMILLO

Coasesor: MÓNICA ALVAREZ

MEDELLÍN

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

2013

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme lograr cada meta propuesta.

A mi madre por su apoyo incondicional durante todos estos años de mi vida.

A mi hijo Emmanuel por ser un motor muy importante, por quién me levanto cada día y lucho por ser mejor.

A mi asesora de proyecto de grado, Ana Beatriz Acevedo, por haberme dado ánimo, haberme hecho sentir que debía dar cada vez más, por haberme corregido y enseñado a escribir un poco mejor.

A mis profesores de maestría, especialmente a Mónica Álvarez, por haberme abierto puertas para poder realizar los diferentes ensayos requeridos para este proyecto.

A mis amigos, colegas y conocidos que me aguantaron con la misma historia durante dos años. Agradecimientos a las siguientes personas que de una u otra manera hicieron su aporte a este proyecto:

- Gabriel Jaime Sánchez, Consorcio CCC Ituango
- Francis Arley Ortega, Consorcio CCC Ituango
- Oscar Andrés Prado, Universidad Nacional de Manizales
- John Jaime Querubín, Centro I&D, Argos, Medellín

Me siento muy agradecido con mi compañera, quien me hizo creer que todo es posible cuando lo trabajas con amor.

Resumen

En este proyecto se pretendió encontrar la metodología para el procesamiento y caracterización química y física de la ceniza de las hojas de bambú. Para lograr este objetivo se utilizaron diferentes técnicas y procesos. La ceniza fue producida mediante la calcinación de las hojas de bambú a una temperatura aproximada de 650 °C durante dos horas en un horno eléctrico de laboratorio.

Se evaluó el comportamiento puzolánico entre el hidróxido de calcio Ca(OH)_3 y la ceniza obtenida de la hoja de bambú (Blash), utilizando el método de conductividad, basado en la medición de la conductividad eléctrica en una solución Blash / Ca(OH)_3 con el tiempo de reacción entre ambos componentes.

Otras técnicas experimentales también fueron empleadas, tales como la fluorescencia de rayos X (FRX), la difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM) y la medición de la distribución de tamaño de partícula (DTP).

Los resultados del análisis químico de la ceniza de las hojas de bambú lograron determinar que este tipo de ceniza está formado por sílice con una naturaleza altamente amorfa y una elevada actividad puzolánica; con la posibilidad de ser usada como material de adición o de reemplazo en la preparación de morteros y concretos de alta resistencia.

La evaluación de sus propiedades físicas o mecánicas se realizó mediante la elaboración de dos mezclas de mortero, la primera denominada mezcla de control y la segunda llamada mezcla de ensayo. Para esta última se hizo un reemplazo del 20,00% en peso de cemento Portland tipo III por ceniza de hoja de bambú. Con los cubos de mortero obtenidos se evaluó el índice de actividad de resistencia, por medio del ensayo de compresión simple, fallando cubos a 7 y 28 días.

Del ensayo de resistencia a la compresión se encontró que tanto los cubos de mortero de la mezcla sin reemplazo por ceniza, así como los cubos fallados de la mezcla de ensayo tuvieron resultados de esfuerzo a la compresión muy cercanos. El índice de actividad puzolánica logrado para la mezcla de ensayo con respecto a la mezcla de control fue de 99,25% para los cubos fallados a los 7 días, y de 95,91% para los cubos fallados a los 28 días.

Para la elaboración de los cubos de mortero con reemplazo de ceniza fue necesario utilizar un 17,77% más de agua que la utilizada en la mezcla de control, alcanzando una relación agua - material cementante (a/cmte) de 0,57; mientras que para la mezcla de control se usó una relación a/cmte de 0,484. Si se tiene en cuenta que aumentar la cantidad de agua disminuye la resistencia a la compresión, la gran similitud de los resultados en la resistencia a la compresión de la mezcla

de control y la mezcla con reemplazo muestra el excelente comportamiento del reemplazo con cenizas de hoja de bambú.

La ceniza obtenida de las hojas de bambú puede ser considerada como una puzolana natural, de acuerdo con los parámetros de evaluación indicados en la ASTM C618.

Palabras clave: Bambú, ceniza, puzolana, adiciones minerales, resistencia a la compresión, actividad puzolánica, FRX, SEM.

Tabla de contenido

Resumen	
Índice de tablas	I
Índice de figuras	III
1. Introducción	1
1.1 Justificación y uso de los resultados	3
1.2 Objetivo General	6
1.3 Objetivos específicos	6
2. Estado del arte	8
2.1. Una perspectiva a la historia	8
2.2. La llegada del humo de sílice	11
2.3. Antecedentes Históricos de las Puzolanas	11
2.4. Bambú, una alternativa	12
3. Materiales para concretos de alta resistencia	16
3.1. Agregados del concreto de alta resistencia	16
3.1.1. Materiales contaminantes en los agregados	17
3.1.2. Calidad física intrínseca	18
3.1.3. Tamaño máximo de las partículas	20
3.2. Cemento	20
3.2.1. Influencia de la selección del cemento	20
3.2.2. Química del Cemento	24
3.3. Agua para concreto	27
3.3.1. Características físico-químicas	28
3.3.2. Efectos en el concreto	29
3.4. Adiciones Minerales	30
3.4.1. Efectos de las adiciones Minerales en el Concreto Fresco	41
3.4.2. Efectos de las adiciones minerales en el concreto endurecido	45
4. Propiedades del concreto de alta resistencia	48
4.1. Resistencia a la compresión	49
4.2. Resistencia a tracción	51
4.3. Resistencia al ataque químico	53
4.4. Diagrama Tensión – Deformación	55
5. Desarrollo experimental – Caracterización y análisis	57
5.1. Metodología	57
5.2. Caracterización de la ceniza de la hoja de bambú	59
6. Conclusiones y recomendaciones generales	96
7. Referencias Bibliográficas	100

Índice de tablas

- Tabla 1. Inventario de Plantaciones de Guadua en Colombia (Salas, 2006) (pág. 2)
- Tabla 2. Especificaciones y clases de los materiales cementantes suplementarios en los Estados Unidos (pág. 5)
- Tabla 3. Nombres populares de la Guadua o Bambú (pág. 14)
- Tabla 4. Composición química del cemento Portland (pág. 23)
- Tabla 5. Composición química centesimal del cemento Portland (pág. 23)
- Tabla 6. Límites especificados de contenido de impurezas Inorgánicas en el agua no potable para la elaboración de concreto (pág. 29)
- Tabla 7. Propiedades físicas más importantes de la microsílíce (pág. 33)
- Tabla 8. Composición química de la microsílíce (cifras en %) (pág. 34)
- Tabla 9. Análisis químico y propiedades seleccionadas de ceniza volante, escoria, humo de sílice, arcilla calcinada, esquisto calcinado y metacaolinita típicos (ASTM C 618, 2005; Malhotra, 1996; Helmuth, 1987) (pág. 37)
- Tabla 10. Propiedades físicas más importantes de la ceniza volante (pág. 39)
- Tabla 11. Composición química de la ceniza volante (cifras en %) (pág. 39)
- Tabla 12. Efecto de la ceniza volante sobre la demanda de agua de mezcla en concretos con aire incluido (incorporado) según Whiting, 1989 (pág. 41)
- Tabla 13. Efecto de la ceniza volante sobre el tiempo de fraguado del concreto (Barger *et al.*, 1997) (pág. 44)
- Tabla 14. Distribución de tamaño y peso de bolas para la molienda de la ceniza (pág. 60)
- Tabla 15. Información del proceso de molienda, peso de material procesado, velocidad y tiempo de molienda de la ceniza (pág. 60)
- Tabla 16. Resultados análisis químico por FRX (pág. 62)
- Tabla 17. Comparativo de ítems de procesos entre primera y segunda etapa de procesamiento de la ceniza de las hojas de bambú (pág. 65)
- Tabla 18. Distribución de tamaño y peso de bolas para la molienda de la ceniza (pág. 70)
- Tabla 19. Información del proceso de molienda, peso de material procesado, velocidad y tiempo de molienda de la ceniza (pág. 71)
- Tabla 20. Resultados análisis químico por FRX (pág. 74)
- Tabla 21. Descripción de mallas y de cada una de ellas (pág. 78)
- Tabla 22. Resultados del proceso de tamizado (pág. 79)
- Tabla 23. Condiciones finales del proceso de tamizado (pág. 79)
- Tabla 24. Resultados % de volumen acumulado del ensayo de distribución de tamaño de partícula (pág. 80)
- Tabla 25. Resultados en el histograma del ensayo de distribución de tamaño de partícula (pág. 81)
- Tabla 26. Resumen análisis de distribución de tamaño de partícula (pág. 82)

- Tabla 27. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para los cubos de mortero, mezcla de control y mezcla de ensayo (pág. 90)
- Tabla 28. Resultados finales de la prueba de índice de actividad de resistencia para los cubos de mortero, mezcla de control y mezcla de ensayo (pág. 92)

Índice de figuras

- Figura 1. Escoria granulada de alto horno molida (IMG. Helmuth, 1987) (pág. 31)
- Figura 2. Micrografía por microscopio electrónico de barrido de partículas de escoria con aumento de 2100X. (IMG. Helmuth, 1987) (pág. 31)
- Figura 3. Polvo de humo de sílice (IMG. Helmuth, 1987) (pág. 32)
- Figura 4. Micrografía por microscopio electrónico de barrido de partículas de humo de sílice con aumento de 20.000X (IMG Bhatti & Greening, 1986) (pág. 32)
- Figura 5. Micrografía por microscopio electrónico de barrido de partículas de esquistos calcinados con aumento de 5000X (IMG. Helmuth, 1987) (pág. 35)
- Figura 6. La metacaolinita es una arcilla calcinada (IMG. Helmuth, 1987) (pág. 35)
- Figura 7. Micrografía por microscopio electrónico de barrido de partículas de arcilla calcinada con aumento de 2000X (IMG. Helmuth, 1987) (pág. 36)
- Figura 8. Micrografía por microscopio electrónico de barrido (SEM) de partículas de ceniza volante con aumento de 1000X. A pesar de que la mayoría de las cenizas volantes son esferas sólidas, algunas partículas, llamadas cenosferas, son huecas (como se enseña en la micrografía). (IMG. Helmuth, 1987) (pág. 38)
- Figura 9. La ceniza volante es un polvo que se parece con el cemento y ha sido usada desde los años 30. (IMG Shanghai Xuanshi Machinery Co., Ltd, <http://www.trituradora-de-piedra.net/trituradora-mineral/mill-fly-ash.html>) (pág. 40)
- Figura 10. Comparación del calor de hidratación a 20°C (68°F) entre la escoria y el cemento Tipo I (ASTM C 150) (Barger *et al.*, 1997) (pág. 43)
- Figura 11. Desarrollo de la resistencia a compresión a 1, 3, 7, 28 y 90 días de edad de mezclas de concreto conteniendo 307 Kg/m³ (517 lb/yd³) de materiales cementantes, de los cuales 25% de la masa es ceniza volante (Whiting, 1989) (pág. 46)
- Figura 12. Aumento de la resistencia a compresión como porcentaje de la resistencia a compresión a los 28 días de concretos con y sin ceniza volante (Lange, 1994) (pág. 47)
- Figura 13. Resistencias a compresión de concretos curados a 23 °C (73 °F) durante las primeras 24 horas y curados a 4 °C (40 °F) durante el resto del tiempo. El concreto de control tenía un contenido de cemento de 322 Kg/m³ (560 lb/yd³) y una relación a/c de 0,45. Las curvas de ceniza volante muestran sustitución por cemento (S), sustitución parcial (igual) por cemento y arena y adición de ceniza volante con relación a la masa de cemento (A). La sustitución parcial del cemento o la adición de ceniza volante presentan desarrollo de resistencia similar a la mezcla de control que posee sólo cemento, incluso en clima frío (Detwiler, 2000) (pág. 47)
- Figura 14. Efecto de la microsilice sobre la resistencia de concreto (Malhotra y Carrette, 1983) (pág. 49)
- Figura 15. Efecto de la edad de la probeta, ceniza y superplastificante sobre la resistencia a compresión del concreto para mezclas con una relación agregado grueso / agregado fino

(AG/AF) de 2, hechas con cemento tipo II, ceniza del 0 al 30,00% del peso y caliza de tamaño máximo 12 mm (Carrasquillo, 1987) (pág. 50)

- Figura 16. Módulo de rotura versus resistencia a compresión para vigas ensayadas a flexión (Gálligo, 1990) (pág. 51)
- Figuras 17. Peso de las probetas de concreto de 200, 480 y 620 Kg/cm² versus tiempo de inmersión en cada solución (Gálligo, 1990) (pág. 53)
- Figura 18. Comportamiento tensión-deformación después de la tensión máxima para concreto con caliza machacada (Carrasquillo *et al.*, 1981) (pág. 54)
- Figura 19. Matriz de proceso para la evaluación de la ceniza de las hojas de bambú (pág. 57)
- Figura 20. Molienda de la ceniza (pág. 61)
- Figura 21. Apariencia de la ceniza obtenida en la primera quema (pág. 61)
- Figura 22. Matriz de proceso para la evaluación de la ceniza de las hojas de bambú (pág. 63)
- Figura 23. Corte de las hojas de bambú secas al sol por medio de aspas giratorias (pág. 66)
- Figura 24. Apariencia de la Ceniza obtenida durante la pre-quema (pág. 67)
- Fotografía 25. Apariencia de la ceniza de hoja de bambú posterior a la quema final (pág. 68)
- Figura 26. Coloración rojiza clara, efecto de la contaminación con polvillo de la pieza cerámica de arcilla cocida (pág. 69)
- Figura 27. Equipo para la Molienda de la ceniza (pág. 72)
- Figura 28. Adherencia de la ceniza de hoja de bambú a las paredes del cilindro del molino de bolas (pág. 72)
- Figura 29. Adherencia de la ceniza de hoja de bambú a las bolas de acero del molino (pág. 73)
- Figura 30. Apariencia de la ceniza de hoja de bambú, posterior al proceso de molienda (pág. 73)
- Figura 31. DRX de la muestra de ceniza de hoja de bambú (pág. 75)
- Figura 32. Cuantificación de los componentes de la ceniza de hoja de bambú (pág. 75)
- Figura 33. Porcentajes de cuantificación de los componentes de la ceniza de hoja de bambú (pág. 76)
- Figura 34. % volumen acumulado del ensayo de distribución de tamaño de partícula (pág. 81)
- Figura 35. % de volumen en el histograma del ensayo de distribución de tamaño de partícula (pág. 82)
- Figura 36. Microscopia de barrido electrónico (SEM) - Morfología de la ceniza de hoja de bambú, 1200x (pág. 83)
- Figura 37. Microscopia de barrido electrónico (SEM) - Morfología de la ceniza de hoja de bambú, 2300x (pág. 83)

- Figura 38. Microscopia de barrido electrónico (SEM) - Morfología de la ceniza de hoja de bambú, 480x (pág. 84)
- Figura 39. A la izquierda se observa la solución saturada de Hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y a la derecha la muestra de ceniza (2,10 g) (pág. 85)
- Figura 40. Curva de calibración, concentración $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (g/L) Vs conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (pág. 85)
- Figura 41. Curva de Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) Vs tiempo de reacción (pág. 86)
- Figura 42. Mesa de flujo (pág. 88)
- Figura 43. Cono de la mesa de flujo (pág. 89)
- Figura 44. Elaboración de los cubos de mortero, en la parte superior de la fotografía se observan los cubos de la mezcla de control y en la parte inferior de la fotografía los cubos de la mezcla de ensayo (pág. 90)
- Figura 45. Resultados de la resistencia a la compresión promedio de los cubos de mortero a 7 y 28 días (pág. 91)
- Figura 46. Aspecto de un cubo de mortero elaborado con ceniza de hoja de bambú (Cubo a la izquierda de la figura) versus un cubo de mortero elaborado con cemento Portland estructural (Cubo a la derecha de la figura) (pág. 93)

1. Introducción

El mundo de los procesos industriales se ve de manera muy diferente cuando se enfoca desde la óptica ambiental. El arroz, por ejemplo, es uno de los alimentos básicos para la mayoría de los habitantes del planeta; sin embargo, su producción masiva emite metano, un gas de potente efecto invernadero. Adicionalmente, el residuo que produce —en particular la cascarilla— constituye en la mayoría de los países productores, un problema ambiental. Dicho problema se fundamenta por su composición física y química, ya que la cascarilla está constituida principalmente por fibras, celulosa y minerales, los cuales tienen una utilización restringida en el campo de la elaboración de alimentos concentrados para animales; principalmente debido a su alto contenido de sílice (SiO_2), elemento que disminuye notablemente su digestibilidad. Debido a su constitución físico-química, la cascarilla es un desecho de muy difícil biodegradación, esto sumado al hecho de que en las plantas procesadoras de arroz la cantidad de cascarilla generada oscila en cifras cercanas al 20% en peso de la producción total, y considerando el muy bajo peso específico de la cascarilla a granel (100 kg/m^3), ocasiona que la evacuación y el transporte de la cascarilla represente un problema considerable que implica unos costos elevados y un impacto perjudicial para el medio ambiente al contaminar las fuentes de agua (Aguilar, 2009).

La cascarilla del arroz puede ser de gran utilidad: la pirólisis es una tecnología que permite recuperar de la cascarilla la sílice amorfa (uno de los materiales de construcción más sofisticados ya que potencia las características del hormigón) a la vez que permite transformar en energía fácilmente reutilizable la fracción orgánica remanente en la cascarilla.

La cultura imperante en nuestra sociedad industrial ha sido la de producir y tirar. Es decir, ha sido la sociedad de consumo y vertedero hasta que se ha llegado a extremos, definiéndose como insostenible. Con la globalización de la economía y los medios de producción hay quien piensa que se puede transferir este problema a los países productores, pero es un asunto de todos; quizás de una manera inmediata en el sector que produce el desecho, ya que es éste quien debe 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).

El aprovechamiento de los subproductos y desechos del sector industrial y agrícola están generando a nivel mundial un interés cada vez mayor; el reto es el de reutilizar materiales y productos que permitan reducir el impacto ambiental, a través de buenas prácticas de reciclaje y separación en la fuente, permitiendo el aprovechamiento de éstos para la generación de nuevos materiales.

Muchos de estos subproductos del sector industrial y/o agrícola tienen un alto contenido de sílice y/o de alúmina, pudiendo ser usados como aditivos en los cementos Portland comerciales, generando lo que se conoce como materiales puzolánicos.

Las puzolanas naturales finamente molidas logran reaccionar en presencia de humedad; químicamente reaccionan con el hidróxido de calcio encontrado en el cemento, esto incluso a temperatura ambiente, formando fases hidratadas que poseen propiedades cementantes que ayudan a mejorar el comportamiento del concreto endurecido.

Uno de los sectores que aún no ha sido explorado en Colombia para la generación de puzolanas naturales es el del cultivo de guadua y bambú. Este es sin duda un sector importante: tal como se observa en la Tabla 1, el área total sembrada en guadua y bambú, entre bosques naturales y plantaciones es de aproximadamente 24.351 Ha al año 2006 (Salas, 2006).

Para el 2006 tan solo 2.975 Ha eran plantaciones que corresponden a cultivos con procesos de silvicultura; en éstos la materia prima obtenida es de mejor calidad ya que son cultivos a los que se les ha hecho un seguimiento por parte de técnicos. Sin embargo, sea tecnificado o no, la producción de biomasa es bien importante y es ésta la que se pretende aprovechar para el desarrollo del presente proyecto.

En Colombia existen varios departamentos en donde se encuentra en mayor medida bosques naturales o artificiales de guadua y bambú, tal como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Inventario de Plantaciones de Guadua en Colombia (Salas, 2006).

Departamento	Área en Bosque Natural (Ha)	Área en Plantaciones (Ha)	Total (Ha)
Caldas	5000	320	5320
Quindío	5800	640	6440
Risaralda	3476	615	4091
Valle del Cauca	7100	1400	8500
Total	21376	2975	24351

El objetivo del presente proyecto es estudiar el uso potencial de las hojas de guadua y bambú (biomasa), ya que esta parte de la planta se retira durante el proceso de corte y es dispuesta o desechada en el suelo para que sirva como abono orgánico al interior de las mismas plantaciones. Otro tema relacionado con la guadua y el bambú es el aprovechamiento del tallo como material para la construcción, lo cual no es el objeto del presente proyecto.

“El aporte anual de biomasa general de un guadua en pleno desarrollo oscila entre 30 y 35 ton/ha/año.” (Salas, 2006).

Con base en la expresión anterior se puede pensar que el uso de este material podría ser de interés para el sector cementero, explorando una ceniza producida a partir de la hoja de bambú y la guadua, la cual permita un incremento en las propiedades mecánicas, físicas y químicas del cemento, así como las del concreto endurecido.

Soñar con un proyecto que involucre un aprovechamiento completo de la silvicultura de la guadua y el bambú suena ambicioso, sin embargo los esfuerzos de las entidades ambientales gubernamentales por evitar la extinción de estas especies gramíneas, hace pensar que la guadua y el bambú pueden ser una alternativa para el desarrollo del sector de la construcción en Colombia, la generación de productos artesanales de calidad de exportación y el aprovechamiento de la biomasa generada para la fabricación de puzolanas naturales que puedan ayudar en el sector cementero.

1.1 Justificación y uso de los resultados

En la actualidad el sector de la construcción ha venido experimentando grandes cambios debido a la innovación de materiales no convencionales y a la implementación de otros denominados de última generación. En el caso del concreto se ha venido experimentando con la adición de materiales en la mezcla tradicional, permitiendo desarrollar propiedades físicas, químicas y mecánicas especiales, al igual que el incremento de su comportamiento ante factores externos como el clima y condiciones ambientales agresivas, permitiendo suplir en gran parte las exigencias del sector de la construcción en donde día a día se requieren concretos más resistentes, económicos y durables.

Como respuesta ante las grandes exigencias del sector de la construcción, aparece el concreto de alta resistencia satisfaciendo necesidades específicas tales como el incremento del módulo de elasticidad, resistencia a la flexión, incremento en la resistencia a la compresión, resistencia al ataque químico, etc. Entre sus tantas aplicaciones se tiene la construcción de presas, hidroeléctricas, túneles, cubierta de graderías, cimentaciones marinas, pisos industriales, entre otras.

Algunas de las exigencias modernas para el concreto de alta resistencia es el desarrollo de los prefabricados de concreto. Este importante sector en Colombia ha venido creciendo desde la década del 50, a partir de la creación de empresas especializadas en prefabricación de elementos para suplir las necesidades del sector de la construcción, brindando nuevas metodologías constructivas eficientes y competitivas frente a los sistemas tradicionales. Hoy en día estas empresas se mantienen en el mercado comercializando bloques de concreto, ladrillos y adoquines; sin embargo, algunas empresas han apuntado aún más lejos ofreciendo prefabricados de piezas estructurales como vigas, columnas, losas de entrepiso o muros de cerramiento, entre otros, como una alternativa en el sector para incrementar la velocidad de construcción.

El concreto de alta resistencia permite la reducción de dimensiones en elementos estructurales tales como fundaciones, columnas, vigas, losas, entre otras, incrementando el espacio útil en edificaciones y reduciendo cuantías de acero por cada metro cúbico de concreto instalado. Sin embargo, para lograr estos beneficios se hace necesario el uso de adiciones como es el caso del humo de sílice (sílice activa, microsílice), cenizas volantes, escoria granulada de alto horno, puzolanas naturales (tales como el esquisto calcinado, arcilla calcinada o metacaolinita, entre otros). Todos estos materiales cuando son usados conjuntamente con el cemento Portland o el cemento adicionado, contribuyen para la mejoría de las propiedades del concreto endurecido, debido a sus propiedades hidráulicas o puzolánicas, o ambas. Para obtener buenos resultados, el uso de estos materiales debe ir acompañado de un excelente proceso de selección de los mismos y la reducción de la relación agua/material cementante (Aitcin, 2007).

Algunos científicos como Villar (2010) y Singh *et al* (2007) han realizado estudios de la ceniza de la hoja de bambú como un posible material puzolánico para la elaboración de concretos de alta resistencia. Sin embargo, a la fecha el autor de este trabajo desconoce que en Colombia se haya estudiado el uso potencial de este producto. Por lo tanto, el alcance principal de este proyecto consiste en lograr la caracterización de la ceniza de la hoja de bambú para verificar su uso como material puzolánico, ya sea como adición o llenante dentro de la mezcla de morteros y/o concretos.

Los resultados de la caracterización química y física de la ceniza de la hoja de bambú podrían ser de interés para los sectores de la industria del cemento, productores de concreto y cultivadores de bambú como tal; generando una nueva industria que involucre el aprovechamiento de la hoja, la cual hoy se considera como material de desecho o incluso es usada como abono orgánico en los campos de siembra de guadua y bambú.

Con base en la historia y la necesidad actual de muchas compañías del sector de la construcción, quienes ven la necesidad de construir elementos con mayor velocidad, cumpliendo con resistencias tempranas cada vez mayores, y sectores como el de los prefabricados de concreto, quienes desarrollan estructuras pre-esforzadas (pretensadas y/o postensadas), surge el interés en el uso de adiciones que puedan garantizar altas resistencias a edades tempranas –de manera que las piezas prefabricadas puedan ser entregadas a sus clientes en el menor tiempo posible– y que garanticen un pre-esfuerzo más eficiente.

La puzolana es un material silícico o silícico aluminoso, que, cuando está en forma de polvo fino y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento Portland para formar silicato de calcio hidratado y otros compuestos cementantes. Las puzolanas y las escorias se clasifican como material cementante suplementario o aditivo (adición) mineral. La Tabla 2 lista las especificaciones definidas para estos materiales según la *American Society for Testing and Material* (ASTM).

Tabla 2. Especificaciones y clases de los materiales cementantes suplementarios en los Estados Unidos

Escorias granuladas de alto horno de hierro —ASTM C 989 (AASHTO M 302)
Grado 80 Escorias con bajo índice de actividad
Grado 100 Escorias con índice moderado de actividad
Grado 120 Escorias con alto índice de actividad
Ceniza volante y puzolana natural—ASTM C 618 (AASHTO M 295)
Clase N
Puzolanas naturales crudas o calcinadas, incluyendo: Tierras diatomáceas (tobas) Sílex opalino y esquistos Tufo y cenizas volcánicas o pumitas (piedras pómez) Arcillas calcinadas, incluyendo metacaolinita y esquisto
Clase F
Ceniza volante con propiedades puzolánicas
Clase C
Ceniza volante con propiedades puzolánicas y cementantes
Humo de sílice — ASTM C 1240

El uso de materiales cementantes suplementarios en concreto viene creciendo desde la década del 70. La mayoría de estos materiales son subproductos de procesos industriales. Su empleo sensato es deseable no sólo bajo el punto de vista de la conservación del medio ambiente y de la energía, sino también por los beneficios que estos materiales pueden ofrecer al concreto.

Los materiales cementantes suplementarios se adicionan al concreto como parte del sistema cementante. Se los puede utilizar como adición o como sustitución parcial del cemento Portland o del cemento adicionado, dependiendo de las propiedades de los materiales y de los efectos esperados en el concreto.

Los materiales cementantes suplementarios se usan para mejorar una propiedad particular del concreto, tal como resistencia a la reactividad álcali-agregado. La cantidad óptima de adición se

debe establecer a través de pruebas para determinar si el material realmente mejora la propiedad y la correcta cantidad, pues una sobredosis o una dosis insuficiente pueden ser perjudiciales, o los efectos deseados no se logran. Los materiales cementantes suplementarios también reaccionan de manera diversa con los diferentes tipos de cemento (Aitcin, 2007).

Tradicionalmente, la ceniza volante, escoria, arcilla calcinada, esquistos calcinados y humo de sílice se usaban separadamente en el concreto. Actualmente, debido a la facilidad del acceso a estos materiales, los productores de concreto pueden combinar dos o más de estos materiales, para optimizar las propiedades del concreto. Las mezclas que usan tres materiales cementantes, llamadas mezclas ternarias, se están haciendo comunes. En los Estados Unidos, los materiales cementantes suplementarios se usan, por lo menos, en 60% del concreto premezclado (PCA, 2000).

1.2 Objetivo General

Determinar el proceso más adecuado para la obtención de la ceniza de la hoja de bambú y su caracterización química y física a través de análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difractometría de Rayos X (DRX), Espectrofotometría de Barrido Electrónico (SEM), entre otros, para la evaluación final como material llenante o de adición, en la preparación de mezclas de mortero y/o concreto de alta resistencia.

1.3 Objetivos específicos

- Identificar el procesamiento más adecuado de las hojas de bambú para la obtención de una ceniza con características de puzolana de acuerdo con la definición de la ASTM C618.
- Determinar la composición química de la ceniza obtenida de las hojas de bambú, mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX).
- Identificar la geometría y tamaño de las partículas de la ceniza de la hoja de bambú, mediante Microscopía electrónica de barrido (SEM) y el análisis de distribución de tamaño de partícula (DTP).
- Determinar la actividad puzolánica de la ceniza de hoja de bambú, mediante el análisis químico en una solución saturada de Hidróxido de Calcio (Ca(OH)_2).
- Evaluar el uso de la ceniza como material de adición o llenante para la elaboración de mezclas de mortero, verificando su resistencia a la compresión a 7 y 28 días, comparado con respecto a una mezcla base.

- Concluir acerca de la viabilidad del uso de la ceniza de hojas de bambú en las mezclas de mortero para la obtención de altas resistencias a la compresión.
- Plantear alternativas de aplicación en el sector de la construcción para la ceniza de la hoja de bambú, que sirvan como punto de partida para investigaciones futuras.

2. Estado del arte

El uso del concreto como material para la construcción de edificaciones, puentes, vías y elementos arquitectónicos ha permitido el crecimiento y el desarrollo de complejos urbanísticos a nivel mundial. Año tras año se generan cambios y desarrollos de la tecnología del concreto, buscando una mayor eficiencia y mejores resultados técnicos, que permitan crear estructuras cada vez más altas, más livianas y más seguras.

A continuación se presenta una descripción generacional del desarrollo de los concretos de alta resistencia, mostrando las necesidades y retos que han llevado a los ingenieros a desarrollar y buscar nuevas metodologías en la fabricación de éstos, y a explorar materiales denominados residuos en otros sectores industriales que sean compatibles con la química del cemento, de manera que se logre obtener beneficios en resistencia mecánica, física y ataque químico.

2.1. Una perspectiva a la historia

En la década del 70 comenzó a hacerse frecuente, sobre todo en edificios de gran altura, el uso de concretos especiales de alta resistencia; sin embargo, no existía realmente una gran diferencia en su fabricación con respecto al concreto común, ya que estos concretos de alta resistencia se realizaban con los mismos materiales, con la única diferencia que el proceso de selección de los materiales era muy cuidadoso y controlado (Freedman, 1971).

Hoy en día es común utilizar el término “concreto de alto desempeño” en vez de “concreto de alta resistencia”. El uso de la expresión “concreto de alto desempeño” tiene un sinnúmero de detractores, que critican la vaguedad de la expresión, y se preguntan ¿qué es el desempeño de un concreto?, ¿cómo puede ser éste medido? Cuando se usa la expresión “concreto de alta resistencia” se está hablando de un concreto que se diferencia de otro que se podría llamarlo normal, pero ¿cómo se puede diferenciar cuando es un concreto de alta resistencia y no un concreto normal? Esto es muy subjetivo y depende básicamente de la interpretación que cada persona le dé, por lo que no es igual para todos. Esta clase de discusiones pueden convertirse en un tema abrumador, pero si se considera el concreto en términos de su relación agua material cementante, se puede hablar que un valor de alrededor de 0,40 es sugerido como límite entre los concretos usuales y concretos de alto desempeño, por lo que este valor de 0,40 es un valor cercano al teórico sugerido por los expertos para garantizar la hidratación completa del cemento Portland (Powers, 1968).

En la década del 60, un pequeño grupo de diseñadores y productores de concreto con un espíritu pionero soñaron con poder crear un concreto de mejores especificaciones a las cuales estaban acostumbrados hasta entonces, logrando resistencias de diseño y construcción entre 15 MPa y 20 MPa, considerados concretos económicos y seguros. Es así como en el área de Chicago se

comenzó a utilizar el concreto de alta resistencia en cantidades realmente importantes y en estructuras de mayor envergadura (Freedman, 1971).

Los desarrollos mencionados fueron posibles en Chicago debido a que al mismo tiempo un valiente diseñador y un innovador productor de concreto comenzaron a trabajar juntos (Moreno, 1987). Su propuesta fue doblar la resistencia a la compresión que a la fecha era de tan solo 15 MPa a 30 MPa, teniendo en cuenta que los cementos y las mezclas disponibles en el entonces no eran los más adecuados para producir concretos de alta resistencia como los conocemos hoy en día, esta hazaña exitosa es considerada como un gran desafío.

En la década de los 60's en Norte América se estaba comenzando a usar la ceniza volante en cantidades significativas. Los productores de ceniza volante tan solo habían comenzado a garantizar la calidad y la consistencia de sus productos, al mismo tiempo que los productores de concreto aún no se daban cuenta de el gran potencial económico que podría representar las cenizas volantes de buena calidad (Aitcin, 2007).

Hacia la década de los 70's el desarrollo de concretos con resistencias a la compresión entre 45 MPa y 60 MPa ya se había logrado; por lo tanto, para poder superar dichos valores debían encontrar la forma de lograr una disminución importante en la relación agua cemento de la mezcla. Por lo anterior, la selección del cemento tomó importancia, ya que no solo bastaba un cemento con buenas propiedades mecánicas sino que a su vez se necesitaba que contara con unas buenas características reológicas. En otras palabras: la mezcla de concreto debía alcanzar un pérdida de asentamiento relativamente pequeña durante las primeras cuatro horas después del mezclado.

Hasta entonces se presentaban dos grandes problemas, el primero de ellos era la disminución de los asentamientos y el segundo la aparición de burbujas de aire al interior del concreto, lo que ocasionaba pérdidas en su manejabilidad y en la resistencia a la compresión del mismo. El uso de un producto que lograra disminuir la cantidad de agua en la mezcla y la cantidad de aire en la misma era absolutamente necesario, por lo que la industria desarrolló los aditivos superplastificantes, los cuales fueron introducidos por primera vez al mercado del concreto de alto desempeño en Norte América a principios de los 70's (Tucker, 1932).

A finales de la década del 60 los superplastificantes ya eran usados en el concreto al mismo tiempo en Japón y en Alemania (Hattori, 1981). La industria del concreto comenzó demasiado tarde a utilizar superplastificantes, ya que desde 1938 en Estados Unidos se había patentado la fabricación y utilización de reductores de agua basados en policondensados de naftaleno (Tucker, 1932). Al mismo tiempo los lignosulfatos eran tan económicos y su desempeño era considerado tan satisfactorio para concretos con resistencias a la compresión entre 15 MPa a 25 MPa, que no se consideró necesario buscar reductores de agua con mucha más eficiencia pero a un costo más elevado.

Solo hasta la decada del 80 se comenzaron a utilizar los superplastificantes como reductores de agua de la mezcla; hasta entonces se habían venido utilizando como fluidificantes más que como reductores, incrementandose así su dosificación al interior de la mezcla, haciendose mucho más poderosos que los lignosulfatos y usándose antes que ingresara aire en el concreto (Ronnenberg, 1990).

Con el uso de superplastificantes y su incremento de dosificación al interior de las mezclas de concreto se logró una disminución importante en la relación agua cemento, alcanzando valores de hasta 0,30, lo cual significó un incremento en la resistencia, pero a su vez se incrementaron los problemas de asentamiento. Con el fin de tratar de superar este problema, los fabricantes de superplastificantes desarrollaron formulaciones de superplastificantes con retardantes sin obtener mayor éxito.

En un reporte de Bache (1981) se mostró que en un micro concreto, tal y como él lo llamó, logró disminuir la relación agua cemento hasta 0,16, usando una alta dosificación de superplastificante y un nuevo y fino sustituto para el cemento (humo de sílice), el cual fue capaz de alcanzar resistencias a las compresión de 280 MPa; sin embargo, estos resultados y procedimientos fueron solamente obtenidos bajo condiciones ideales de laboratorio, utilizando procedimientos de curado cuidadosos. De esta experimentación de Bache se obtuvo algunos puntos importantes tales como que la resistencia última a la compresión del concreto no solo depende de la calidad, cantidad y eficiencia de los materiales cementantes utilizados, sino tambien en el grado de compactación y la porosidad última de la matriz del sólido formado después de que el proceso de endurecimiento es completado.

El cemento en la mezcla de concreto puede no hidratarse completamente, este hecho depende básicamente del contenido de agua en la misma, lo que provoca que en relaciones de agua cemento muy bajas se corra el riesgo que el cemento no comience su proceso de hidratación normal.

Con base en lo anterior, se puede decir que solamente los granos más finos de cemento podrían hidratarse completamente, provocando que en el interior de los granos más gruesos y los granos más ricos en Silicato Dicálcico (C_2S) no se logre una correcta hidratación, lo cual termina con una participación de los mismos al interior de la mezcla tan solo como material llenante (Aitcin, 1983). Con una buena y cuidadosa selección del cemento y el superplastificante, es posible disminuir la relación agua / material cementante a 0,30, e inclusive mucho menos, obteniendo una buena resistencia a la compresión y una buena manejabilidad del concreto. En un futuro muy cercano los concretos de alto desempeño tendrán relaciones de agua / material cementante muy bajas pudiendo ser desarrolladas y alcanzadas en el campo si se prueba que se utilizan en términos de rendimiento y economía.

2.2. La llegada del humo de sílice

Desde que Bache uso el humo de sílice para disminuir la relación agua material cementante en la mezcla de concreto, y una vez que éste se logró suministrar de forma tal que se pudo utilizar a un precio más razonable, la industria tomó ventaja de este nuevo material cementante (Aitcin, 2007). A pesar de que la primera utilización concreta de este subproducto de la fabricación de silicio o ferrosilicio fue documentada en 1952 por el investigador Noruego, Boris C. Bernhardt, sólo fue hasta después de 1970 que el humo de sílice se comenzó a utilizar como material cementante en el concreto en Escandinavia (Aitcin, 2007).

Durante mucho tiempo los productores de silicio y ferrosilicio permitieron que el humo de sílice se escapara a la atmósfera por medio de sus chimeneas; sin embargo, por legislación ambiental de algunas ciudades de muchos países, este material particulado debía ser controlado y capturado, por lo que los productores se vieron obligados a invertir grandes cantidades de dinero en la investigación del manejo y recolección de este material, el cual aparentemente no tenía mucha aplicación a nivel industrial para su época. Sin embargo, la situación era tan complicada de manejar que los productores no eran optimistas que de este gran problema pudieran tomar ventaja más adelante.

Los primeros resultados interesantes fueron obtenidos en Escandinavia usando el humo de sílice en el concreto, descubrimiento realizado por Bache y sus colaboradores en Dinamarca; después de un gran esfuerzo de investigación a principios de los 80's en muchos otros países, como resultado se obtuvo la rápida aceptación del humo de sílice como un material cementicio suplementario para el concreto casi en cualquier parte del mundo en menos de cinco años. "La particular ventaja del uso del humo de sílice como una fina y reactiva puzolana para el uso en concretos de alto desempeño, fue rápidamente reconocida" (Aitcin, 1986).

Al usar el humo de sílice se ha demostrado que es posible hacer concretos con resistencia a la compresión en un rango entre 100 MPa y 150 MPa (Detwiler, 1991), dando un punto de partida para posteriores investigaciones en el uso de otros materiales que pudiesen ser utilizados para lograr las mismas o aún mejores ventajas de resistencia en la elaboración de concretos.

2.3. Antecedentes Históricos de las Puzolanas

En la historia de la civilización humana el descubrimiento de los materiales y de las acciones cementantes hidráulicas fue posterior al descubrimiento del fuego y debió ser poco posterior al descubrimiento de la cerámica. Tal descubrimiento, por lo que se refiere a los pueblos mediterráneos, debió pasar de egipcios a griegos y romanos, siendo ampliado y perfeccionado en etapas sucesivas. Por razones de puro azar geográfico y geológico, los griegos y romanos, primeros en conocer "la cal", pudieron mezclarla con materiales naturales de origen volcánico que tenían a la mano. Es probable que el primer empleo de estos materiales fuera el de servir de agregados

para los morteros de cal. La observación debió hacer el resto, y de la comparación de la resistencia y el comportamiento general de los conglomerados hechos con cal y con materiales volcánicos y no volcánicos, surgió la nueva técnica de mezclar los primeros, ya como materiales activos, con la cal (en polvo y en seco o en húmedo). Finalmente de todo esto se logró llegar a los materiales que han pasado a la historia como “cementos y morteros romanos”, con base en cal y puzolana, o cal, puzolana y arena, respectivamente.

Tales materiales fueron la tierra griega de Santorín y las cenizas y tobas romanas de Pozzuoli, localidad que dejó como legado el nombre genérico de puzolanas para éstos y para materiales similares de ahí en adelante. De las obras antiguas realizadas con puzolanas que han llegado hasta nuestros días como invaluable reliquia de la civilización romana pueden citarse: panteones, coliseos, estadios, basílicas, acueductos, cisternas, puentes, puertos y muchas otras estructuras que han perdurado. Y lo han hecho como no han podido hacerlos muchas obras realizadas en la Edad Media, con materiales conglomerantes mal cocidos y exentos de puzolanas activas. Por el contrario, cuando el defecto de cocción y la falta de puzolana se subsanaron, las obras cobraron de nuevo el vigor y con él la longevidad (Salazar, 2002).

2.4. Bambú, una alternativa

En la actualidad se ha venido probando el uso de materiales denominados residuos industriales, para el mejoramiento de las propiedades del concreto. En el caso de los materiales del sector agrícola se tiene la cascarilla del arroz, bagazo de la caña de azúcar, médula de coco, gránulos de corcho, y cenizas volantes obtenidas de la incineración de residuos sólidos, entre muchos otros residuos que han sido usados para la elaboración de morteros y concretos tal como se comentó anteriormente (Hui-sheng Shi, 2009).

La escogencia de la hoja del bambú para ser evaluada como puzolana artificial en este trabajo no fue al azar, para ésta se tomaron como base estudios previos realizados por Dwivedi (2006) sobre la evaluación del uso de la ceniza de la hoja de bambú como puzolana en la industria del cemento en la India; Singh *et al* (2007) estudiaron la hidratación de la ceniza de la hoja de bambú mezclada con cemento Portland en la industria de la India y finalmente investigaciones como la de Villar (2010), en la cual se logró la caracterización y determinación de parámetros cinéticos de la ceniza de la hoja de bambú. Países como India y Brasil son considerados como de los mayores productores de bambú en Asia y Latinoamérica respectivamente.

En Colombia existe gran cantidad de productores de bambú y guadua a nivel industrial, los cuales son miembros de la Sociedad Colombiana de Bambú, resaltándose la región del Eje Cafetero como una de las principales zonas del país con una cantidad importante de hectáreas sembradas con este tipo de producto.

Se estima que existen aproximadamente 51.000 Ha sembradas con guadua y bambú en Colombia, con 28.000 Ha ubicadas en la región cafetera, de las cuales en casi toda su totalidad son para el comercio de sus tallos como material de construcción —debido a sus buenas propiedades mecánicas—, posicionándose en el mercado nacional de manera tal que en la última actualización del Código Colombiano Sismo Resistente (NSR-10) se introdujo en su capítulo G.12 requisitos para el diseño estructural con este tipo de material (González, 2008).

El Bambú o guadua realmente no es un árbol, es una HIERBA o PASTO gigante, es un bambú leñoso 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 del cual existen realmente en el mundo cerca de 1.000 especies, de las cuales 500 de ellas se encuentran en América. De la totalidad a nivel mundial aproximadamente 20 conforman las especies prioritarias de bambú y dentro de ellas Colombia tiene una que posee las mejores propiedades físico-mecánicas del mundo y extraordinaria durabilidad: La *Guadua Angustifolia* (Teneche, 2010).

En Colombia la guadua se desarrolla en condiciones óptimas desde los 900 msnm hasta los 1600 msnm, pero se encuentra desde el nivel del mar hasta los 2000 msnm con desarrollo menos satisfactorio. La especie *Guadua Angustifolia* requiere de suelos sueltos, fértiles, con mediana profundidad, húmedos pero no inundables. Los suelos derivados de cenizas volcánicas y 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 5000 mm. El rango óptimo de temperatura oscila entre 20 y 26°C y una humedad relativa del 80% (Nieto, 1985).

El bambú es una planta leñosa con un sistema de raíces fuerte y muy abundante el cual está conformado por un rizoma o caimán; es de crecimiento rápido, alcanza alturas de hasta 25 m con diámetros que oscilan entre 10 y 25 cm, su desarrollo definitivo se logra de 3 a 6 años de haber sido sembrado. “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, 2010).

El bambú es la planta de crecimiento más acelerado del planeta, crece más de un 30,00% que el árbol de desarrollo más rápido que existe en el mundo. Algunas especies como la *Guadua Angustifolia* o el *Dendrocalamus Giganteus* pueden crecer hasta un metro por día. Su primer corte puede ser hecho entre los 3 y 5 años después de plantado, mientras que las especies leñosas pueden tardar hasta 20 años para que puedan ser aprovechadas. Todo esto hace que el bambú sea una inversión rentable a muy corto plazo (Bambusetum, 2012).

El bambú es considerado un elemento crítico en el balance entre oxígeno y dióxido de carbono de la atmósfera, generando más oxígeno que las especies leñosas; debido a su sistema radicular de

rizomas sirve eficientemente para la retención y acumulación de agua en los suelos. Como material en la construcción tiene una alta versatilidad, siendo éste usado para la construcción de puentes, cubiertas, cerchas e incluso edificaciones de baja altura. Es un material con una resistencia a la tensión muy alta en relación a su peso. La capacidad a tensión del bambú es de un 20% superior a la del acero de refuerzo tradicional y con un peso mucho menor (Bambusetum, 2012).

Entre todas las especies de bambú en el planeta, algunas son realmente aptas para la construcción, otras producen brotes comestibles muy apetecidos en la comida oriental, hay especies que son usadas para construir muebles, artesanías y joyas, otras sirven como ornamentales debido a su belleza, pero en ninguno de los casos se evidencia el aprovechamiento de su follaje para la fabricación de materia prima para el sector de la construcción, industria o incluso el sector artesanal (Scurlock *et al.*, 2000).

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).

La producción anual en Colombia es de aproximadamente 36.500 m³ de bambú y guadua en la zona cafetera, sin embargo del resto del país no se tienen casi datos de producción (González, 2008).

La guadua o bambú recibe diferentes nombres dependiendo de la región y el país, algunos de los más populares se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Nombres populares de la Guadua o Bambú.

País	Nombre Popular
Colombia	caña brava, caña mansa, Garipa
Ecuador	caña brava, caña mansa
Perú	guadua, ipa, marona
Venezuela	juajua, puru puru

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

La hoja de la guadua o el bambú tiene diminutos cuerpos de sílice procedentes de las sales minerales absorbidas del suelo. Los cuerpos de sílice se encuentran en las células silíceas; son importantes en los bambúes, puesto que existen en grandes cantidades y en diferentes formas y tamaños, y han sido usados para diferenciar a los subgrupos de los bambúes existentes (Bambusetum, 2012).

3. Materiales para concretos de alta resistencia

El concreto está compuesto principalmente de agregados (grava y arena), agua y cemento; sin embargo, el avance en la tecnología del concreto ha venido incorporando en los diseños de las mezclas productos tales como los aditivos y adiciones minerales, los cuales mejoran las propiedades del concreto, permiten reducir la relación agua / material cementante sin pérdida de manejabilidad de la mezcla y alcanzar resistencias tempranas mayores que las obtenidas en el pasado. A continuación se hace una breve descripción de las propiedades de cada uno de los materiales que componen una mezcla de concreto en la actualidad, de manera tal que se logre diferenciar el papel que cada uno desempeña al interior de la misma.

3.1. Agregados del concreto de alta resistencia

Los agregados suelen representar del 75,00 al 80,00%, aproximadamente, del volumen absoluto de todos los componentes de una mezcla de concreto. Es de esperar que éstos tengan una influencia importante en las propiedades del concreto. Además de su uso por economía, los agregados proporcionan al concreto una mejor estabilidad dimensional y mayor resistencia al desgaste.

En las mezclas de concreto de alta resistencia, mayores de 42 MPa, y particularmente de ultra alta resistencia, mayores de 80 MPa, con relaciones agua / material cementante entre 0,20 y 0,30, Aitcin *et al.*, (1987) encontraron que el micro-agrietamiento en la zona de interface entre los agregados y la matriz de pasta endurecida ya no es el punto débil del sistema, sino que son la mineralogía y la resistencia misma de los agregados, los que asumen el rol de punto débil y los que controlan la resistencia última del concreto, fallando en forma de fracturas transgranulares sobre la superficie de falla del concreto. Concluyeron entonces que los minerales de los agregados deben ser fuertes, inalterados y de grano fino, para conseguir altas resistencias. La presencia de fisuras intra e intergranulares, los minerales de grano grueso parcialmente descompuestos, y de roturas y planos de laminación tienden a debilitar los agregados, y por lo tanto, la resistencia última del concreto.

Con relación al tamaño de los agregados, se conoce que la resistencia a la compresión del concreto se incrementa cuando el tamaño máximo del agregado grueso disminuye. El Comité ACI 323 establece que para concretos de alta resistencia, con altos contenidos de cemento y bajas relaciones agua / material cementante, el tamaño máximo del agregado grueso debe mantenerse alrededor de 9,5 mm. Esto es de esperar, pues el agregado de menor tamaño tiene una mayor área de superficie específica, que resulta en una mayor adherencia entre la pasta y el agregado, y, consecuentemente, en una mayor resistencia del concreto. Además, *“el tamaño menor de agregado provee un mayor volumen de pasta, generando menos restricción a los cambios de volumen de la pasta, por lo que no se inducen esfuerzos adicionales en ella, y no se generan microgrietas antes de la aplicación de la carga”* (Hassan *et al.*, 2006).

La norma que rige la selección de los agregados para el concreto en Colombia es la NTC-174 “Concretos – Especificaciones de los Agregados para concreto”, equivalente a la norma ASTM C-33.

A continuación se mencionan las propiedades más relevantes para el uso de los agregados en concretos de alta resistencia.

3.1.1. Materiales contaminantes en los agregados

Existen gran cantidad de materiales que con cierta frecuencia acompañan a los agregados, y cuya presencia no es para nada benéfica debido a los efectos adversos que producen en el concreto. Entre todos estos materiales contaminantes, los más comunes son los finos indeseables (limo y arcilla), la materia orgánica, el carbón y el lignito, las partículas ligeras y los terrones de arcilla y otras partículas desmenuzables.

Si bien el estado ideal sería de disponer de agregados completamente libres de estas materias perjudiciales, en la práctica esto no es siempre factible, por lo cual se hace necesario tolerarlas en proporciones lo suficientemente reducidas para que sus efectos nocivos resulten poco significativos. La siguiente información se basa en el taller de concreto dictado por la ICA (2000) (Empresa de Construcción de Infraestructura Mexicana fundada en 1947), en ciudad de México.

✓ Limo y arcilla

El limo o lógamo es un material suelto con una granulometría comprendida entre la arena fina y la arcilla, ocupando el segundo lugar en la clasificación granulométrica después de las arcillas.

El limo se constituye, entonces, como un material granular fino, sin propiedades plásticas, cuyas partículas tienen tamaños normalmente comprendidos entre 2 y 60 micras aproximadamente, en tanto que la arcilla corresponde al material más fino, integrado por partículas que son menores de 2 micras y que sí posee propiedades plásticas.

✓ Materia orgánica

La materia orgánica que contamina los agregados suele hallarse principalmente en forma de humus, fragmentos de raíces y plantas, y trozos de madera. La contaminación excesiva con estos materiales, básicamente en la arena, ocasiona interferencia en el proceso normal de hidratación del cemento, afectando la resistencia y durabilidad del concreto.

✓ **Partículas inconvenientes**

Además de los contaminantes ya mencionados, existen fragmentos de materiales de calidad inadecuada que con cierta frecuencia se encuentran en los agregados, principalmente en los de origen natural. Entre dichos materiales inconvenientes cabe mencionar las partículas suaves y desmenuzables, como los terrones de arcilla y los fragmentos de rocas alteradas, las partículas ligeras como las de carbón y lignito y las de rocas muy porosas y débiles, que afectan la resistencia y durabilidad del concreto.

✓ **Sales inorgánicas**

Las sales inorgánicas que ocasionalmente pueden hallarse como contaminación en los agregados de origen natural son los sulfatos y los cloruros, principalmente estos últimos, como ocurre en los agregados de procedencia marina. La presencia excesiva de estas sales en la matriz del concreto es indeseable por los daños que pueden ocasionar, desencadenando un proceso acelerado de corrosión en el acero de refuerzo.

3.1.2. Calidad física intrínseca

Al examinar la aptitud física de los agregados en general, es conveniente diferenciar las características que son inherentes a la calidad esencial de las rocas constitutivas de los aspectos externos que corresponden a sus fragmentos. Entre las características físicas que contribuyen a definir la calidad intrínseca de las rocas se destacan su sanidad, porosidad y absorción, resistencia mecánica, resistencia a la abrasión, módulo de elasticidad y propiedades térmicas.

✓ **Porosidad y absorción**

La porosidad de un cuerpo sólido es la relación de su volumen de vacíos entre su volumen total, incluyendo los vacíos, y se expresa como porcentaje en volumen. Todas las rocas que constituyen los agregados de peso normal son porosas en mayor o menor grado, pero algunas poseen un sistema de poros que incluye numerosos vacíos relativamente grandes (visibles al microscopio), que en su mayoría se hallan interconectados, y que las hace permeables. De este modo algunas rocas, aunque poseen un bajo porcentaje de porosidad, manifiestan un coeficiente de permeabilidad comparativamente alto, es decir, más que el contenido de vacíos influye en este aspecto su forma, tamaño y distribución. Por ejemplo, una roca de estructura granular con 1,00% de porosidad, puede manifestar el mismo coeficiente de permeabilidad al agua, que una pasta de cemento hidratada con 50,00% de porosidad pero con un sistema de poros submicroscópicos. Finalmente la porosidad excesiva provoca mayor consumo de agua en la pasta de cemento y pérdida en la resistencia a la fractura del agregado grueso.

✓ **Sanidad**

Entre los atributos que permiten definir la calidad física intrínseca de las rocas que constituyen los agregados tiene mucha importancia la sanidad porque es buen índice de su desempeño predecible en el concreto.

En la terminología aplicable, la sanidad se define como la condición de un sólido que se halla libre de grietas, defectos y fisuras. Particularizando para el caso de los agregados, la sanidad se describe como su aptitud para soportar la acción agresiva a que se exponga el concreto que los contiene, especialmente la que corresponde al intemperismo. En estos términos, resulta evidente la estrecha relación que se plantea entre la sanidad de los agregados y la durabilidad del concreto en ciertas condiciones.

✓ **Resistencia mecánica**

Las partículas de los agregados permanecen dispersas en la pasta de cemento y de este modo no se produce contacto permanente entre ellas. En tal concepto, la resistencia mecánica del concreto endurecido, especialmente a compresión, depende más de la resistencia de la pasta de cemento y de su adherencia con los agregados, que de la resistencia propia de los agregados solos. No obstante, cuando se trata del concreto de muy alta resistencia, con valores superiores a los 50 MPa o en el caso del concreto compactado con rodillo (CCR), en el cual si se produce contacto entre las partículas de los agregados, la resistencia mecánica de los agregados adquiere mayor influencia en la resistencia a la compresión del concreto.

✓ **Resistencia a la abrasión**

La resistencia que los agregados gruesos oponen a sufrir desgaste, rotura o desintegración de partículas por efecto de la abrasión, es una característica que suele considerarse como un índice de su calidad en general, y en particular de su capacidad para producir concretos durables en condiciones de servicio donde intervienen acciones deteriorantes de carácter abrasivo. Asimismo, la resistencia a la abrasión se considera un buen indicio de la aptitud del agregado grueso para soportar sin daño esfuerzos de corte que frecuentemente recibe en el curso de su manejo previo a la fabricación del concreto.

✓ **Módulo de elasticidad**

Las propiedades elásticas del agregado grueso son características que interesan en la medida que afectan las correspondientes del concreto endurecido, en particular su módulo de elasticidad y su relación de Poisson. Estas propiedades están directamente relacionadas con la deformación del concreto ante la aplicación de cargas externas, principalmente.

✓ Propiedades térmicas

El comportamiento del concreto sometido a cambios de temperatura resulta notablemente influenciado por las propiedades térmicas de los agregados; sin embargo, como estas propiedades no constituyen normalmente una base para la selección de los agregados, lo procedente es verificar las propiedades térmicas que manifiesta el concreto, para tomarlas en cuenta al diseñar aquellas estructuras en que su influencia es importante. Entre las propiedades térmicas del concreto, la que interesa con mayor frecuencia para todo tipo de estructuras sujetas a cambios significativos de temperatura es el coeficiente de expansión térmica lineal, que se define como el cambio de dimensión por unidad de longitud que ocurre por cada grado de variación en la temperatura, y que se expresa comúnmente en millonésima/°C.

3.1.3. Tamaño máximo de las partículas

Las razones para determinar el tamaño máximo del agregado se deben a que estas propiedades afectan las proporciones relativas de los agregados, el cemento y el agua necesarios para elaborar un cierto concreto, así como la manejabilidad, la economía, la porosidad y la contracción del mismo.

3.2. Cemento

Para la producción de concreto de altas resistencias no es necesario el uso de ningún tipo especial de cemento: muchos investigadores han logrado obtener concretos de altas resistencias utilizando cementos comerciales. Sin embargo, esto no quiere decir que la selección de una clase de cemento u otra sea totalmente indiferente para poder obtener concretos de alta resistencia. A continuación se muestra la influencia del cemento en la mezcla, que tipos de cementos se encuentran en el mercado y sus posibles usos.

3.2.1. Influencia de la selección del cemento

El cemento debe cumplir con las especificaciones de la ASTM C150/C150M - 12 “Especificación Normalizada para Cemento Portland”, produciendo morteros de altas resistencias, además de ser compatible con los diferentes aditivos y adiciones usados en la mezcla (Gállico, 1990).

La clase de cemento es un factor importante, pues dependiendo de ésta se logran variaciones en la resistencia de la mezcla. Se recomienda realizar estudios de resistencia de morteros en probetas cúbicas con distintos cementos comerciales antes de seleccionar cual usar. Es de vital importancia la uniformidad de la fuente de cemento, de manera que se pueda garantizar uniformidad en los resultados obtenidos, evitando la dispersión de los mismos. Otro punto a estudiar y que influye de manera importante en la selección del tipo de cemento, es la compatibilidad cemento-aditivos, que dependerá básicamente de las características de ambos (Gállico, 1990).

La clase de cemento a utilizar ha constituido desde siempre una gran controversia. Existen autores que afirman que el Cemento tipo III (clasificación ASTM Americana, en la cual se incluyen los cementos de alta resistencia inicial), da las mayores resistencias, mientras que otros autores defienden que no aporta ninguna ventaja frente a los tipos I y II (el primero incluye los cementos Portland ordinarios, y el segundo los de bajo calor de hidratación).

En la actualidad existen diferentes tipos de cementos, de acuerdo con la clasificación de la ASTM, los cuales se listan a continuación:

✓ **Cemento Tipo I**

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

✓ **Cemento Tipo IA**

- Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo I, donde se desea incorporación de aire.

✓ **Cemento Tipo IP**

- Mayor porcentaje de puzolana.
- Propiedades hidráulicas.
- Usado en climas con temperaturas elevadas.
- Utilizado en climas muy lluviosos.

✓ **Cemento Tipo II**

- Para uso general, más específicamente cuando se desea resistencia moderada a los sulfatos.
- Menor calor de hidratación.
- Óptimo para climas con temperaturas elevadas.
- Orillas del mar.
- Selva donde hay presencia de aguas servidas.

✓ **Cemento Tipo IIA**

- Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II, donde se desea incorporación de aire.

- ✓ **Cemento Tipo II (MH)**
 - Para uso general, más específicamente cuando se desea un calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos.

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

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

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

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

- ✓ **Cemento Tipo V**
 - Para usar cuando se desea alta resistencia a los sulfatos.
 - Mayor porcentaje de silicatos y aluminatos.

Dependiendo del tipo de cemento seleccionado es también la cantidad de agua requerida en la mezcla: ya que estos concretos de altas resistencias contienen grandes cantidades de cemento, requieren del uso de elevadas cantidades de agua para su hidratación, afectando finalmente la resistencia final del concreto. Carrasquillo (1987) realizó ensayos con tres clases de cemento (Tipo I, II y III) obteniendo mayores resistencias (del orden del 10,00%) con el cemento tipo II, debido a que la demanda de agua de éste fue menor.

Para incrementar la resistencia del concreto, la cantidad de cemento en la mezcla debe ser sensiblemente mayor a la normalmente utilizada en concreto convencional. Por tal razón es previsible un aumento del calor de fraguado o hidratación. Si este hecho puede ser considerado como un problema importante para la obra, entonces es recomendable el uso de cementos con bajo calor de hidratación (Comité del ACI 211, 2011).

La composición química del cemento Portland varía dependiendo del tipo y uso, presentando componentes primarios, secundarios y otros posibles. Los componentes y límites de cada uno de éstos para el cemento Portland en general son indicados conforme se muestran en las Tablas 4 y 5 (Cerna, 2004).

Tabla 4. Composición química del cemento Portland.

COMPONENTES PRINCIPALES	COMPONENTES SECUNDARIOS	OTROS COMPONENTES POSIBLES
CaO	MgO	Mn ₂ O ₃
SiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅
Al ₂ O ₃	K ₂ O Na ₂ O (Álcalis)	TiO ₂
Fe ₂ O ₃	C.L (CaO libre) R.I. (Residual Insoluble) P.F. (Pérdida al fuego) H ₂ O, CO ₂ (Materia Orgánica)	Fluoruros

Tabla 5. Composición química centesimal del cemento Portland.

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)	ABREVIATURA
CaO	61 - 67	C
SiO ₂	20 - 27	S
Al ₂ O ₃	4 - 7	A
Fe ₂ O ₃	0,5 - 4	F
MgO	0,1 - 5	M
SO ₃	1 - 3	S1
K ₂ O y Na ₂ O	0,25 - 1,5	Álcalis

La información de la Tabla 5 es una guía límite de los componentes del cemento, sin embargo cada productor está en la necesidad de suministrar y controlar las cantidades de cada uno de estos conforme a lo estipulado en la ASTM C 114 11b "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement".

La química del cemento puede mostrar como éste interactúa con adiciones naturales o artificiales para formar compuestos que permiten un mejor desempeño de la mezcla de concreto ante cargas o ataques químicos y físicos. Es por esto que a continuación se muestra un poco el proceso de

fabricación del cemento y se describen cada uno de los componentes primarios del mismo, desde su punto de vista químico, de manera tal que más adelante se pueda comprender mejor su interacción con la ceniza de la hoja de bambú.

3.2.2. Química del cemento

A continuación se hace una breve descripción de la química del cemento, tomando como base la referencia de Cerna (2004).

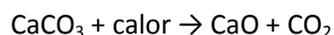
Los elementos principales para la fabricación del cemento pueden provenir de diferentes minerales, como por ejemplo: la caliza aporta el CaO, la arcilla aporta SiO₂ y el Al₂O₃, la pirita o hematita aporta el Fe₂O₃, etc. Estos materiales individuales se pueden mezclar previamente a la fabricación del cemento o puede usarse una caliza que contenga todos los elementos en las debidas proporciones.

La materia prima pasa por un horno en donde, al elevarse su temperatura a 1450 °C, se recombinan los cuatro elementos antes indicados: Óxido de Calcio, Bióxido de Silicio, Óxido de Aluminio y Óxido de Hierro, produciéndose el Clinker. Si éste último fuera molido finamente para ser utilizado como cemento, en el momento de su mezcla con el agua fraguaría casi de inmediato, no permitiendo de esta manera su manipulación así como su instalación; por ésta razón, en el momento de la molienda del Clinker, se le adiciona a éste yeso di-hidrato, con el objeto de retardar el tiempo de fraguado.

Tal como se mencionó anteriormente, las materias primas que se usan para la fabricación del Clinker aportan cuatro óxidos fundamentales: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y CaO, mientras que el MgO, Na₂O y K₂O, pueden considerarse como accidentales debido a su pequeño porcentaje. Por consiguiente, la composición química del clinker se presenta por medio del sistema cuaternario: CaO – SiO₂ - Al₂O₃ - Fe₂O₃.

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

- ✓ **Óxido de Calcio (CaO):** Este producto se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas (calizas o dolomías); con un alto contenido en carbonato de calcio (CaCO₃), a una temperatura de unos 900 °C según la siguiente reacción:



- ✓ **Bióxido de Silicio (SiO₂):** Se encuentra en abundancia en la naturaleza, formando parte de los silicatos, en las variedades cristalizadas cuarzo β, tridimita r, cristobalita β y en forma vítrea en la sílice fundida.

La sílice pura o cuarzo β , estable a temperatura ordinaria, se transforma a 573 °C en cuarzo α , cristalizando en prismas hexagonales (densidad: 2,65 y dureza: 2,7); a 870 °C se obtiene la tridimita α , de las que existen la variedad α , β y γ (densidad: 2,28) y a 1 470 °C se forma la cristobalita α (densidad: 2,33), se funde a 1710 °C (densidad: 2,20) , ocupando este cuarzo vítreo un volumen mayor que el cuarzo β .

Para que el cuarzo se transforme en tridimita y cristobalita hay que calentarlo muy despacio, pues ordinariamente a los 1600 °C forma una masa vítrea pastosa que no cristaliza al enfriarse. Aunque la Sílice sea químicamente inerte a la temperatura ordinaria, reacciona enérgicamente con las bases, a temperaturas elevadas, formando los silicatos. El bióxido de silicio, a pesar de no unirse directamente con el agua se le considera como anhídrido, formando gases del ácido silícico que, aunque no se hayan aislado, se les puede considerar como hidratos SiO_2 , H_2O , o SiO_3H_2 (ácido meta silícico), y el SiO_2 , $2\text{H}_2\text{O}$ o SiO_4H_4 (ácido orto-silícico), aun con más moléculas de agua y bióxido de silicio se forman compuestos muy complejos.

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

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

- ✓ **Óxido Férrico (Fe_2O_3):** Es muy abundante en la naturaleza, constituyendo el mineral de hierro llamado oligisto y hematites roja. En el cemento Portland se encuentra en dosis pequeñas, pues provienen de las impurezas de las arcillas, pero en los cementos aluminosos alcanzan proporciones importantes procediendo de la bauxita. Este óxido da el color al cemento. Se parece a la alumina, cambiándose principalmente con la cal. Existen dos óxidos férricos hidratados amorfos, uno de color amarillo y el otro rojizo de fórmula: $\text{Fe}(\text{OH})_3$, H_2O .

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

El orto-silicato de calcio se le puede considerar formado por la combinación de los dos óxidos: 2CaO , SiO_2 , o bien SiO_4Ca_2 , como si fuera la sal cálcica del ácido orto-silícico SiO_4H_4 , lo cual representa bien su composición, pero no su estructura (se ha comprobado al estudiar con rayos X, que la estructura de las moléculas de los silicatos están formados por complejos de silicio-oxígeno, en los que el silicio forma cadenas con dos átomos de oxígeno).

Por otro lado, las combinaciones del silicio-oxígeno sólo existen en un estado sólido y no dan iones libres, por lo que a los compuestos de los silicatos no se los puede considerar ionizados en el agua (Cerna, 2004).

- ✓ **Silicatos de Calcio:** El óxido de calcio y el bióxido de silicio reaccionan a elevada temperatura, formando los siguientes compuestos:
 - **Silicato Mono-cálcico (SiO_2CaO):** O Meta-silicato. Existen dos variedades, la α y la β , que forman el mineral llamado Wollostonita, siendo estable hasta $1150\text{ }^\circ\text{C}$, transformándose en la variedad α , que se funde a $1512\text{ }^\circ\text{C}$. Cristaliza en el sistema monoclinico, es inerte hidráulicamente, el agua no le ataca más que al cabo de varios años. No se halla en el Clinker del cemento Portland (Cerna, 2004).
 - **Silicato Sesquicálcico ($\text{SiO}_2\text{3CaO}$):** Se disocia a $1745\text{ }^\circ\text{C}$ en silicato bicálcico y líquido, no encontrándose en el Clinker de cemento Portland, pulverizándose en parte cuando se enfría lentamente.
 - **Silicato Bicálcico ($\text{SiO}_2\text{2CaO}$):** U orto-silicato. Hay tres formas alotrópicas: la α , estable por encima de $1410\text{ }^\circ\text{C}$, se funde a $2130\text{ }^\circ\text{C}$ y por enfriamiento se transforma en la forma β , a $1420\text{ }^\circ\text{C}$; y la forma γ va acompañada de un aumento de volumen del 10%, reduciéndose a polvo espontáneamente al enfriarse a la temperatura ordinaria, apreciándose en las escorias de altos hornos y en los cementos de Portland ricos en este compuesto.
 - **Silicato Tricálcico ($\text{SiO}_2\text{3CaO}$):** Es el principal constituyente del cemento Portland. Se obtiene por sinterización calentado una mezcla de carbonato cálcico y sílice a $1400\text{ }^\circ\text{C}$. Tiene un peso específico de 3,15, atribuyéndole las resistencias iniciales del cemento Portland.
 - **Silicato Pentacálcico ($\text{SiO}_2\text{5CaO}$):** Se pulveriza espontáneamente por enfriamiento lento como el silicato bicálcico y las escorias. Si se enfría bruscamente y se muele es hidráulico, formándose hidrato de calcio y una masa gelatinosa o coloidal que da origen a los esferalitos, que se aprecian claramente con el microscopio electrónico.

- ✓ **Luminatos de calcio:** Se forman cuatro compuestos bien definidos, los cuales son los siguientes:
 - **Aluminato Monocálcico ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{CaO}$):** Se obtiene calentando alumina y carbonato cálcico por encima de $950\text{ }^\circ\text{C}$, se funde a $1600\text{ }^\circ\text{C}$ y se cristaliza en el sistema monoclinico. Tiene una densidad de 2,98, tiene propiedades hidráulicas, siendo el principal constituyéndose de los cementos aluminosos.
 - **Aluminato Tricálcico ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{3CaO}$):** Se funde a $1535\text{ }^\circ\text{C}$, 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 ($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{5CaO}$):** Existen en dos formas alotrópicas. Se funde a $1455\text{ }^\circ\text{C}$, encontrándose a veces en los cementos Portland y aluminosos; presenta fraguado rápido y menores resistencias que el aluminato monocálcico.
 - **Pentaluminato Tricálcico ($5\text{Al}_2\text{O}_3\text{3CaO}$):** Se funde a $1720\text{ }^\circ\text{C}$, hallándose a veces en los cementos aluminosos.

- ✓ **Ferritos Cálcicos:** El óxido de calcio y el óxido de hierro reacciona a gran temperatura para dar el ferrito monocálcico: $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CaO}$ y el ferrito bicálcico: $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{2CaO}$. Se funde a $1216\text{ }^\circ\text{C}$, no teniendo propiedades hidráulicas, hallándose en los cementos aluminosos y metalúrgicos.

3.3. Agua para concreto

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

Una práctica bastante común consiste en utilizar el agua potable para fabricar concreto sin ninguna verificación previa, suponiendo que toda agua que es potable también es apropiada para elaborar concreto; sin embargo, hay ocasiones en que esta presunción no se cumple, porque existen aguas potables con contenidos de citratos o con pequeñas cantidades de azúcares, que no afectan su potabilidad pero pueden hacerlas inadecuadas para la fabricación de concreto. En todo caso, la consideración contraria pudiera ser más conveniente, es decir, que el agua para la

elaboración del concreto no necesariamente requiere ser potable, aunque sí debe satisfacer determinados requisitos mínimos de calidad.

Los requisitos de calidad del agua de mezclado para concreto no tienen ninguna relación obligada con el aspecto bacteriológico (como es el caso de las aguas potables), sino que básicamente se refieren a sus características físico-químicas y a sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades del concreto (ICA, 2000).

3.3.1. Características físico-químicas

Cuando se hace referencia a las características físico-químicas del agua para la elaboración de concreto, no parece haber consenso general en cuanto a las limitaciones que deben imponerse a las sustancias e impurezas cuya presencia es relativamente frecuente, como puede ser el caso de algunas sales inorgánicas (cloruros, sulfatos), sólidos en suspensión, materia orgánica, dióxido de carbono disuelto, etc. Sin embargo, en lo que sí parece haber acuerdo es que no debe tolerarse la presencia de sustancias que son realmente dañinas, como grasas, aceites, azúcares y ácidos, por ejemplo. La presencia de alguna de estas sustancias, que por lo general no es común, debe tomarse como un síntoma de contaminación que requiere eliminarse antes de considerar la posibilidad de emplear el agua.

Si el agua no procede de una fuente de suministro de agua potable, se puede verificar su calidad para ser utilizada como agua para concreto mediante los requisitos físico-químicos contenidos en la Norma Técnica Colombiana NTC-3459 “Concretos – Agua para la elaboración de concreto”, recomendados especialmente para aguas que no son potables.

En la Tabla 6 se muestran los límites especificados en la NTC 3459, para las sales e impurezas inorgánicas que con mayor frecuencia se hallan presentes en las aguas que no son potables, a fin de que no se excedan en el agua que se utilice para la elaboración de concreto.

Tabla 6. Límites especificados de contenido de impurezas Inorgánicas en el agua no potable para la elaboración de concreto.

Impurezas Inorgánicas	Valor Límite
Iones de calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonato, sulfato, cloruro, nitrato y carbonato.	2.000 mg/L (Contenido Combinado)
Cloruros	500 mg/L (Concreto Pre esforzado)
	1.000 mg/L (Concreto reforzado)
Iones de sulfatos (SO ₄)	3.000 mg/L
Trióxido de Azufre (SO ₃)	1.000 mg/L
Álcalis (Carbonatos y Bicarbonatos de álcalis) *	1.000 mg/L
Sólidos totales	0,05 Kg/L
* El contenido total de óxidos de sodio y potasio expresado como Na ₂ O + 0,658 K ₂ O debe ser menor a 600 mg/L	

3.3.2. Efectos en el concreto

En diversas especificaciones y prácticas recomendadas, al establecer la calidad necesaria en el agua de mezclado, se pone mayor énfasis en la valuación de los efectos que produce en el concreto, que en la cuantificación de las sustancias indeseables e impurezas que contiene. Esto aparentemente se justifica porque algunas de estas reglamentaciones están dirigidas principalmente a construcciones urbanas, industriales o similares, cuyo concreto se produce en lugares donde normalmente se dispone de suministro de agua para uso industrial o doméstico.

No siempre ocurre así durante la construcción de estructuras como las centrales hidroeléctricas, en donde es necesario acudir a fuentes de suministro de agua cuya calidad es desconocida y con frecuencia muestra señales de contaminación. En tal caso, es prudente determinar en primer término las características físico-químicas del agua y, si éstas son adecuadas, proceder a verificar sus efectos en el concreto.

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

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

Para la prevención de los efectos a corto y mediano plazo, se acostumbra precalificar el agua mediante pruebas comparativas de tiempo de fraguado y de resistencia a compresión a 7 y 28 días. En estas pruebas se comparan especímenes elaborados con mezclas idénticas, en las que sólo cambia la procedencia del agua de mezclado: agua destilada en la mezcla-testigo y el agua en estudio en la mezcla de prueba.

Las pruebas de tiempo de fraguado pueden efectuarse en pasta de cemento, según los métodos NTC-109 “Cementos – Método para determinar los tiempos de fraguado del cemento hidráulico por medio de las agujas de Gillmore (ASTM C 266 o C 191)”. Para llevar a cabo las pruebas de resistencia a compresión, se emplean normalmente especímenes de mortero, elaborados y ensayados de acuerdo con el método NTC-220 “Cementos – Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50,00 mm ó 50,80 mm de lado (ASTM C 109)”, aunque también es posible utilizar especímenes de concreto, elaborados y ensayados conforme a los métodos NTC-1513 “Método de ensayo para la elaboración, curado acelerado y ensayo a compresión de especímenes de concreto” (ASTM C 192 y C 39).

3.4. Adiciones minerales

Las adiciones minerales son materiales inorgánicos que son incorporados al cemento o al concreto en diferentes porcentajes, con el fin de mejorar sus propiedades, entre las cuales se encuentran, mayor durabilidad, menor calor de hidratación, mayores resistencias. Del lado ambiental se genera un ahorro de energía no renovable, protección del medio ambiente debido a la reducción de emisiones de CO₂, SO₂, NO_x, entre otros, y finalmente, el de mayor interés para este proyecto, es el del aprovechamiento de subproductos del sector industrial y/o agrícola.

A continuación se describen algunas adiciones minerales, consideradas de las más importantes para el sector del cemento, gracias a su aporte en el desarrollo de la tecnología del concreto.

✓ Escoria

La escoria granulada de alto horno molida (Fig. 1), también llamada cemento de escoria, se produce de la escoria siderúrgica de alto horno, la cual es un cemento hidráulico no metálico que consiste básicamente en silicatos y aluminosilicatos de calcio. Este producto se desarrolla en el estado fundido simultáneamente con el acero en un alto horno. La escoria fundida a la temperatura de cerca de 1500°C (2730°F) se enfría rápidamente y se apaga en el agua para formar un material granulado vítreo.

El material granulado, el cual es molido hasta menos de 45 µm, tiene un área superficial Blaine de 400 a 600 m²/kg. La masa específica relativa para la escoria granulada de alto horno molida es de 2,85 a 2,95 y la masa unitaria varía de 1050 a 1375 kg/m³ (66 a 86 lb/pies³) (Helmuth, 1987).

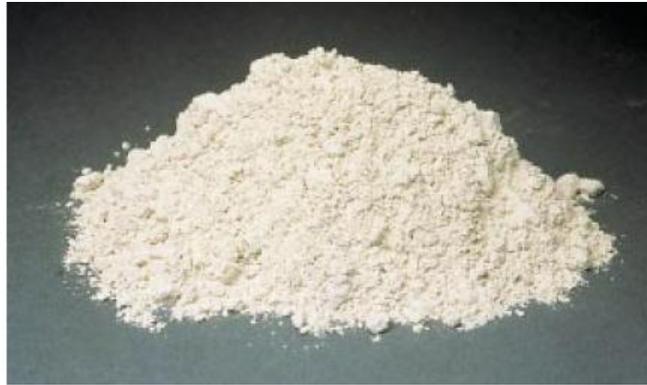


Figura 1. Escoria granulada de alto horno molida (IMG. Helmuth, 1987).

La escoria granulada es áspera y tiene forma angular (Fig. 2). En presencia del agua y de un activador, Hidróxido de Sodio (NaOH) u Óxido de Calcio (CaOH), ambos suministrados por el cemento Portland, la escoria se hidrata y se endurece de una manera similar al cemento Portland. Sin embargo, las escorias enfriadas por el aire no presentan las propiedades hidráulicas de las escorias enfriadas por el agua (Helmuth, 1987).

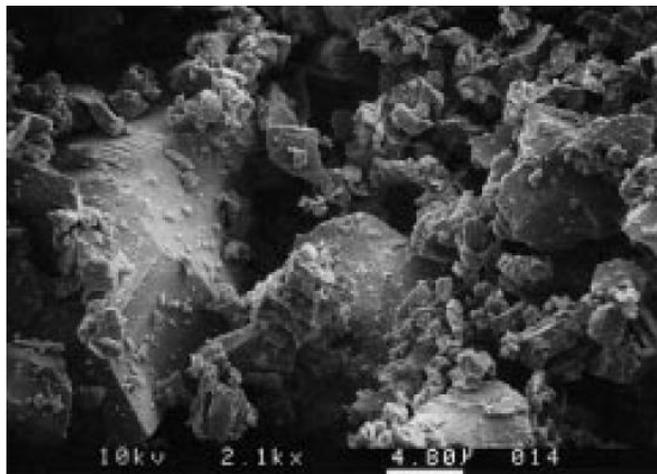


Figura 2. Micrografía por microscopio electrónico de barrido de partículas de escoria con aumento de 2100X. (IMG. Helmuth, 1987).

La escoria granulada de alto horno fue desarrollada en Alemania en 1853 (Malhotra, 1996) y se ha usado desde el inicio del siglo XX (Abrams, 1925). La escoria granulada de alto horno molida, es bien empleada en los concretos para uso general en los Estados Unidos, normalmente constituye del 30% al 45% de la masa del material cementante en la mezcla (PCA, 2000), pero algunos concretos de escoria tienen 70% o más de escoria. La ASTM C 989 (AASHTO M 302) clasifica la escoria por su nivel creciente de reactividad como grado 80, 100 o 120. La ASTM C 1073 presenta

un método para la determinación de la actividad hidráulica de la escoria granulada de alto horno molida.

✓ **Microsílice**

Este material es conocido también como humo de sílice. Es un material amorfo (no cristalino), polimorfo de dióxido de silicio y sílice. Es un polvo ultra fino recolectado como un subproducto de la fabricación del ferrosilicio y de los metales de silicio (Fig. 3), y consiste de partículas esféricas con una distribución promedio de tamaño de partícula de 150 nanómetros. Este polvo se recoge mediante la filtración de los gases que salen de los hornos del proceso. El principal campo de aplicación es como material puzolánico para concretos de alta resistencia (Gálligo, 1990).



Figura 3. Polvo de humo de sílice (IMG. Helmuth, 1987).

El humo de sílice condensado es básicamente dióxido de silicio (normalmente más del 85,00%) en una forma no cristalina (amorfa). Por ser un material transportado por el aire, tal como la ceniza volante, presenta una forma esférica (Fig. 4). Se trata de un material extremadamente fino, con partículas con menos de 1,00 mm de diámetro y con diámetro promedio de cerca de 0,10 μm , aproximadamente cien veces menor que el promedio de las partículas de cemento.

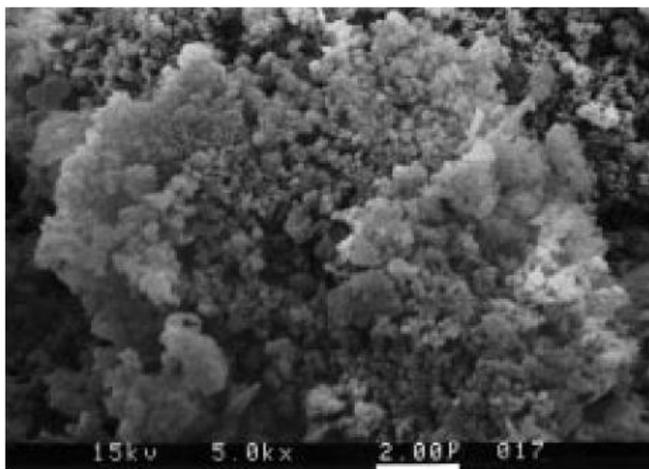


Figura 4. Micrografía por microscopio electrónico de barrido de partículas de humo de sílice con aumento de 20.000X (IMG Bhatti & Greening, 1986).

El área superficial del humo de sílice condensado es aproximadamente 20.000 m²/kg (método de la adsorción de nitrógeno). Para efectos de comparación, el humo de tabaco tiene un área superficial de 10.000 m²/kg. Los cementos ASTM tipos I y III tienen un área superficial de 300 m²/kg a 400 m²/kg y de 500 a 600 m²/kg, respectivamente (Bhatti & Greening, 1986).

La masa específica relativa del humo de sílice es generalmente de 2,20 a 2,5, mientras que la masa específica relativa del cemento Portland es cerca de 3,15. La masa unitaria del humo de sílice varía de 130 a 430 kg/m³ (8 a 27 lb/pie³) (Bhatti & Greening, 1986).

De las propiedades físicas más importantes de la microsílíce se pueden citar las mostradas en la Tabla 7.

Tabla 7. Propiedades físicas más importantes de la microsílíce.

Color:	Gris
Densidad Relativa:	2,20 a 2,50 kg/dm ³
Peso específico:	Del orden de 250 a 300 kg/m ³
Finura:	Estructura amorfa con una superficie específica entre 15.000 a 30.000 m ² /kg

La composición química de la microsílíce contiene normalmente más de un 90,00% de dióxido de silicio, la mayor parte del cual tiene una estructura amorfa. La composición química puede variar dependiendo del tipo de aleación o metal que se esté produciendo. La microsílíce se combina con la cal libre del cemento, dando lugar al silicato de calcio hidratado.

La composición química de la microsílíce empleada en la elaboración de concretos de alta resistencia, usada por algunos autores se muestra en la Tabla 8.

El humo de sílice se vende en forma de polvo pero es más comúnmente encontrado en forma líquida. El humo de sílice se usa en cantidades que varían del 5,00% al 10,00% de la masa total de material cementante. Se emplea donde sea necesario un alto grado de impermeabilidad y alta resistencia del concreto. El humo de sílice sigue las normas ASTM C 1240, NTC 4637, entre otras.

Tabla 8. Composición química de la microsíllice (cifras en %)

	A ⁽¹⁾	B ⁽²⁾	C ⁽³⁾
SiO ₂	82,60	92 - 94	94,30
Al ₂ O ₃	1,70	0,2 - 0,3	1,10
Fe ₂ O ₃	0,60	0,1 - 0,3	1,10
SO ₃	1,00	-	-
MgO	2,20	0,1 - 0,2	0,70
CaO	0,30	0,1 - 0,15	0,20
Na ₂ O	1,60	0,10	0,20
K ₂ O	2,90	0,10	1,00
P.F.	6,40	-	2,60

(1) Tazawa y Yonekura (1986)

(2) Yogendran *et al.* (1987)

(3) Aitcin *et al.* (1985)

✓ **Puzolanas**

Las puzolanas son materiales silíceos o aluminosilíceos que pueden ser de origen natural o artificial, en el primer caso se encuentran las rocas de origen volcánico, las tobas, tierras diatomeas entre otras; para el segundo caso se tienen cenizas volantes, arcillas activadas térmicamente, micro sílice (sílica fume), cenizas de cáscara de arroz, cenizas de hojas de bambú, etc.

El desarrollo del presente documento gira alrededor de las cenizas obtenidas a través de la incineración de las hojas de bambú, para lo cual es necesaria la recolección de una gran cantidad de hojas de bambú, procesarlas y verificar su reactividad puzolánica por medio del seguimiento periódico en una solución saturada de hidróxido de calcio a temperatura ambiente, analizando si en realidad existe la formación de una fase hidratada que permita validar sus verdaderas características cementantes.

Como una segunda etapa del proyecto se tiene la evaluación de su comportamiento en cubos de mortero, de manera que sea comparable con los resultados obtenidos mediante la medición de la reactividad en la solución.

- ***Puzolanas Naturales***

Las puzolanas naturales más conocidas en el medio son: cenizas volcánicas, tufos o tobas volcánicas (zeolitas), tierras de diatomeas (diatomitas). Este tipo de puzolanas son generadas por el enfriamiento brusco de la lava como es el caso de la ceniza volcánica, la escoria y obsidiana. En el caso de las tierras diatomeas se generan por la precipitación de la sílice de residuos de organismos o de una solución y de arcillas calcinadas naturalmente a partir de calor o de un flujo de lava.

Las puzolanas naturales más comúnmente empleadas hoy en día son los materiales procesados, los cuales se tratan por altas temperatura en los hornos y después se muelen hasta que se transformen en un polvo fino (Fig. 5, 6 y 7). Estos materiales incluyen arcillas calcinadas, esquisto calcinado y metacaolinita.

Las arcillas calcinadas se emplean en construcciones en concreto para uso universal, de la misma manera que las otras puzolanas. Las arcillas calcinadas se pueden utilizar como substitutas parciales del cemento, normalmente entre 15,00% y 35,00% y también para aumentar la resistencia al ataque de sulfatos, controlar la reactividad álcali-agregado y reducir la permeabilidad (Malhotra, 1996).

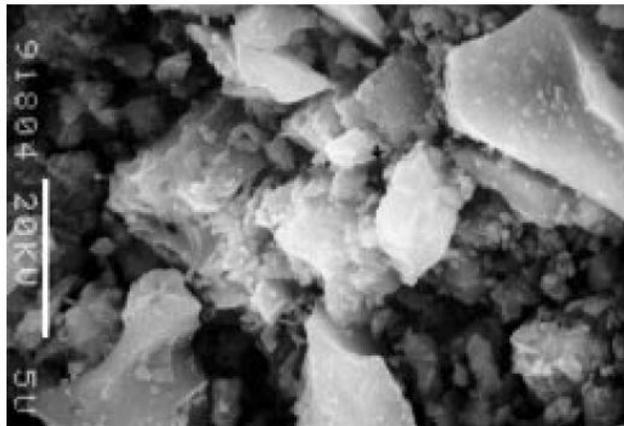


Figura 5. Micrografía por microscopio electrónico de barrido de partículas de esquisto calcinado con aumento de 5000X (IMG. Helmuth, 1987).



Figura 6. La metacaolinita es una arcilla calcinada (IMG. Helmuth, 1987).

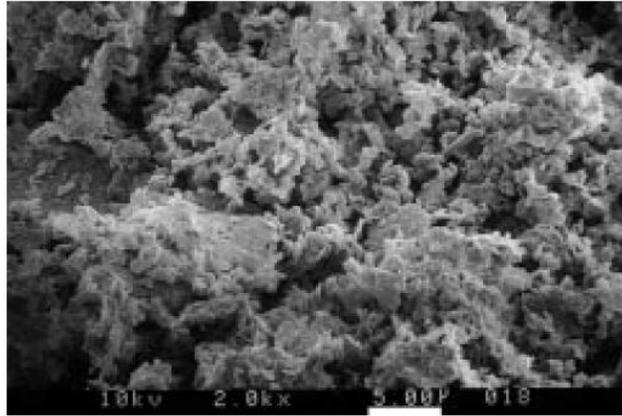


Figura 7. Micrografía por microscopio electrónico de barrido de partículas de arcilla calcinada con aumento de 2000X (IMG. Helmuth, 1987).

Su masa específica relativa es de 2,40 a 2,61 y su finura Blaine es de $650 \text{ m}^2/\text{kg}$ a $1350 \text{ m}^2/\text{kg}$. El esquisto calcinado puede contener del 5,00% al 10,00% de calcio, resultando en un material con alguna propiedad cementante o hidráulica. Debido a la cantidad de calcita residual, la cual no es totalmente calcinada, y a las moléculas de agua adsorbida en el mineral de arcilla, el esquisto calcinado tiene una pérdida por ignición del 1,00% al 5,00%. La pérdida por ignición del esquisto calcinado no es una medida o indicación de la cantidad de carbono, como podría ser en la ceniza volante (Malhotra, 1996).

La metacaolinita, una arcilla calcinada especial, se produce por la calcinación a baja temperatura de la arcilla caolín de alta pureza. El producto se muele hasta un tamaño de partícula promedio de cerca de 1 a $2 \mu\text{m}$.

La metacaolinita se usa en aplicaciones especiales, donde se necesite baja permeabilidad y muy alta resistencia. En estas aplicaciones, la metacaolinita se usa mucho más como un aditivo (adición) al concreto que como un sustituto del cemento. La adición típica es de aproximadamente 10,00% de la masa del cemento (Malhotra, 1996).

Las puzolanas naturales se clasifican por la ASTM C 618 (AASHTO M 295) como puzolana Clase N (numeral 4.1). La Tabla 9 enseña el análisis químico típico y las propiedades seleccionadas de las puzolanas.

Tabla 9. Análisis químico y propiedades seleccionadas de ceniza volante, escoria, humo de sílice, arcilla calcinada, esquisto calcinado y metacaolinita típicos (ASTM C 618, 2005; Malhotra, 1996; Helmuth, 1987).

	Unidad	Clase N	Clase F	Clase C	Escoria Granulada	Humo de Sílice	Arcilla Calcinada	Esquisto Calcinado	Metacaolinita
SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	%	70,0	70,0	50,0	48,0	90,8	91,0	78,0	96,5
SO ₃	%	4,0	5,0	5,0	9,0	0,4	0,5	0,4	0,1
CaO	%		< 10,0	10,0 – 30,0				5 - 10	
Humedad	%	3,0	3,0	3,0					
Pérdida por ignición	%	10,0	6,0	6,0	1,0	3,0	1,5	3,0	0,7
Finura Blaine	m ² /kg		420,0	420,0	400 - 600	20.000	990	650 - 1350	19.000
Masa específica relativa	-		2,38	2,65	2,85 - 2,95	2,20 - 2,50	2,5	2,40 - 2,61	2,5

○ **Puzolanas Artificiales**

Dentro de este grupo se encuentran las cenizas volantes que son producidas durante la combustión del carbón mineral, las arcillas activadas térmicamente que se producen a través de la quema de ladrillos de arcilla y de otros tipos de arcilla que se hayan expuesto a temperaturas superiores a los 800°C, la micro sílice (sílica fume), cenizas de cáscara de arroz que provienen de la incineración controlada durante un tiempo determinado de lo que comúnmente se conoce como cascarilla de arroz (el cual es un material extraído del proceso de producción del arroz y considerado como un residuo agrícola); y por último las cenizas de las hojas de bambú, las cuales al igual que las anteriores, se producen por medio de la quema controlada en un horno eléctrico a altas temperaturas durante un periodo de tiempo que puede variar entre 2 a 4 horas; con una temperatura aproximada de 650°C.

- **Cenizas Volantes**

La ceniza volante es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en centrales térmicas. Estas se recogen mediante colectores mecánicos o precipitadores electrostáticos en forma de residuo de partículas procedente de los gases de combustión, antes de que sean lanzados a la atmósfera.

Las propiedades físicas y químicas varían mucho de unas cenizas a otras, debido a diferencias en el tipo de carbón utilizado en la combustión, los procedimientos empleados en la planta térmica, y la presencia de *fuel oil* en las cámaras de combustión en las cuales se produce la ceniza. Todas las cenizas volantes incluyen cantidades sustanciales de dióxido de silicio (SiO_2) tanto amorfo y cristalino y óxido de calcio (CaO); ambos ingredientes son endémicos en muchos estratos de roca que contienen carbón (Carrasquillo, 1987).

La ceniza volante se solidifica rápidamente mientras está suspendida en los gases de escape y se recoge mediante precipitadores electrostáticos o filtros de bolsas. Por la rápida solidificación, las partículas de cenizas volantes son generalmente de forma esférica (Fig. 8) y varían en tamaño de 0,50 micras a 300 micras. La consecuencia principal del enfriamiento rápido es que sólo pocos minerales tendrán tiempo de cristalizar y que sigue siendo principalmente amorfa. Sin embargo, algunas fases refractarias en el carbón pulverizado no se derriten completamente y permanecen cristalinos. En consecuencia, las cenizas volantes son un material heterogéneo (Carrasquillo, 1987).

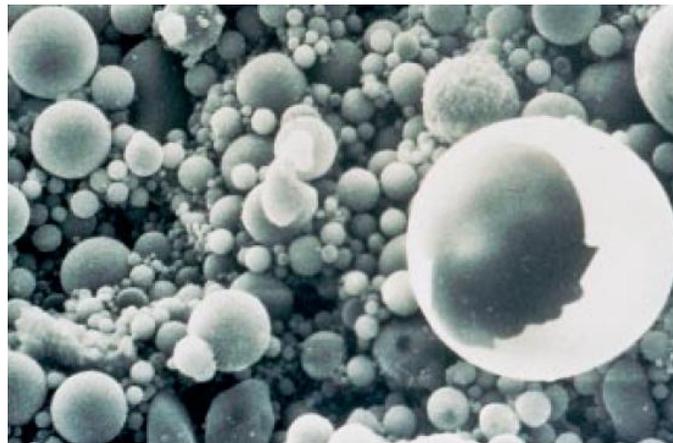


Figura 8. Micrografía por microscopio electrónico de barrido (SEM) de partículas de ceniza volante con aumento de 1000X. A pesar de que la mayoría de las cenizas volantes son esferas sólidas, algunas partículas, llamadas cenosferas, son huecas (como se enseña en la micrografía). (IMG. Helmuth, 1987).

Los principales componentes químicos presentes en las cenizas volantes son SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y CaO se presenta en algunas ocasiones. La mineralogía de las cenizas volantes es muy diversa. Las fases principales que se encuentran son una fase de vidrio junto con cuarzo, mullita y la hematita, óxidos de hierro, magnetita y / o maghemita. Otras fases identificadas son a menudo cristobalita, anhidrita, cal libre, periclasa, calcita, silvita, halita, Portlandita, rutilo y anatasa (Carrasquillo, 1987). Algunas de las propiedades físicas de la ceniza volante se pueden generalizar, tal como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Propiedades físicas más importantes de la ceniza volante.

Color:	Negro
Densidad Relativa:	1,46 kg/dm ³
Peso específico:	Del orden de 226 kg/m ³
Finura:	Estructura amorfa con una superficie específica 500 m ² /kg

La Tabla 11 muestra la composición química de algunas de las cenizas empleadas para fabricar concretos de alta resistencia.

Tabla 11. Composición química de la ceniza volante (cifras en %)

	A ⁽¹⁾	B ⁽²⁾	C ⁽²⁾
SiO_2	34,29	35,96	62,10
Al_2O_3	16,90	19,81	12,90
Fe_2O_3	5,80	5,02	5,25
SO_3	3,63	3,15	1,46
MgO	4,50	4,91	2,52
CaO	30,29	27,24	11,20
Na_2O	1,45	2,23	0,34
K_2O	-	0,42	0,47
P.F.	0,20	0,41	0,45

(1) E. Cook. (1982)

(2) Carrasquillo. (1987)

La ceniza volante es un polvo finamente dividido parecido al cemento Portland (Fig. 9). La mayoría de las partículas de ceniza volante son esferas y algunas son cenosferas huecas. También se

pueden presentar en la forma de plerosferas, que son esferas que contienen esferas menores. Los materiales molidos, como el cemento Portland, tienen partículas sólidas angulares. Los tamaños de las partículas de la ceniza volante varían de menos de 1 μm (micrómetro) hasta más de 100,00 μm , sin embargo, el tamaño de una partícula típica es de aproximadamente 20,00 μm .



Figura 9. La ceniza volante es un polvo que se parece con el cemento y ha sido usada desde los años 30. (IMG Shanghai Xuanshi Machinery Co., Ltd, <http://www.trituradora-de-piedra.net/trituradora-mineral/mill-fly-ash.html>)

De las cenizas volantes, tan sólo el 10,00% al 30,00% de la masa de las partículas es mayor que 45 μm . El área superficial es normalmente de 300 a 500 m^2/kg , a pesar de que algunas cenizas pueden tener área superficial tan baja como 200 m^2/kg o tan alta como 700 m^2/kg . Las cenizas volantes que no estén fuertemente compactadas presentan una masa unitaria (masa por unidad de volumen, incluyendo el aire entre las partículas) que puede variar de 540 a 860 kg/m^3 (34 a 54 lb/pies^3), mientras que las cenizas compactadas o vibradas presentan masa unitaria que varía de 1120 a 1500 kg/m^3 (70 a 94 lb/pies^3) (ACI 232, 1996).

La ceniza volante es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio. Los constituyentes menores son magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono. Los compuestos cristalinos están presentes en pequeñas cantidades. La masa específica relativa de la ceniza volante normalmente varía de 1,90 a 2,80 y el color es generalmente gris o marrón (ACI 232, 1996).

Las cenizas volantes Clase F y Clase C de la ASTM C 618 (AASHTO M 295) se emplean comúnmente como aditivos (adiciones) puzolánicos en concretos de uso universal. Los materiales de Clase F son normalmente cenizas volantes con bajo contenido de calcio (menos del 10,00% de CaO) y contenido de carbono menor que 5,00%, pero algunas pueden contener hasta 10,00%. Los materiales de la Clase C normalmente presentan alto contenido de calcio (del 10,00% al 30,00% de CaO) y contenido de carbono menor que 2,00%. Muchas de las cenizas volantes de la Clase C cuando se exponen al agua, se hidratan y se endurecen en menos de 45 minutos. Algunas cenizas volantes pertenecen a ambas Clases F y C (Helmuth, 1987).

La ceniza volante se emplea en cerca del 50,00% de los concretos premezclados de los Estados Unidos (PCA, 2000). La ceniza volante Clase F se usa con una dosis del 15,00% al 25,00% de la masa del material cementante y la ceniza volante Clase C con una dosis del 15,00% al 40,00% de la masa del material cementante. La dosificación varía con la reactividad de la ceniza volante y con los efectos deseados en el concreto (Helmuth, 1987).

3.4.1. Efectos de las adiciones minerales en el concreto fresco

A continuación se presenta una breve discusión respecto a las propiedades del concreto fresco que se ven impactadas por los materiales cementantes suplementarios, además de su grado de influencia. En primer lugar, se observa que el efecto de estos materiales sobre las mezclas de concreto varía considerablemente. Los atributos de estos materiales adicionados separadamente a la mezcla de concreto, se pueden encontrar también en los cementos adicionados con materiales cementantes suplementarios.

✓ Demanda de agua

Las mezclas de concreto que contienen ceniza volante requieren normalmente menos agua (cerca de 1,00% a 10,00% menos agua para dosis normales de cenizas) que un concreto que contenga sólo cemento Portland, para un mismo asentamiento del cono de Abrams. Whiting (1989) encontró que dosis más altas de ceniza pueden resultar en reducciones mayores del agua (Tabla 12). Sin embargo, algunas cenizas volantes pueden aumentar la demanda de agua en hasta 5,00% (Gebler y Klieger, 1986). La ceniza volante disminuye la demanda de agua de la misma manera que los reductores de agua químicos líquidos (Helmuth, 1987). La escoria molida normalmente disminuye la demanda de agua del 1,00% al 10,00%, dependiendo de su dosis.

Tabla 12. Efecto de la ceniza volante sobre la demanda de agua de mezcla en concretos con aire incluido (incorporado) según Whiting, 1989.

Identificación		Contenido de ceniza volante, % de la masa del material	Cambio en el agua de mezcla necesaria comparada con la mezcla de control
Mezcla de ceniza volante	Clase de Ceniza volante		
C1A	C	25,0	-6,0
C1D	F	25,0	-2,0
C1E	F	25,0	-6,0
C1F	C	25,0	-8,0
C1G	C	25,0	-6,0
C1J	F	25,0	-6,0
C2A	C	25,0	-18,0
C2D	F	50,0	-6,0
C2E	F	50,0	-14,0
C2F	C	50,0	-16,0
C2G	C	50,0	-12,0
C2J	F	50,0	-10,0

Todas las mezclas tenían un contenido de material cementante de 335 kg/m^3 (565 lb/yd^3), un asentamiento del cono de Abrams de $125 \pm 25 \text{ mm}$ ($5 \pm 1 \text{ pulg.}$) y un contenido de aire de $6 \pm 1\%$. La relación agua-cemento más ceniza volante varió de 0,40 a 0,48.

Por otro lado, cuanto mayor es la cantidad de humo de sílice, mayor es la demanda de agua en el concreto, a menos que se use un reductor de agua o un plastificante. En algunas mezclas pobres puede no ocurrir un aumento de la demanda de agua, cuando se empleen pequeñas cantidades (menos del 5,00%) de humo de sílice.

Las arcillas calcinadas y los esquistos calcinados en dosis normales generalmente tienen poco efecto sobre la demanda de agua, pero otras puzolanas naturales pueden aumentar o disminuir considerablemente la necesidad de agua (Whiting, 1989).

✓ **Trabajabilidad**

Ceniza volante, escoria, arcilla calcinada y esquisto calcinado normalmente mejoran la trabajabilidad de concretos con el mismo asentamiento. El humo de sílice puede contribuir para la cohesión de la mezcla del concreto. Algunos ajustes, tal como el uso de reductores de agua de alto rango, pueden ser necesarios para la manutención de la trabajabilidad y para permitir la compactación y acabado adecuados (Barger *et al.*, 1997).

✓ Calor de hidratación

Las cenizas volantes, puzolanas naturales y escorias granuladas tienen un calor de hidratación más bajo que el cemento Portland, consecuentemente su empleo reduce el calor liberado en las estructuras de concreto (Fig. 10). La arcilla calcinada libera un calor de hidratación similar al del cemento de moderado calor de hidratación (Barger *et al.*, 1997). Algunas puzolanas liberan sólo el 40,00% del calor de hidratación comparado con el cemento ASTM tipo I. Esta reducción en el aumento de la temperatura es especialmente benéfica en el concreto usado en estructuras masivas. El humo de sílice puede o no reducir el calor de hidratación; Detwiler *et al.*, (1996), ofrecen una discusión sobre el efecto de las puzolanas y escorias sobre el calor de hidratación.

✓ Tiempo de fraguado

El uso de ceniza volante y escoria granulada de alto horno molida normalmente retarda el tiempo de fraguado (Tabla 13). El grado de retardo depende de factores como la cantidad de cemento Portland, la demanda de agua, el tipo, la reactividad y la dosis de escoria o puzolana y la temperatura del concreto. El retardo del tiempo de fraguado puede ser una ventaja en clima caluroso, permitiendo más tiempo para la colocación y el acabado del concreto. Sin embargo, en el clima frío, puede ocurrir un retardo grande con ciertos materiales, retrasando considerablemente las operaciones de acabado. Se pueden usar los aditivos aceleradores para disminuir el tiempo de fraguado. Las arcillas y esquistos calcinados tienen poco efecto sobre el tiempo de fraguado.

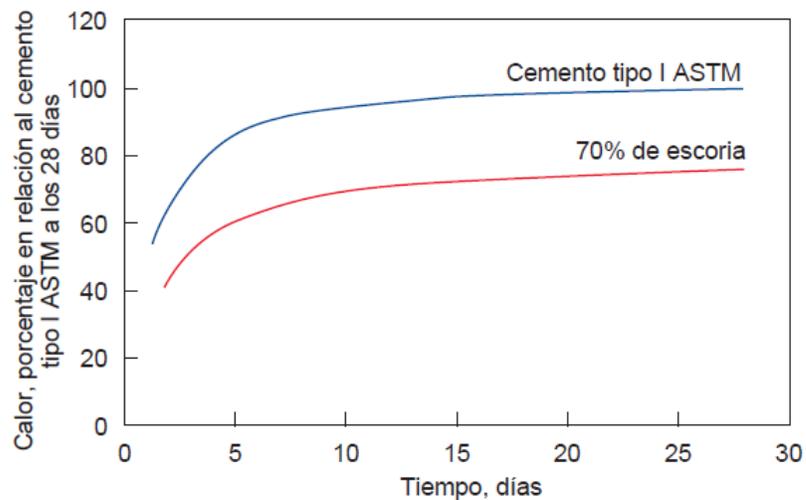


Figura 10. Comparación del calor de hidratación a 20°C (68°F) entre la escoria y el cemento Tipo I (ASTM C 150) (Barger *et al.*, 1997).

Tabla 13. Efecto de la ceniza volante sobre el tiempo de fraguado del concreto (Barger *et al.*, 1997).

Mezcla de Ceniza Volante		Tiempo de fraguado, hh:mm		Retraso con relación al control, hh:mm	
Identificación	Clase de Ceniza Volante (ASTM)	Inicio	Fin	Inicio	Fin
A	C	04:30	05:35	00:15	00:05
B	F	04:40	06:15	00:25	00:45
C	F	04:25	06:15	00:10	00:45
D	F	05:05	07:15	00:50	01:45
E	F	04:25	05:50	00:10	00:20
F	C	04:25	06:00	00:10	00:30
G	C	04:55	06:30	00:40	01:00
H	R	05:10	07:10	00:55	01:40
I	C	05:00	06:50	00:55	01:20
J	F	05:10	07:40	00:55	02:10
Promedio					
Clase C	C	4:40	6:15	0:30	0:45
Clase F		4:50	6:45	0:35	1:45
Mezcla de Control	F	04:15	05:30	-	-

Los concretos tenían un contenido de material cementante de 307 kg/m³ (517 lb/yd³). Las mezclas con ceniza volante contenían 25% de ceniza volante con relación a la masa de material cementante. La relación agua/cmte era de 0,40 a 0,45.

✓ Acabado

El concreto que contiene materiales cementantes suplementarios se puede acabar de manera igual o más fácil que el concreto sin material cementante suplementario. Las mezclas que contienen cantidades altas de estos materiales, especialmente humo de sílice, pueden ser pegajosas y difíciles de brindar su acabado final (Barger *et al.*, 1997).

✓ Bombeabilidad

El uso de materiales cementantes suplementarios generalmente ayuda a la bombeabilidad del concreto. El humo de sílice es el material más eficiente, especialmente en mezclas pobres (Barger *et al.*, 1997).

✓ **Fisuración por contracción**

Debido a su bajo sangrado (exudación), el concreto con humo de sílice puede presentar un aumento de la fisuración por contracción (retracción) plástica (agrietamiento por contracción plástica). Este problema se puede evitar garantizándose que el concreto esté protegido de la desecación, tanto durante, como después del acabado. Otras puzolanas y escorias tienen normalmente poco efecto sobre el agrietamiento por contracción plástica. Los materiales cementantes suplementarios que aumentan significativamente el tiempo de fraguado pueden aumentar los riesgos de la fisuración por contracción plástica (Barger *et al.*, 1997).

✓ **Curado**

Los efectos de las condiciones de temperatura y humedad, sobre las propiedades de fraguado y desarrollo de resistencia de los concretos con materiales cementantes suplementarios, son similares a sus efectos sobre el concreto producido sólo con cemento Portland. Sin embargo, el tiempo de fraguado necesita ser mayor para ciertos materiales con desarrollo de resistencia temprana lento (Barger *et al.*, 1997).

Cantidades elevadas de humo de sílice pueden producir concretos con muy alta cohesión, baja segregación de los agregados y bajo sangrado (exudación). Como hay poca o ninguna agua de sangrado disponible para la evaporación sobre la superficie del concreto, la fisuración plástica se puede desarrollar rápidamente, especialmente en clima caluroso, días ventosos, si no se toman precauciones especiales (Barger *et al.*, 1997).

El curado húmedo por siete días o el curado con membranas es adecuado para los concretos con cantidades normales de la mayoría de los materiales cementantes suplementarios. De la misma manera que ocurre en el concreto con cemento Portland, el curado con bajas temperaturas puede reducir el desarrollo de la resistencia temprana (Gebler y Klieger, 1986).

3.4.2. Efectos de las adiciones minerales en el concreto endurecido

El efecto más evaluado en los concretos a nivel mundial, sin lugar a dudas, es su resistencia a la compresión, tomando relevancia para los constructores debido a que con base en este parámetro se diseñan casi todas las estructuras convencionales, y con este mismo parámetro se mide el nivel de aceptación por parte de los clientes. Es por esto que a continuación se presenta una breve discusión acerca de esta propiedad del concreto endurecido, posterior al uso de materiales cementantes suplementarios en su elaboración.

✓ **Resistencia a la compresión**

La ceniza volante, la escoria granulada de alto horno molida, la arcilla calcinada, la metacaolinita, el esquistó calcinado y el humo de sílice contribuyen para el aumento de la resistencia del

concreto. Sin embargo, la resistencia del concreto con estos materiales puede ser tanto mayor como menor que la resistencia del concreto que contenga sólo cemento Portland, como se observa en la Fig. 11 para diversas cenizas volantes. La resistencia a tracción, a flexión, a torsión y de adherencia se afecta de la misma manera que la resistencia a compresión.

Debido a la reacción puzolánica lenta de ciertos materiales cementantes suplementarios, el curado húmedo continuo y con temperaturas favorables puede ser necesario por periodos más largos que los normalmente requeridos. Sin embargo, esto afecta menos el concreto que contiene humo de sílice, cuya resistencia normalmente se iguala o supera la resistencia a un día de la mezcla de control con sólo cemento Portland. El humo de sílice contribuye para el desarrollo de la resistencia principalmente entre 3 y 28 días, cuando la resistencia del concreto con humo de sílice excede la resistencia de la mezcla con sólo cemento Portland. El humo de sílice también ayuda el desarrollo de la resistencia de concretos con ceniza volante (Whiting, 1989).

El desarrollo de la resistencia del concreto con ceniza volante, escoria granulada, arcilla calcinada o esquisto calcinado es similar al concreto normal si es curado a una temperatura de aproximadamente 23°C (73°F). La Figura 12 muestra que la tasa de desarrollo de resistencia, con relación a la resistencia a los 28 días, del concreto con ceniza volante es similar a la tasa del concreto sin ceniza volante. Los concretos producidos con algunas cenizas volantes altamente reactivas (especialmente las cenizas tipo C, con alto contenido de calcio) o escorias granuladas pueden igualar o exceder la resistencia de control de 1 a 28 días.

Algunas cenizas volantes y puzolanas naturales requieren de 28 a 90 días para exceder la resistencia de control a los 28 días, dependiendo de las proporciones de la mezcla. Los concretos conteniendo cenizas Clase C (ASTM C 618, AASHTO M 295) normalmente desarrollan resistencia temprana mayor que los concretos con cenizas Clase F (ASTM C 618, AASHTO M 295) (Lange, 1994).

Se puede mejorar el desarrollo de la resistencia del concreto: (1) aumentando la cantidad del material cementante del concreto; (2) adicionando materiales cementantes de alta resistencia inicial; (3) disminuyendo la relación agua-material cementante; (4) aumentando la temperatura de curado o (5) empleando un aditivo acelerador. La Figura 13 muestra el beneficio del uso de ceniza volante en vez de la sustitución del cemento con relación al desarrollo de resistencia el clima frío (Detwiler, 2000).

El diseño de concreto masivo frecuentemente se aprovecha del retraso del desarrollo de la resistencia de las puzolanas, pues estas estructuras no se las pone en servicio inmediatamente. El desarrollo lento de la resistencia temprana que resulte del uso de materiales cementantes suplementarios es una ventaja en la construcción en clima caluroso, pues da más tiempo para la colocación y el acabado del concreto. Con los ajustes adecuados de la mezcla, se pueden utilizar todos los materiales cementantes suplementarios en todas las estaciones.

Los materiales cementantes suplementarios son esenciales para la producción de los concretos de alta resistencia. La ceniza volante se usa principalmente para la producción de concreto con resistencias de hasta 1000 kg/cm^2 o 100 MPa (15.000 lb/pulg^2). Los productores de concreto premezclado pueden, hoy en día, producir concretos con hasta 1400 kg/cm^2 o 140 MPa (20.000 lb/pulg^2), con el empleo de humo de sílice, reductores de agua de alto rango y agregados adecuados (Burg y Ost, 1994).

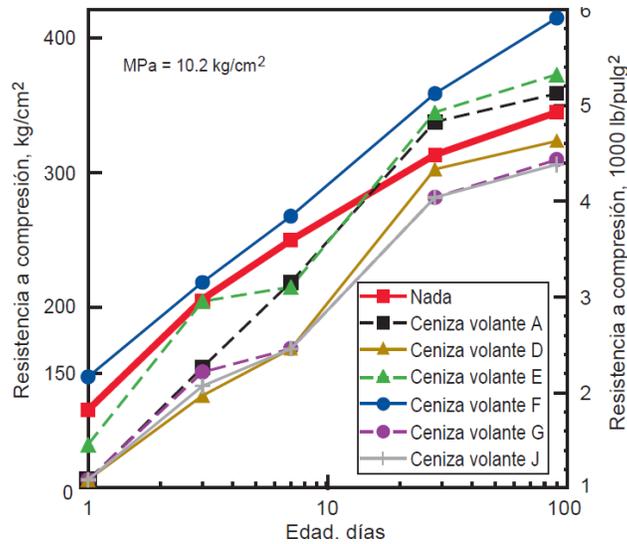


Figura 11. Desarrollo de la resistencia a compresión a 1, 3, 7, 28 y 90 días de edad de mezclas de concreto conteniendo 307 Kg/m^3 (517 lb/yd^3) de materiales cementantes, de los cuales 25% de la masa es ceniza volante (Whiting, 1989).

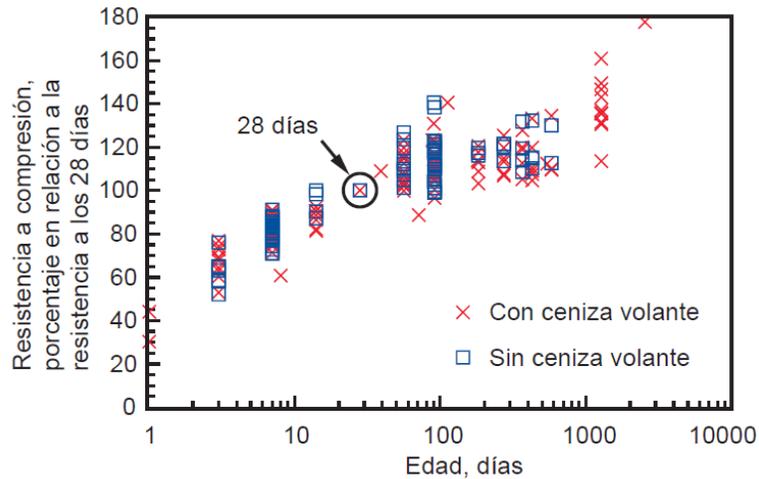


Figura 12. Aumento de la resistencia a compresión como porcentaje de la resistencia a compresión a los 28 días de concretos con y sin ceniza volante (Lange, 1994).

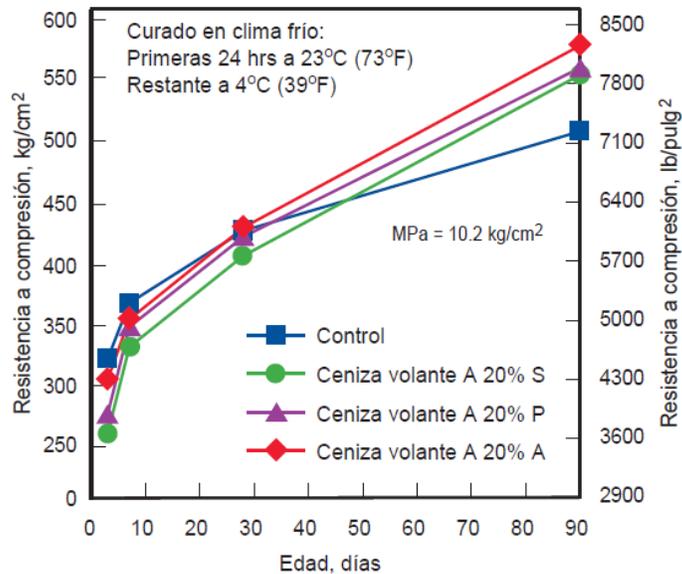


Figura 13. Resistencias a compresión de concretos curados a 23 °C (73 °F) durante las primeras 24 horas y curados a 4 °C (40 °F) durante el resto del tiempo. El concreto de control tenía un contenido de cemento de 322 Kg/m³ (560 lb/yd³) y una relación a/c de 0,45. Las curvas de ceniza volante muestran sustitución por cemento (S), sustitución parcial (igual) por cemento y arena y adición de ceniza volante con relación a la masa de cemento (A). La sustitución parcial del cemento o la adición de ceniza volante presentan desarrollo de resistencia similar a la mezcla de control que posee sólo cemento, incluso en clima frío (Detwiler, 2000).

4. Propiedades del concreto de alta resistencia

El Comité ACI 323 define concretos de alto y ultra alto desempeño, a aquellos con altos contenidos de cemento y bajas relaciones agua / material cementante. En principio se conocían como concretos de alta resistencia aquellos con resistencias mayores a 42 MPa, y de ultra alta resistencia aquellos con resistencias mayores de 80 MPa. Pero en muchos casos, no era la resistencia la propiedad requerida, sino la alta durabilidad o un alto módulo de elasticidad, de ahí el nombre de alto y ultra alto desempeño.

El concreto de ultra alto desempeño es un concreto con una matriz de cemento muy densa y homogénea, producto de la utilización de un alto contenido de material cementante, con una relación agua/material cementante muy baja, menor a 0,30; con un agregado grueso con tamaño máximo menor a 10,00 mm, y calidad superior, que utiliza necesariamente fibras metálicas, de polipropileno o ambas, con aditivos súper-plastificantes de última generación para lograr un producto de muy alta resistencia a la compresión, alrededor de 150 MPa, y una resistencia a la tracción superior al 10,00% de la resistencia a la compresión y altamente dúctil (ICCYC, 2009).

A continuación se relacionan algunas de las propiedades más importantes de los concretos de alta resistencia.

4.1. Resistencia a la compresión

El parámetro de caracterización del concreto más usado es el ensayo de compresión uniaxial. Diferentes razones, tales como el curado y la compactación de una manera más deficiente en campo conllevan a diferencias entre los resultados de ensayo a compresión uniaxial de las probetas falladas en laboratorio versus la resistencia lograda en el concreto puesto en la obra. Gran número de normas asumen un factor de reducción entre ambos valores en el rango de 0,70 a 0,80. Dicha diferencia puede resultar aún mayor en el caso de obras con concretos de altas resistencias, básicamente debido al alto control de calidad que se ejerce a los materiales (Hollan, 1987).

Diferentes autores han expresado la importancia que tiene el tiempo para que el concreto adquiera una resistencia indicada. Factores como las adiciones y el uso de superplastificantes influyen en las resistencias a edades tempranas; sin embargo, cada caso es especial y debe ser estudiado, ya que las condiciones de reactividad de una puzolana a la otra pueden variar significativamente, alterando el comportamiento de las resistencias en los diferentes intervalos de tiempo (Carrasquillo *et al.*, 1981).

Las diferencias entre las resistencias de un concreto convencional y uno de alto desempeño o alta resistencia se pueden evidenciar por:

- ✓ El incremento en la temperatura interna de curado debido al desarrollo de un alto calor de hidratación, producido por las elevadas cantidades de cemento que presentan las mezclas de alta resistencia.
- ✓ Distancias menores entre las partículas de cemento hidratado debido a la baja relación agua / material cementante de la mezcla.

En el caso de concretos con adición de microsilíce, datos disponibles (Malhotra y Carrette, 1983) indican que la resistencia a la compresión en un día es generalmente menor a igual que la obtenida con un concreto de control. Sin embargo a los 7 días y más adelante la resistencia del concreto con microsilíce es mayor y en algunas ocasiones notablemente mayor (Fig. 14).

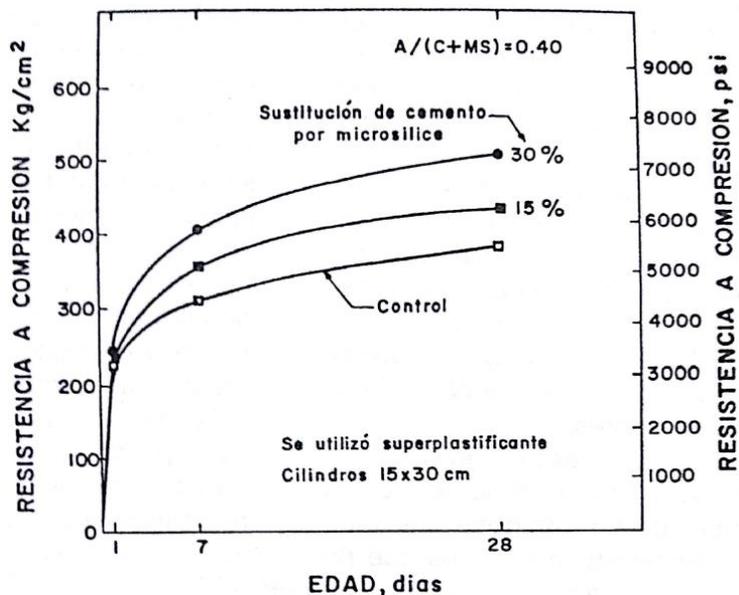


Figura 14. Efecto de la microsilice sobre la resistencia de concreto (Malhotra y Carette, 1983).

Otros autores como es el caso de Helland (1986), coinciden en un primer periodo de ganancia moderada de resistencia del concreto con humo de sílice. Según el autor el efecto de la reacción puzolánica comienza después de 3 a 7 días. Existen otros autores como Malhotra y Carette (1983), que mantienen la opinión de un mejor comportamiento frente al desarrollo de la resistencia a la compresión uniaxial del concreto con microsilice sobre el concreto con ceniza volante. Por lo que parece que el microsilice es un material puzolánico más reactivo y los resultados de las reacciones puzolánicas son evidentes a edades tempranas, más que a edades tardías, como sucede con los concretos con ceniza (Gálligo, 1990).

Otras investigaciones han llegado a conclusiones bien interesantes con respecto al uso de las cenizas en los concretos. En la Fig. 15 se observan mayores resistencias a cualquier edad de las mezclas con superplastificantes, sin embargo la adición de ceniza sin aditivo químico redujo en algo las resistencias a 1 día, aunque a partir de los 7 días las mezclas con cenizas dieron mayores resistencias que las de control (Carrasquillo, 1987).

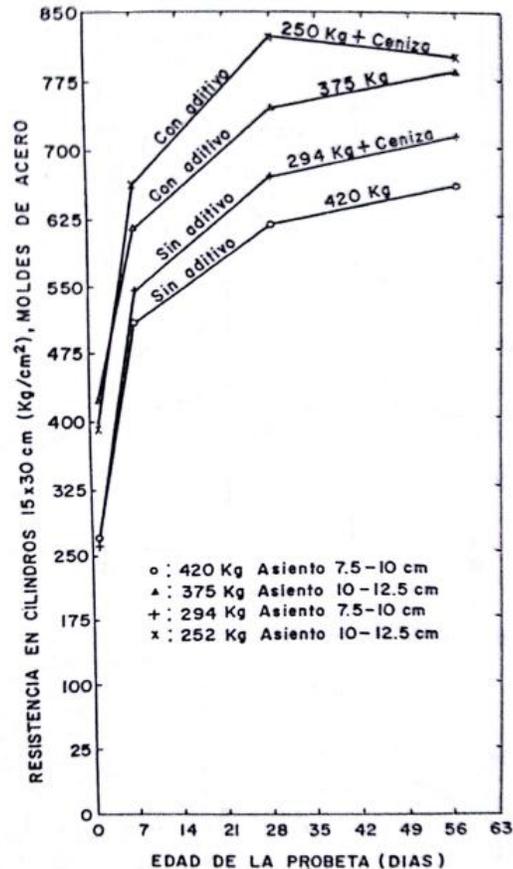


Figura 15. Efecto de la edad de la probeta, ceniza y superplastificante sobre la resistencia a compresión del concreto para mezclas con una relación agregado grueso / agregado fino (AG/AF) de 2, hechas con cemento tipo II, ceniza del 0 al 30,00% del peso y caliza de tamaño máximo 12 mm (Carrasquillo, 1987).

4.2. Resistencia a tracción

La resistencia a la tracción del concreto es una propiedad bien importante. Algunas características que están relacionadas con esta propiedad son la adherencia entre concreto y acero de refuerzo, el desarrollo de fisuras, la contribución del concreto para resistir cortante y torsión, entre otras.

El concepto de resistencia a tracción incluye tres diferentes modalidades:

- ✓ Resistencia a flexotracción (llamada también módulo de rotura).
- ✓ Resistencia a tracción por hendimiento (medida por medio del ensayo brasileño).
- ✓ Resistencia a tracción axial pura.

Sin embargo esta última no es posible realizarla debido a las complejidades que conlleva dicho ensayo.

Ensayos realizados por algunos investigadores han indicado que el módulo de rotura de los concretos de alta resistencia se encuentra en el siguiente rango (Gálligo, 1990):

$$0,62 * \sqrt{f'c} \text{ a } \sqrt{f'c} \text{ (MPa)}$$

$$7,5 * \sqrt{f'c} \text{ a } 12 * \sqrt{f'c} \text{ (psi)}$$

Los resultados obtenidos por autores como Nilson (1985), llevaron a proponer la siguiente expresión del módulo de rotura del hormigón, para resistencias entre 21 y 83 MPa.

$$f'r: 11,7 * \sqrt{f'c} \text{ (psi)}$$

$$f'r: 0,94 * \sqrt{f'c} \text{ (MPa)}$$

En la Fig. 16 se muestra gráficamente la relación entre la resistencia a la compresión del concreto, versus el módulo de rotura.

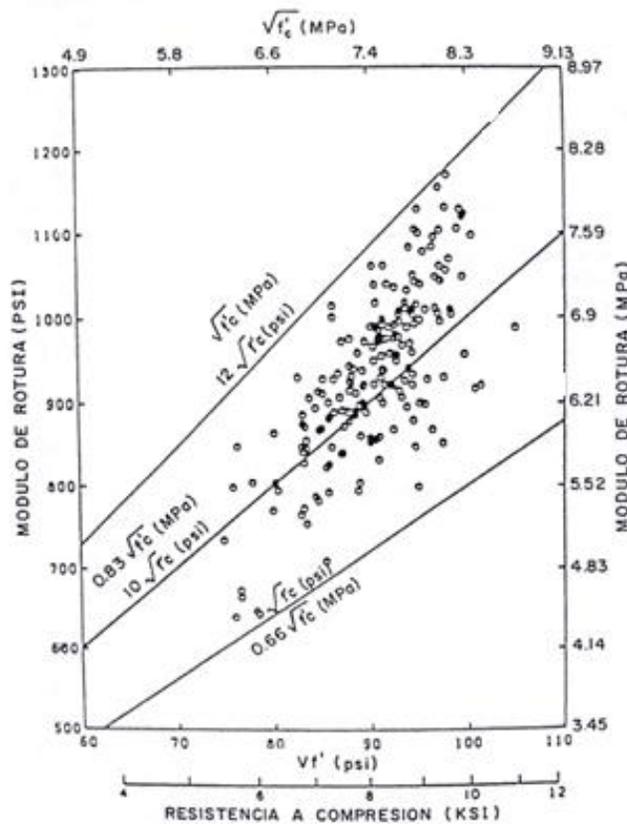


Figura 16. Módulo de rotura versus resistencia a compresión para vigas ensayadas a flexión (Gálligo, 1990).

4.3. Resistencia al ataque químico

Los ensayos realizados para investigar la resistencia al ataque químico en los concretos de alta resistencia son limitados. Sin embargo, experiencias del pasado han permitido conocer vagamente el comportamiento de estos concretos bajo condiciones de ataque químico. En una investigación desarrollada durante 1987 por Hendrik y Orbinson se elaboraron concretos con resistencias de 20, 48 y 62 MPa. Se llevaron a ensayo 140 especímenes cilíndricos de concreto en una solución ácida durante tres meses. La acidez de la solución tenía un pH de 2, 3, 4, 5 para las probetas de concreto de alta resistencia y una solución de agua destilada para las probetas de control (Gálligo, 1990).

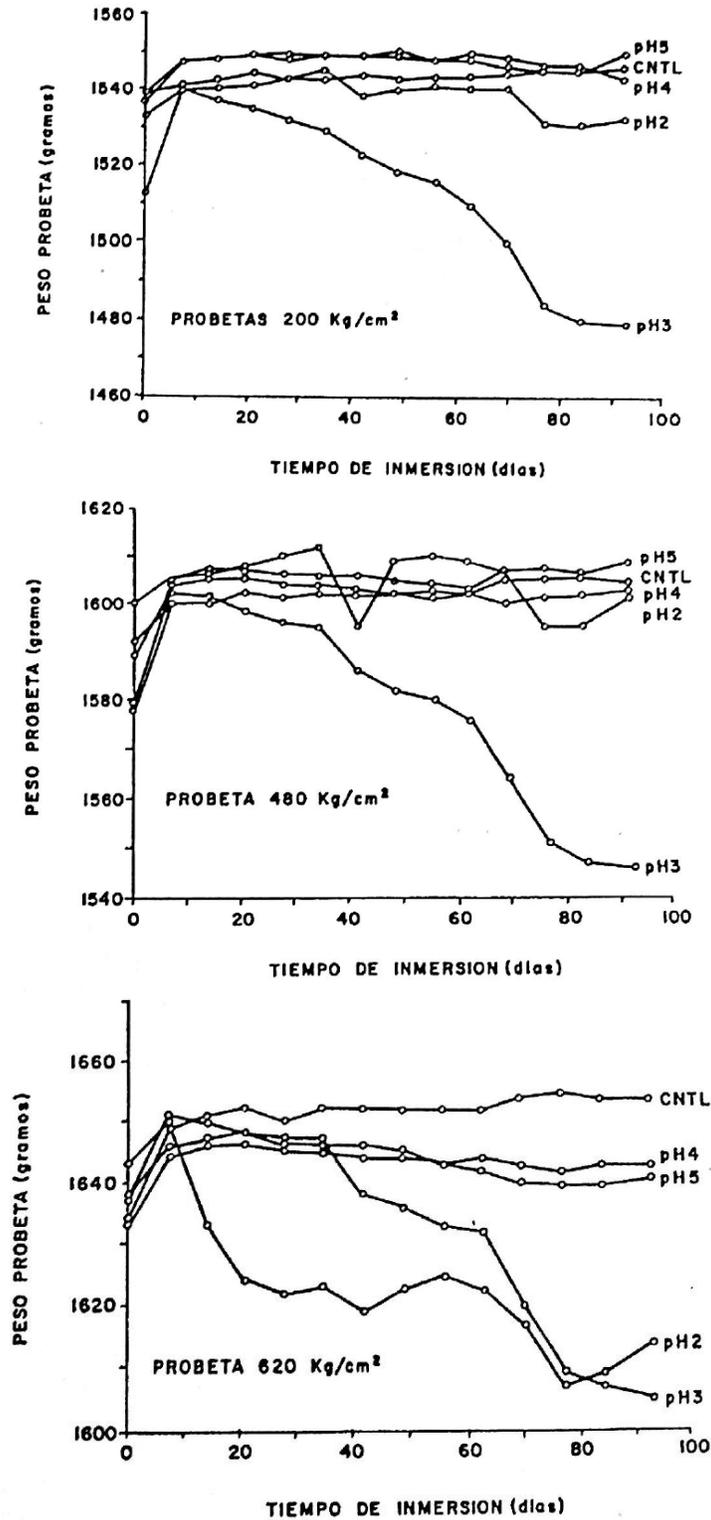
Tras la inmersión se hacía una observación de la apariencia de la probeta, de su pérdida de peso y de su resistencia a la compresión. El peor comportamiento correspondió a las de concreto de alta resistencia, que fueron las que mostraron mayor deterioro posterior a la inmersión, con la formación de gran cantidad de ampollas superficiales que tras explotar dejaban al descubierto la capa inferior de árido grueso. También la pérdida de peso fue mayor en estas probetas, en relación con las de control, tal como se observa en la Fig. 17 (Gálligo, 1990).

Los autores apuntan como causa de este mal comportamiento el mayor contenido de cemento existente en las mezclas de mayor resistencia.

Como se observa en la Fig. 17, en todas las probetas, independientemente de su resistencia, la mayor pérdida de peso se obtuvo en soluciones de pH = 3, con valores superiores incluso a la solución de pH = 2, que teóricamente debiera ser más corrosiva, sin que los autores analicen el porqué de este comportamiento. En cuanto a la pérdida de resistencia a compresión posterior a la inmersión, ésta no fue significativa en ninguno de los casos, manteniéndose dicha pérdida siempre por debajo del 10,00% (Gálligo, 1990).

A pesar de los malos resultados obtenidos durante los experimentos con estas soluciones ácidas, en Estados Unidos otros investigadores, Hollan y Luther (1987) emplearon concretos con adición de humo de sílice para la construcción de placas de piso en plantas industriales y del sector agrícola, bajo ataque químico con bórax, ácido sulfúrico y gran variedad de ácidos orgánicos respectivamente. Aunque los resultados del deterioro del concreto no fueron los mejores, si lograron observar que el tiempo de mantenimiento requerido para estas placas fue mucho mayor que con el concreto convencional (Gálligo, 1990).

Quizás la contradicción entre ambas fuentes esté en la utilización de la microsílíce en el concreto. Puede que la adición mineral sea la que mejore el comportamiento del concreto al ataque químico. Sea cual sea la razón, lo limitado de los ensayos no permiten llegar a conclusiones más detalladas.



Figuras 17. Peso de las probetas de concreto de 200, 480 y 620 Kg/cm² versus tiempo de inmersión en cada solución (Gálligo, 1990).

4.4. Diagrama tensión – deformación

En la gran mayoría de la bibliografía consultada se presenta el diagrama de tensión deformación del concreto de alta resistencia de la misma forma. Este diagrama tiene una rama ascendente más lineal hasta prácticamente alcanzar la tensión máxima, comparada con la que se observa en la curva de un concreto ordinario. Adicionalmente, la pendiente de la rama descendente resulta más pronunciada, vertical en algunos casos, con un brusco descenso de la capacidad de carga al sobrepasar la tensión máxima. Sin embargo, la forma de la rama descendente puede variar mucho según el método de ensayo empleado (Carrasquillo *et al.*, 1981).

En la Fig. 18 se muestra el comportamiento tensión-deformación después de la tensión máxima para concreto con caliza machacada y concreto ordinario. En esta gráfica se observan tres tipos, la rama tipo "a" se observó únicamente en los concretos ordinarios, las "b" y "c" se presentaron en los concretos con mayores resistencias, indicando una fractura más frágil y una más rápida liberación de la carga (Carrasquillo *et al.*, 1981).

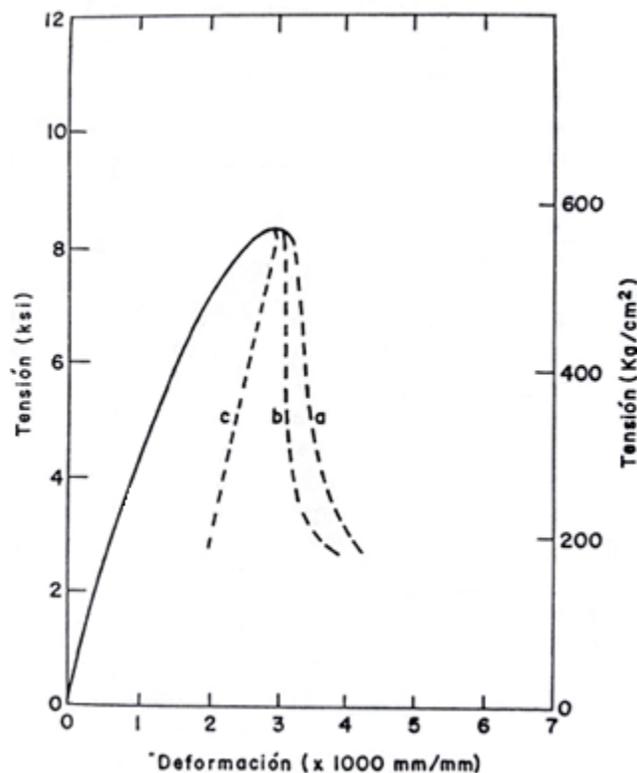


Figura 18. Comportamiento tensión-deformación después de la tensión máxima para concreto con caliza machacada (Carrasquillo *et al.*, 1981).

El concreto de alta resistencia presenta una menor micro-fisuración interna durante los ensayos a compresión. Como consecuencia de esto sufre menores deformaciones laterales, lo que conlleva a la obtención de una relación de Poisson (relación entre la deformación vertical y la horizontal de una probeta de concreto) mayor a la de los concretos ordinarios (Gálligo, 1990).

De acuerdo con el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10, 2010), la relación de Poisson para concretos ordinarios, en el caso que no se disponga de un valor experimental puede ser tomado como 0,20.

Finalmente se puede decir que en los concretos de alta resistencia el efecto de triaxial es diferente que en los concretos convencionales, lo cual ha sido demostrado en investigaciones realizadas que han comprobado la menor efectividad del confinamiento, debido a su capacidad inferior de deformación lateral (Fatitis y Shah, 1985).

5. Desarrollo experimental – Caracterización y análisis

A continuación se presenta el desarrollo experimental de la caracterización de la ceniza de la hoja de bambú, donde se describe paso a paso la experiencia del proceso de selección, procesamiento, pruebas y análisis de los resultados obtenidos.

La comparación entre la ceniza obtenida de la hoja de bambú con otros tipos de materiales similares es bien importante, puesto que permite entender el estado actual de sus propiedades físicas y químicas versus otros materiales que a la fecha se encuentran en el mercado. Adicionalmente, suministra información que permite prever cual podría ser el comportamiento de la ceniza de hoja de bambú frente a algunos agentes químicos, físicos y mecánicos, que no son del alcance del presente documento pero que, sin embargo, podrían ser relevantes para puntos de partida en futuras investigaciones.

5.1. Metodología

Se definieron nueve pasos en la metodología para la caracterización y evaluación de la reactividad puzolánica de la ceniza de las hojas de bambú. La ejecución de los pasos depende de la disponibilidad de los recursos para su ejecución. A continuación se describen dichos pasos:

1. Secado de las hojas al sol.
2. Quema en el horno eléctrico.
3. Molienda.
4. Análisis de composición química por fluorescencia de rayos X (FRX).
5. Tamizado del material.
6. Análisis de distribución de tamaño de partícula (DTP).
7. Medición de reactividad puzolánica [$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{BLA}$].
8. Evaluación de la resistencia a la compresión en cubos de mortero.
9. Análisis de resultados.

La matriz de proceso de la metodología a seguir para la primera etapa del proyecto se muestra en la Fig.19. De esta figura se puede observar que se presentan ítems como el N°4 “Análisis de composición química por fluorescencia de rayos X (FRX)”, en donde se genera un cumplimiento o

no del proceso, donde si no se cumple se tienen dos preguntas, ¿es por error en el proceso?, o ¿es por algo inherente al material?, por lo tanto, si la respuesta es que el material definitivamente no tiene lo que se está buscando entonces se sigue al numeral 9 “Resultados y análisis de resultados”, sin embargo si del análisis del no cumplimiento se encuentra que el problema fue un error en el proceso, entonces se regresa el ítem N°1, retomando el proceso desde el principio y continuando con un nuevo análisis.

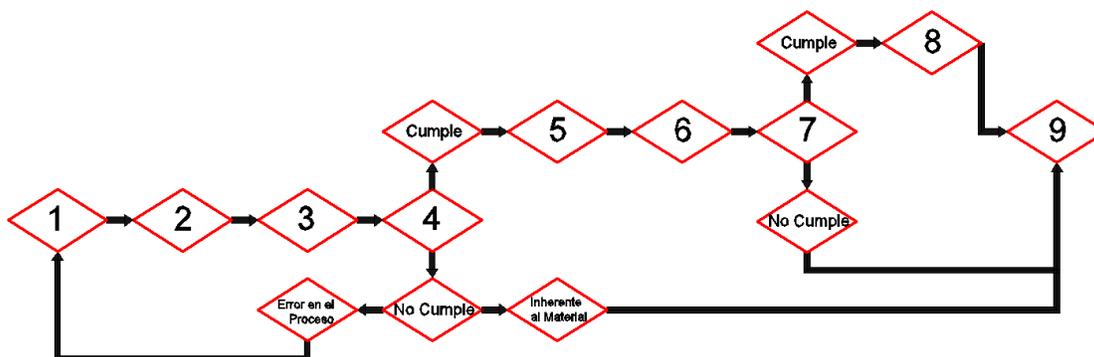


Figura 19. Matriz de proceso para la evaluación de la ceniza de las hojas de bambú.

La descripción de las actividades al interior de cada numeral descrito en la metodología se muestra como sigue:

1. **Secado de las hojas al sol:** El proyecto comienza con la consecución de las hojas de bambú, seguido del proceso de secado de las mismas al sol para retirar la humedad presente. Este proceso de secado tarda alrededor de seis horas exponiendo las hojas directamente al sol; siendo absolutamente necesario voltear constantemente las hojas para que su secado sea uniforme.
2. **Quema en el horno eléctrico:** Las hojas de bambú se llevan a un horno eléctrico, en este caso el horno usado para la quema es de marca Heraeus, referencia KR 260E, perteneciente al laboratorio de Sumicol, realizando la quema durante un tiempo de dos horas a una temperatura de aproximadamente 600°C.
3. **Molienda:** Posterior a la quema la ceniza obtenida se lleva a un proceso de molienda, utilizando un molino de bolas, permitiendo reducir el tamaño de las partículas de la ceniza con un objetivo de tamaño de partícula de aproximadamente 30 micrones, muy similar al tamaño de partícula del cemento Portland tipo III, el cual es usado para la elaboración del concreto estructural.
4. **Análisis de composición química por fluorescencia de rayos X (FRX):** Finalizado el procesamiento del material, se realiza un análisis químico de la ceniza, mediante la técnica

llamada FRX (Fluorescencia de Rayos X), de donde se obtiene la cantidad en porcentaje de óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de hierro (III), entre otros.

5. **Tamizado del material:** Posterior al proceso de molienda y el análisis de su composición química, se realiza un tamizado de la ceniza a través de una tamizadora tipo Rotap, usando diferentes tamaños de malla, en orden descendente de tamaño de partícula, N°200, 325, 400 y por último el tamiz de retenido.
6. **Análisis de distribución de tamaño de partícula (DTP):** La medición de la distribución de tamaño de partícula permite obtener la curva de distribución de tamaños en porcentaje de volumen y frecuencia.
7. **Medición de reactividad puzolánica [Ca (OH)₂ + BLA]:** La evaluación de la reactividad puzolánica se logra con la preparación de una solución saturada de hidróxido de calcio (Ca(OH)₃), a la cual se le adicionan 2,10 gramos de ceniza de hoja de bambú, realizando mediciones de conductividad eléctrica en intervalos de tiempo. A partir de estas mediciones se obtiene una correlación entre la medida de conductividad y la reacción de la ceniza con el hidróxido de calcio. La reacción química entre los componentes activos de la ceniza y el hidróxido de calcio permiten la formación del hidróxido hidratado de calcio, responsable del incremento de la resistencia en los morteros y concretos.
8. **Evaluación de la resistencia a la compresión en cubos de mortero:** Finalmente se selecciona un porcentaje del 20,00% de ceniza de hojas de bambú para ser utilizada como adición en la elaboración de cubos de mortero con base en la Norma NTC-3823. Estos cubos deben ser ensayados a la compresión uniaxial obteniendo los resultados de las muestras a edades de 7 y 28 días. Los resultados obtenidos del fallo de los cubos a diferentes edades se comparan con la mezcla base fallada a las mismas edades, analizando el comportamiento de la resistencia a la compresión uniaxial.
9. **Análisis de resultados:** Son los resultados del proceso descrito en la metodología, la interpretación de estos hallazgos y la forma en que los mismos son usados para cumplir con el objetivo principal del proyecto.

5.2. Caracterización de la ceniza de la hoja de bambú.

La metodología para la obtención y caracterización de la ceniza de hojas de bambú, tiene como base la investigación desarrollada por Cociña, 2010; modificada de acuerdo con la disponibilidad de equipos de laboratorio, personal de apoyo y el objetivo principal del proyecto.

Siguiendo la metodología planteada en el numeral 5.1, se presentan los resultados de la primera etapa del proyecto, tal como se muestra a continuación:

1. Secado de las hojas al sol

Las hojas de bambú utilizadas en el desarrollo de la investigación, son provenientes de un espécimen gramíneo localizado en la carrera 48 con la calle 9 Sur de la ciudad de Medellín, recolectadas por corte directo en el árbol y posteriormente puestas al sol durante ocho horas para su secado, permitiendo evaporar el agua presente en las hojas, y, tal como se mencionó anteriormente, este proceso permite la reducción de peso y volumen antes de la incineración.

2. Quema en el horno eléctrico

En la primera etapa del proyecto se incineraron 423,70 gramos de hojas de bambú en un horno eléctrico a una temperatura aproximada de 600°C durante 2 horas. El horno utilizado para este proceso es de marca Heraeus KR-260-E, perteneciente a los laboratorios del centro de investigación de Sumicol Corona en la ciudad de Sabaneta. El peso en ceniza recuperado del proceso de incineración fue de aproximadamente el 40,00% del peso total de las hojas ingresadas al horno, este dato es bien importante pues definirá la viabilidad económica de un proyecto macro para el procesamiento de este material.

3. Molienda

Posterior al proceso de incineración se realizó la molienda de las cenizas a través del uso de un molino de bolas perteneciente al laboratorio de Ingeniería de Materiales de la Universidad de Antioquia, sede Medellín. En las Tablas 14 y 15 se puede observar la información de distribución de tamaño y el peso de las bolas de acero que intervinieron en la molienda.

En el proceso de molienda se presentaron pérdidas de material cercanas a 3,50% debidas a la adherencia del material a los elementos de laboratorio y a su alta volatilidad.

El peso ideal de material para el proceso de molienda es considerado como el 10,00% del peso de la carga, sin embargo en este caso la cantidad de material en la molienda es mucho menor al ideal, tan solo 169,48 gramos de ceniza de hoja de bambú, cantidad de material obtenido de la quema.

El tiempo de la molienda fue de cinco minutos, calculado con base en la experiencia del personal de laboratorio. Sin embargo, siendo estrictos el tiempo de la molienda depende de la cantidad de material, de la dureza y especificaciones de tamaño de partícula a lograr. Para este proceso el tamaño aproximado de partícula esperado es de 30 micrómetros, muy similar al tamaño promedio de partícula del cemento Portland.

Tabla 14. Distribución de tamaño y peso de bolas para la molienda de la ceniza.

	Peso de la Carga (g):	6595,20
Tamaño de Bola	Grande (g)	2310,20
	Mediana (g)	2389,10
	Pequeña (g)	1895,90
Cantidad de Bolas	Grande (Unidades)	10,00
	Mediana (Unidades)	39,00
	Pequeña (Unidades)	72,00
Diámetro aproximado de Bolas	Grande (cm)	3,90
	Mediana (cm)	2,40
	Pequeña (cm)	1,80

Tabla 15. Información del proceso de molienda, peso de material procesado, velocidad y tiempo de molienda de la ceniza.

% Llenado del Molino	30%
Peso del Material (g):	169,48
Peso de material ideal según Procedimiento (g):	659,52
Velocidad de rotación (rpm):	53,94
Tiempo de Molienda (Min):	5,00
Peso del Material después de la molienda (g):	163,50

En la Fig. 20, se muestra el proceso de molienda llevado a cabo en el laboratorio de Materiales de la Universidad de Antioquía, sede Medellín.



Figura 20. Molienda de la ceniza.

La Fig. 21 muestra la ceniza obtenida de la primera quema de las hojas de bambú y posterior a su molienda, logrando un color negro muy fuerte, una textura muy fina y un tamaño a la vista relativamente pequeño de sus partículas.



Figura 21. Apariencia de la ceniza obtenida en la primera quema.

4. Análisis de composición química por fluorescencia de rayos X (FRX)

La caracterización química de la muestra se realizó en el laboratorio del Departamento de Investigación de Sumicol Corona, del municipio de Sabaneta, encontrando su composición química por medio de Fluorescencia de rayos X (FRX).

Los resultados de la caracterización química de la ceniza por medio del ensayo FRX, se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados análisis químico por FRX.

Identificación Muestra		Resultados (%)											
Muestra	Observaciones	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	BaO	P ₂ O ₅	PPI de 110-1000 °C
CHR- 1	Ceniza Hojas de Bambú	38,18	2,80	1,33	0,26	2,30	0,83	0,15	0,78	0,19	0,09	0,28	52,80
Análisis de acuerdo a la norma ASTM C 618		42,31								0,19			52,80

Con base en la norma ASTM C618 se logra una revisión de las propiedades de la ceniza, obteniendo la siguiente información:

La suma de SiO₂+ Al₂O₃ + Fe₂O₃ debe ser superior al 70,00% para cenizas tipo F, y mayor al 50,00% para cenizas tipo C; por lo tanto, con base en esta especificación y tras obtener un valor de 42,31% en la sumatoria, no es posible afirmar que la ceniza de hoja de bambú sea realmente una puzolana.

La cantidad de SO₃ debe ser menor a 5,00% para cenizas tipo F y C, en este caso se muestra un valor de 0,19%, cumpliendo con la norma.

El porcentaje de inquemados debe ser menor al 6,00% para cenizas tipo F y tipo C, y en este caso se alcanza un 52,8% de inquemados, lo cual se aleja por mucho del límite máximo permitido.

Con base en la información anterior, tomada del análisis químico de la ceniza de las hojas de bambú, se llega a la conclusión que la ceniza analizada no cumple como para ser considerada como material puzolánico.

El análisis de los resultados obtenidos hasta este punto del proceso permite evidenciar que el porcentaje de inquemados obtenidos es muy alto, comparado con el valor reportado por Cociña (2010) y el porcentaje máximo permitido por la norma ASTM C618, evidenciando que el problema principal durante el proceso de obtención de la ceniza es sin lugar a dudas la quema de las hojas de bambú.

El proceso de quema de las hojas no fue uniforme, provocando que parte del material sufriera una combustión excesiva, principalmente el de la capa superior del recipiente en el que se llevó al horno, ya que este material se expone directamente al calor generado por el horno, mientras que al interior de la masa de material la quema no alcanza la temperatura indicada para su correcta incineración. Todo esto conlleva a la obtención de partículas de material que no logran una correcta combustión.

Debido a que los resultados obtenidos durante la primera etapa no fueron favorables y son debidos a un error en el proceso, se debió comenzar desde el principio. Es así como se plantean alternativas para el procesamiento de las hojas y la correcta obtención de la ceniza, y se presenta un paso a paso para el desarrollo de las actividades del nuevo procesamiento del material, con el fin de obtener buenos resultados en la investigación.

5.2.1. Ajuste en la metodología de procesamiento para la obtención de la ceniza de las hojas de bambú.

Debido a que en la primera etapa del proyecto se evidenció un error en el proceso, ítem N°4 “Análisis de composición química por fluorescencia de rayos X (FRX)” se hace necesario una nueva matriz del proceso para la obtención, procesamiento y caracterización de la ceniza de las hojas de bambú, tal como se muestra en la Fig. 22.

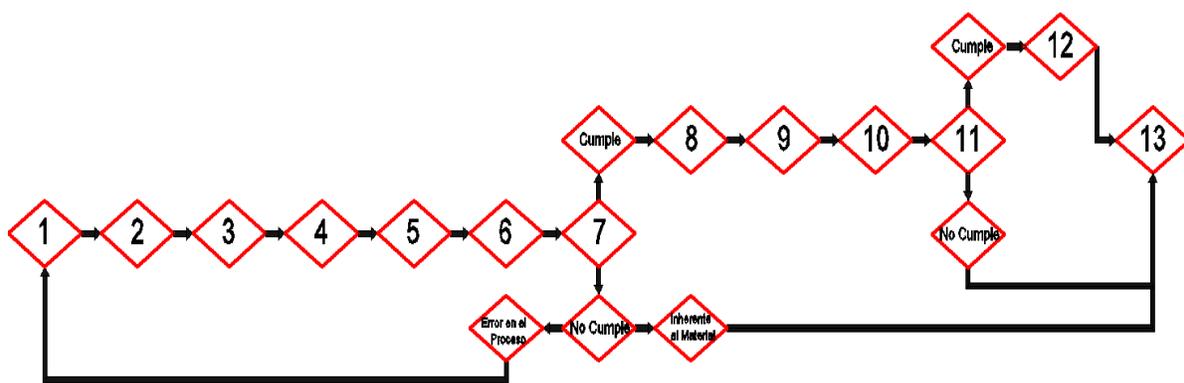


Figura 22. Matriz de proceso mejorada para la evaluación de la ceniza de las hojas de bambú.

A continuación se presentan los ítems de la nueva matriz:

1. Secado de las hojas al sol.
2. Corte de las hojas por medio de un equipo de aspas.
3. Pre-quema de las hojas por medio de un incinerador durante 5,00 minutos, logrando temperaturas de hasta 300°C, ayudando a reducir aún más el volumen para el ingreso al horno.
4. Preparación de la muestra para el ingreso al horno, sobre una bandeja resistente a altas temperaturas y distribuida en capas con un espesor no superior a 1,00 cm.
5. Quema en el horno eléctrico controlando el incremento de temperatura.
6. Molienda.
7. Análisis de composición química por FRX y DRX.
8. Tamizado del material.
9. Análisis de distribución de tamaño de partícula (DTP).
10. Análisis del tamaño y forma de las partículas por SEM.
11. Medición de reactividad puzolánica [Ca (OH)₂ + BLA].
12. Evaluación de resistencia a la compresión en cubos de mortero.
13. Análisis de resultados.

Un paralelo entre la primera etapa y la segunda etapa llevadas a cabo para el procesamiento y caracterización de la ceniza de las hojas de bambú se muestra en la Tabla 17. Se puede observar que algunos de los ítems de la matriz de proceso de la primera etapa han mudado, originando nuevos ítems en el proceso, lo cual pretende encontrar una metodología simple y funcional para la obtención de la ceniza.

Tabla 17. Comparativo de ítems de procesos entre primera y segunda etapa de procesamiento de la ceniza de las hojas de bambú.

Ítems de la matriz de proceso para la evaluación de la ceniza de las hojas de bambú (Primera etapa)	Ítems de la Matriz de proceso para la evaluación de la ceniza de las hojas de bambú (Segunda etapa)
1. Secado de las hojas al sol.	1. Secado de las hojas al sol. 2. Corte de las hojas por medio de un equipo de aspas.
2. Quema en el horno eléctrico.	3. Pre-quema de las hojas por medio de un incinerador durante 5 minutos, logrando temperaturas de hasta 300°C, ayudando a reducir aún más el volumen para el ingreso al horno. 4. Preparación de la muestra para el ingreso al horno, sobre una bandeja resistente a altas temperaturas y distribuida en capas con un espesor no superior a 1 cm. 5. Quema en el horno eléctrico controlando el incremento de temperatura.
3. Molienda	6. Molienda
4. Análisis de composición química por fluorescencia de rayos X (FRX).	7. Análisis de composición química por fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX).
5. Tamizado del material.	8. Tamizado del material.
6. Análisis de distribución de tamaño de partícula (DTP).	9. Análisis de distribución de tamaño de partícula (DTP). 10. Análisis del tamaño y forma de las partículas por SEM.
7. Medición de reactividad puzolánica [Ca (OH) ₂ + BLA].	11. Medición de reactividad puzolánica [Ca (OH) ₂ + BLA].
8. Evaluación de la resistencia a la compresión en cubos de mortero.	12. Evaluación de resistencia a la compresión en cubos de mortero.
9. Análisis de resultados.	13. Análisis de resultados.

5.2.2. Segunda etapa de análisis de la ceniza.

Debido a que los resultados obtenidos durante la primera etapa del proyecto no fueron los esperados, y con base en la nueva metodología propuesta para el mejoramiento del proceso de obtención y caracterización de la ceniza de las hojas de bambú, se describe a continuación el paso a paso de cada ítem considerado:

1. Secado de las hojas al sol

El secado de las hojas de bambú durante un tiempo aproximado de 6,00 horas, expuestas directamente a los rayos solares, permite la evaporación de gran parte del agua contenida en las hojas, como proceso previo a la prequema.

2. Corte de las hojas

El corte de las hojas secas por medio de espas giratorias logró una reducción importante en el volumen del material; sin embargo, no debe hacerse excesivo ya que fácilmente se genera un polvillo muy fino y volátil, lo cual ocasiona pérdida del material (Véase Fig. 23).



Figura 23. Corte de las hojas de bambú secas al sol por medio de espas giratorias.

3. Prequema

Anterior al proceso de quema en el horno, la pre-quema del material elimina el restante de agua presente en las hojas, además de reducir el volumen del material, permitiendo finalmente una disminución en las emisiones de gases durante la quema final en el horno causadas por la generación de CO_2 .

El resultado de la pre-quema es una ceniza de partículas de gran tamaño, de color negro y muy volátil (Véase Fig. 24), por lo que su manipulación debe realizarse adecuadamente, evitando pérdida del material.



Figura 24. Apariencia de la Ceniza obtenida durante la pre-quema.

4. Preparación de la muestra para el ingreso al horno

Una correcta distribución de las hojas pre-quemadas sobre una bandeja cerámica, en capas de hasta 1,00 cm aproximadamente permite una quema uniforme, evitando que el material sufra quemaduras excesivas en su capa superior. La distribución en pequeñas capas pretende generar un flujo de calor uniforme en todo el material para alcanzar un porcentaje de inquemados durante la etapa de caracterización química a través de FRX dentro de los límites máximos permitidos por las ASTM C-618.

5. Quema en el horno eléctrico

La quema del material en el horno fue de aproximadamente dos horas a una temperatura de 650°C, un poco por encima del planteado por Cociña (2010), permitiendo corregir de cierta manera las pérdidas por transferencia térmica al interior del horno. El equipo utilizado para este proceso fue un horno de marca Heraeus, referencia KR-260-E, propiedad del Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Universidad EAFIT, de la ciudad de Medellín.

El proceso de quema del material en el horno fue ajustado debido a la alta generación de gases, los cuales son liberados a la atmósfera durante este proceso; por lo tanto, la temperatura en el horno debió incrementarse de manera escalonada y controlada, permitiendo una reducción en la tasa de liberación de gases. Lo anterior se convirtió más en una restricción debido al ambiente de trabajo en laboratorio, ya que durante un proceso industrial estos gases podrían ser conducidos por chimeneas y tratados por medio de filtros antes de ser liberados a la atmósfera.

La temperatura inicial fue de entonces 150°C, sostenida durante 15,00 minutos, posteriormente se elevó hasta 350°C, manteniendo ésta durante 10,00 minutos, seguido de un incremento de temperatura hasta los 550°C, sostenida durante 10,00 minutos más; finalmente se llevó hasta una temperatura de 650°C, en la cual se mantuvo durante dos horas hasta terminar el proceso. El tiempo total de incineración del material alcanzó entonces las 2,58 horas aproximadamente.

Debido a las altas temperaturas en el horno, el recipiente o elemento sobre el cual se deposita el material debe estar en la capacidad de resistirlas sin sufrir daños o fracturas, y mucho menos alcanzar un cambio de fase o estado. El material seleccionado fue una pieza de arcilla cocida (teja de barro) donde se depositaron las hojas de bambú prequemadas en una capa muy delgada de hasta 1,00 cm de espesor, tal como se había indicado anteriormente. Todo este proceso permitió la uniformidad de la quema y evitó problemas como los encontrados durante la primera etapa del proyecto.

La extracción del material posterior a la quema, mostró una ceniza de color blanco, tal como se observa en la Fig. 25. Sin embargo, la ceniza obtenida evidenció una leve contaminación con material de un color rojizo claro, proveniente del desprendimiento de la capa superficial de la pieza de arcilla cocida, utilizada como vasija de soporte; mostrado en la Fig. 26.



Figura 25. Apariencia de la ceniza de hoja de bambú posterior a la quema final.



Figura 26. Coloración rojiza clara, efecto de la contaminación con polvillo de la pieza cerámica de arcilla cocida.

El peso de la ceniza recuperada del proceso de incineración para esta segunda quema fue de aproximadamente un 40,00% del peso total del material ingresado al horno. Este valor se mantiene con respecto a lo obtenido durante la primera quema, y es bien importante, pues define la viabilidad económica de un proyecto macro para la obtención de este material.

La cantidad de contaminante (polvillo de arcilla) en la ceniza, se determinó a partir de la diferencia de peso del material introducido al horno y su porcentaje de recuperación (40,00%). Por lo tanto el porcentaje de contenido de polvillo de arcilla en la ceniza se obtuvo de la siguiente manera:

Peso de material introducido al horno: 348,25 g,

Peso esperado posterior a la quema: $348,25 \text{ g} \times 0,40$: 139,30 g,

Peso real obtenido posterior a la quema: 140,90 g (pesados a la salida del horno),

Diferencia entre el peso obtenido y el esperado: $140,90 \text{ g} - 139,30 \text{ g}$: 1,60 g (peso del polvillo de arcilla).

Porcentaje de polvillo de arcilla en la ceniza: $(1,60 \text{ g} / 140,90) \times 100\%$: 1,14 %.

Con base en lo anterior, se observa que el porcentaje de contaminación de la muestra con el polvillo de arcilla es relativamente bajo, y de igual manera será su participación en los análisis y resultados de la caracterización.

El material contaminante (polvillo de arcilla), no genera una gran afectación en la caracterización química de la ceniza, debido a su poca cantidad. Sin embargo, se espera que los resultados de análisis físico y mecánico tengan cierto tipo de afectación, no necesariamente dañina, por el contrario, esto podría mejorar de cierta manera el desempeño de la ceniza al interactuar en una mezcla de mortero y/o concreto.

Las arcillas están constituidas por agregados de silicatos de aluminio-hidratados, procedentes de la descomposición de minerales de aluminio. Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0,002 mm. Químicamente es un silicato hidratado de alúmina, cuya fórmula es: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$, lo cual permite identificar que probablemente su afectación e interacción junto con la ceniza de la hoja de bambú es más benéfica que dañina.

6. Molienda

El tiempo de molienda de la ceniza se incrementó de 5,00 minutos –tiempo realizado en la primera etapa del proyecto– a media hora en esta segunda etapa. El resultado de este incremento en el tiempo de molienda es sin lugar a dudas generar una distribución más uniforme del tamaño de partícula, esperando lograr un tamaño objetivo ($D_v, 0.90$) de aproximadamente 30 micrómetros.

El proceso de la molienda de la ceniza se realizó con la ayuda de un molino de bolas. Para esta segunda etapa se usó el molino de las instalaciones del Laboratorio de Geología de la Universidad EAFIT, sede Medellín. En las Tablas 18 y 19, se muestra toda la información de distribución y peso de las bolas de acero que intervinieron en el proceso de la molienda para la ceniza de la hoja de bambú.

Tabla 18. Distribución de tamaño y peso de bolas para la molienda de la ceniza.

		Peso de la Carga (g):	8264,20
Tamaño de Bola	Grande (g)	1606,10	
	Mediana (g)	2749,10	
	Pequeña 1 (g)	2681,50	
	Pequeña 2 (g)	1227,50	
Cantidad de Bolas	Grande (Unidades)	15,00	
	Mediana (Unidades)	42,00	
	Pequeña 1 (Unidades)	84,00	
	Pequeña 2 (Unidades)	64,00	
Diámetro aproximado de Bolas	Grande (cm)	3,01	
	Mediana (cm)	2,51	
	Pequeña 1 (cm)	2,00	
	Pequeña 2 (cm)	1,71	

Tabla 19. Información del proceso de molienda, peso de material procesado, velocidad y tiempo de molienda de la ceniza.

% Llenado del Molino	23%
Peso del Material (g):	140,90
Peso de material ideal según Procedimiento (g):	826,42
Velocidad de rotación (rpm):	125,00
Tiempo de Molienda (Min):	30,00
Peso del Material después de la molienda (g):	136,40

El peso ideal de material en el proceso de molienda es considerado como el 10,00% del peso de la carga; sin embargo, durante el proceso la cantidad de material en la molienda fue mucho menor al ideal, tan solo 140,90 gramos de ceniza de hoja de bambú.

Tal como se había mencionado anteriormente, el tiempo de la molienda se incrementó a 30,00 minutos; este tiempo depende básicamente de la cantidad de material introducido al molino, del tamaño, cantidad y peso de las esferas de acero, así como de la dureza del material y especificaciones de tamaño de partícula a lograr. Para este proceso, bajo las condiciones de la molienda, el tamaño de partícula esperado es de aproximadamente 30 micrómetros.

En la Fig. 27 se muestra el proceso de molienda de la ceniza de las hojas de bambú, en las instalaciones del Laboratorio de Geología de la Universidad EAFIT, sede Medellín.

Como resultado de la molienda se generó una ceniza muy fina, de alta volatilidad, por lo que su manejo requirió especial cuidado, sobre todo al retirarlo de las paredes del molino y de la superficie de las bolas de acero. Este proceso es arduo, y requiere de un control adecuado para evitar pérdidas excesivas de material.



Figura 27. Equipo para la Molienda de la ceniza.

En las Fig. 28 y 29 se observa la alta adherencia de la ceniza en las paredes del molino y de las bolas de acero, lo cual dificultó su obtención. A pesar de llevarse un proceso meticuloso, se generaron pérdidas de material en este proceso de alrededor del 3,19% en peso del total del material molido, lo cual se considera como bajo y aceptable para el proceso.



Figura 28. Adherencia de la ceniza de hoja de bambú a las paredes del cilindro del molino de bolas.



Figura 29. Adherencia de la ceniza de hoja de bambú a las bolas de acero del molino.

La apariencia final de la ceniza, posterior a la molienda es de un polvo muy fino, similar al cemento Portland, pero con un color rojizo claro aportado por el porcentaje de polvillo de arcilla cocida proveniente de la pieza cerámica (teja de barro). Véase Fig. 30.

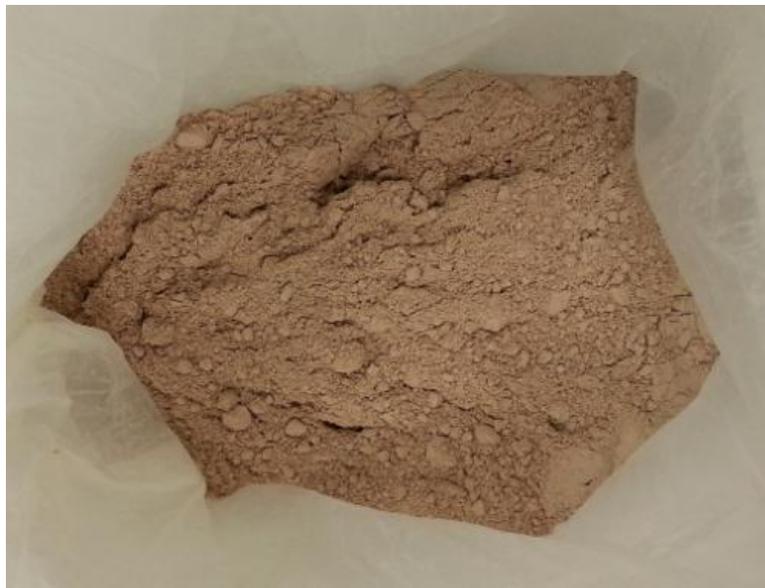


Figura 30. Apariencia de la ceniza de hoja de bambú, posterior al proceso de molienda.

7. Análisis de composición química por FRX y DRX

Por medio del análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX) realizado con el equipo AX105, marca Panalytical con un tubo de rodio de 2400W, se logró determinar la cantidad en porcentaje de los componentes químicos presentes en la ceniza, tal como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados análisis químico por FRX.

Identificación Muestra		Resultados (%)											
Muestra	Observaciones	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	BaO	P ₂ O ₅	LOI 950 °C
CHR- 2	Ceniza Hojas de Bambú	75,85	3,95	2,27	0,31	5,18	2,38	0,39	1,64	0,17	0,04	0,62	6,97
Análisis de acuerdo a la norma ASTM C 618		82,07								0,19			6,97

Con base en la norma ASTM C618, se logra una revisión de las propiedades de la ceniza, obteniendo la siguiente información:

La suma de SiO₂+ Al₂O₃ + Fe₂O₃ debe ser superior al 70,00% para cenizas tipo F, y mayor al 50,00% para cenizas tipo C, por lo tanto con base en esta especificación, y luego de haber obtenido un 82,07% en la suma de estos elementos, se puede inferir que la ceniza de las hojas de bambú puede estar catalogada como material puzolánico.

La cantidad de SO₃ debe ser menor al 5,00% para cenizas tipo F y C, en este caso muestra un valor de 0,19%, cumpliendo con la norma.

El porcentaje de inquemados debe ser menor al 6,00% para cenizas tipo F y tipo C, y en este caso se obtiene un valor de 6,97% de inquemados, lo cual no se aleja mucho del límite máximo permitido.

La información obtenida del análisis químico de la ceniza de la hoja de bambú permite inferir que este material pueda ser considerado como puzolana, sin embargo hay pruebas que aún deben ser realizadas para poder verificar el grado de reactividad de la misma, tal como se verá más adelante.

La composición mineralógica estudiada por Difractometría de Rayos X (DRX) fue llevada a cabo para la muestra de ceniza de las hojas de bambú. Se utilizó el difractómetro Xpert Pro, marca Panalytical, con un detector celerator y un tubo de cobre, el cual permite la identificación de los componentes químicos más representativos de la muestra de ceniza. Los resultados obtenidos se

muestran en la Fig. 31; de la gráfica se puede observar que, para 2θ entre $20-30^\circ$ se presentan los mayores picos, sin embargo en general la ceniza puede verse como un material altamente amorfo.

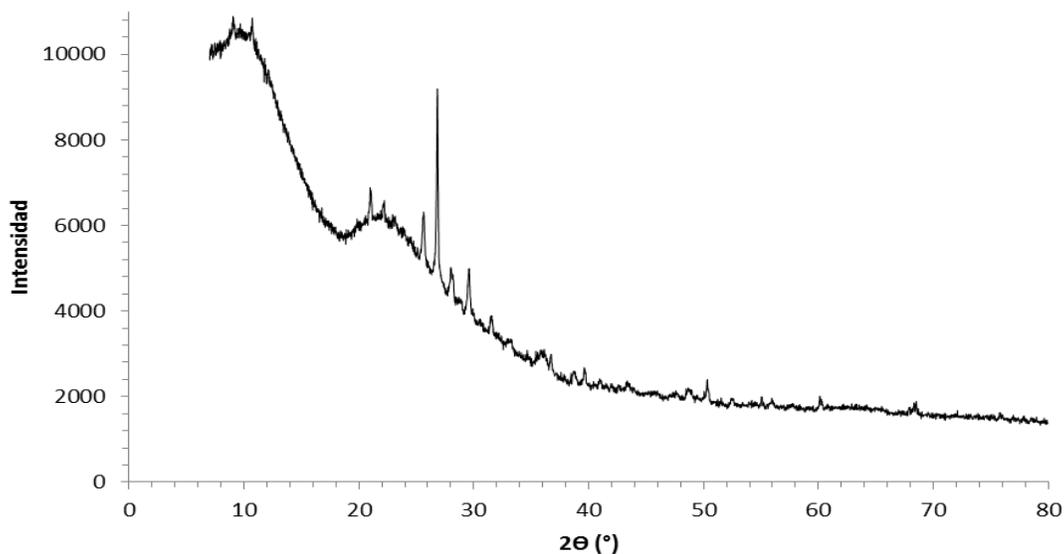


Figura 31. DRX de la muestra de ceniza de hoja de bambú.

Los ensayos a la muestra de ceniza se llevaron a cabo en el laboratorio de Argos, localizado en la Universidad EAFIT, sede Medellín. Con los resultados obtenidos mediante el análisis por DRX, se realizó una cuantificación de los principales minerales encontrado en la ceniza, tal como se observa en las Fig. 32 y 33.

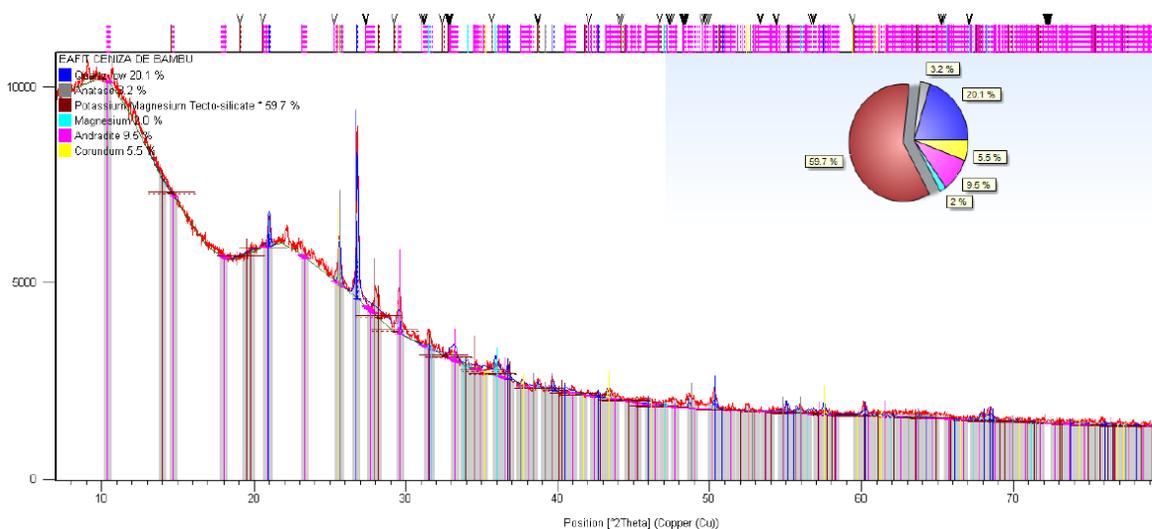


Figura 32. Cuantificación de los componentes de la ceniza de hoja de bambú.

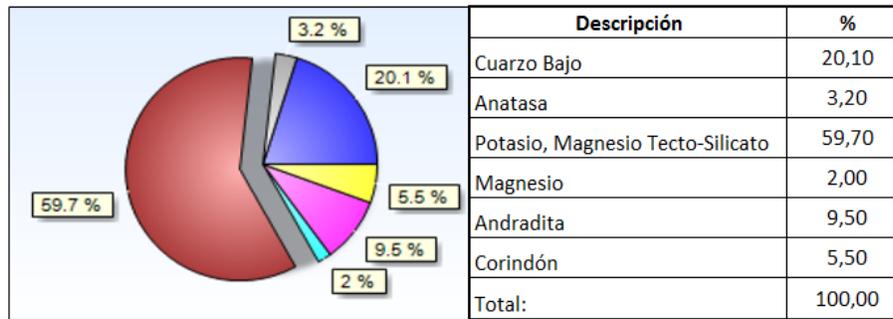


Figura 33. Porcentajes de cuantificación de los componentes de la ceniza de hoja de bambú.

A continuación se presenta una descripción más detallada de los seis principales minerales encontrados en la muestra de ceniza de hojas de bambú.

✓ **Análisis de los principales minerales**

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) (UNAD, 2012). Las proporciones relativas de dos o más minerales presentes en una misma muestra se obtienen comparando las intensidades de sus respectivas líneas con aquellas de muestras de composición conocida. Un ejemplo de esta aplicación es la identificación en minerales arcillosos de la fracción del suelo cuyas partículas minerales tienen un tamaño inferior a $2 \mu\text{m}$ (Gómez, 2006).

La cuantificación de los componentes químicos de la ceniza permiten identificar cuales de éstos aparecen con mayor intensidad en el conteo realizado a través de DRX. Los principales componentes mostrados en las Fig. 31 y 32, tienen al Cuarzo bajo, Potasio y Magnesio tecto-silicato como los elementos de mayor conteo al interior de la muestra, sumando entre todos estos un 79,80% del contenido total de los elementos hallados en la muestra.

- **El cuarzo bajo:** Presenta un 20,10 % del total de la cuantificación de los elementos presentes en la muestra. Su fórmula química es SiO_2 , de la subclase de los tectosilicatos y del grupo de la sílice, con un sistema cristalográfico hexagonal 32; un grupo espacial P3221 y una densidad de $2,65 \text{ g/cm}^3$. Este presenta su mayor pico aproximadamente a un ángulo de difracción 2θ de $26,8^\circ$.

- **Anatasa:** Presenta un 3,20% del total de la cuantificación de los elementos presentes en la muestra. La anatasa también es conocida como octaedrita, es una de las cinco formas minerales del óxido de titanio (IV) o dióxido de titanio (TiO₂). Presenta un sistema cristalino Tetragonal - Ditetragonal Dipiramidal; con una densidad de 3,90 g/cm³. Esta presenta su mayor pico aproximadamente a un ángulo de difracción 2θ de 48,70°.
- **Potasio, Magnesio Tectosilicato:** Presenta un 59,70 % del total de la cuantificación de los elementos presentes en la muestra. Este presenta su mayor pico aproximadamente a un ángulo de difracción 2θ de 27,90°. Los tectosilicatos son los silicatos estructuralmente más estables, se caracterizan por tener todos los tetraedros enlazados mediante aniones de oxígeno por lo que tienen, comparativamente con el resto de los silicatos, un elevado nº de enlaces de Si-O (Ibáñez, 2011).

Estructuralmente se caracterizan porque los tetraedros SiO₄ se unen entre sí en el espacio compartiendo los cuatro oxígenos dando lugar a un armazón tridimensional en el que la relación Si: O es 1:2. Los minerales más sencillos son los del grupo de la sílice que, aunque es un óxido en su composición química, se incluye en los tectosilicatos y no en los óxidos por su tipo de estructura. Todos los demás tectosilicatos llevan Al₃ reemplazando al Si₄ en los tetraedros, es decir, todos son aluminosilicatos con la relación Si: Al o bien 1:1 o bien 3:1 dando radicales (Al₂Si₂O₈)₂⁻ y (AlSi₃O₈)⁻. En líneas generales, todos los tectosilicatos son aluminosilicatos de Na, K, Ca y Ba. También en la composición de los tectos pueden entrar aniones adicionales, las más frecuentes son F⁻, Cl⁻, OH⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻ y también pueden entrar moléculas de H₂O. Por lo tanto los minerales de esta subclase son muy homogéneos, son de colores claros siempre que estén libres de inclusiones porque en ellos no entran iones cromóforos como el Fe o Mg. Son minerales de densidades bajas y dureza de 4,00 a 6,00 (Viñas, 2012).

- **Magnesio:** Presenta un 2,00% del total de la cuantificación de los elementos presentes en la muestra. Este presenta su mayor pico aproximadamente a un ángulo de difracción 2θ de 36,00°. El magnesio no se encuentra en la naturaleza en estado libre (como metal), sino que forma parte de numerosos compuestos, en su mayoría óxidos y sales; es insoluble. El magnesio elemental es un metal liviano, medianamente fuerte, color blanco plateado. En contacto con el aire se vuelve menos lustroso, aunque a diferencia de otros metales alcalinos no necesita ser almacenado en ambientes libres de oxígeno, ya que está protegido por una fina capa de óxido, la cual es bastante impermeable y difícil de sacar.

Como su vecino inferior de la tabla periódica, el calcio, el magnesio reacciona con agua a temperatura ambiente, aunque mucho más lento. Cuando se sumerge en agua, en la

superficie del metal se forman pequeñas burbujas de hidrógeno, pero si es pulverizado reacciona más rápidamente (Viñas, 2012).

- **Andradita:** Presenta un 9,50% del total de la cuantificación de los elementos presentes en la muestra. Presenta un sistema cristalográfico Cúbico, Isométrico. La andradita es un mineral del grupo de los Silicatos, subgrupo Neso-silicatos y dentro de estos es un granate por la típica forma isométrica de sus cristales, con 12 ó 24 caras trapezoidales. Es un silicato de hierro y calcio, de color normalmente amarillento con variables tonalidades. Su fórmula química es $\text{Ca}_3(\text{Fe}^{3+})_2(\text{SiO}_4)_3$, con una densidad de $3,90 \text{ g/cm}^3$. Este presenta su mayor pico aproximadamente a un ángulo de difracción 2θ de $29,70^\circ$.

- **Corindón:** Presenta un 5,50% del total de la cuantificación de los elementos presentes en la muestra. El corindón es un mineral del grupo IV (óxidos) según la clasificación de Strunz. Este presenta su mayor pico aproximadamente a un ángulo de difracción 2θ de $25,60^\circ$. Está formado por óxido de aluminio (Al_2O_3). Se encuentra en la naturaleza bajo la forma de cristales; normalmente, en pegmatitas, anfibolitas, peridotitas, gneis o mármoles, y menos comúnmente en rocas volcánicas. En forma amorfa, aparece como escoria en el proceso de unión de rieles de ferrocarril mediante soldadura aluminotérmica. Presenta un sistema cristalográfico Hexagonal y Trigonal; con una densidad de $4,05 \text{ g/cm}^3$ (Viñas, 2012).

8. Tamizado del material

Debido a que el proceso de trituración o molienda de la ceniza es absolutamente mecánico, dependiente del tiempo, de la carga y del material a triturar, es necesario realizar un tamizado del material posterior a la molienda. Este tamizado permite verificar de una manera aproximada los porcentajes de tamaño de partículas obtenidas durante la etapa de molienda del material, y la cantidad de pasantes por cada una de las mallas. En la Tabla 21 se describen las mallas utilizadas en el proceso de tamizado de la ceniza.

El tamizado se realizó por medio del equipo Rotap, marca Ponzuar, serie 183, propiedad del laboratorio de Materiales de la Universidad de Antioquía, sede Medellín.

Tabla 21. Descripción de mallas y de cada una de ellas.

Descripción Malla	Peso Malla (g)
Malla 200	308.19
Malla 325	317.23
Malla 400	318.94
Colector	418.56

Los resultados finales del proceso de tamizado se muestran en la Tabla 22, donde se resaltan las cantidades en peso y porcentaje de retenidos en las mallas 400 y colector, los cuales son los tamaños indicados para llevar al siguiente proceso del proyecto (resaltado en gris).

Tabla 22. Resultados del proceso de tamizado.

Descripción Malla	Peso Retenido (g)	% Retenido
Retenido Malla 200	19,74	16,35
Retenido Malla 325	37,84	31,35
Retenido Malla 400	53,25	44,11
Retenido Colector	11,17	8,19
TOTAL:	120,72	100,00

% Pérdida de Material Durante el proceso:	12,99
Pérdida de Material Durante el proceso (g):	27,22

De las Tablas 19 y 22, se obtiene el porcentaje total de pérdidas de material durante el proceso de molienda y tamizado, con un total de 16,18 %, debido principalmente a la volatilidad del mismo y su alta adherencia a los objetos de laboratorio.

El proceso de tamizado puede ser tan complicado o tan sencillo dependiendo de las características del material a tamizar, para este caso el material es muy fino y volátil, con alta adherencia a los objetos, lo cual dificulta el proceso y lo hace poco eficiente, es así como de la Tabla 23 se puede observar un alto número de pasadas realizadas del material para lograr un adecuado tamizado.

Tabla 23. Condiciones finales del proceso de tamizado.

Tiempo de Tamizado (Min):	10,00
Número de pasadas (Un):	4,00
Tiempo Total de Tamizado (Min):	40,00

El retenido en la malla 400, pasante malla 325 y en el colector es el material adecuado esperado para el proceso de caracterización mecánica (elaboración de morteros y/o concretos), ya que éste es el más fino; sin embargo, la suma de ambos sólo alcanza 64,42 g, y para la preparación de la mezcla de mortero se requiere de al menos 100 g, por lo que finalmente se suma el retenido en la malla 325, para un total de 102,26 g.

9. Distribución de tamaño de partícula

Los resultados del análisis de la distribución de tamaño de partícula son mostrados en las Tablas 24, 25 y 26 y en las Fig. 34 y 35.

Tabla 24. Resultados % de volumen acumulado del ensayo de distribución de tamaño de partícula.

Sampler: Internal		Measured Beam		Obscuration: 13.0 %			
Presentation: 5_CEN		Analysis: Poly disperse		Residual: 0.938 %			
Modifications: None							
Conc. = 0.0142 % Vol		Density = 2.650 g/cm ³		S.S.A. = 0.3137 m ² /g			
Distribution: Volume		D[4, 3] = 20.24 um		D[3, 2] = 7.22 um			
D(v, 0.1) = 3.36 um		D(v, 0.5) = 15.56 um		D(v, 0.9) = 44.31 um			
Span = 2.631E+00		Uniformity = 8.187E-01					
Size (um)	Volume Over %	Size (um)	Volume Over %	Size (um)	Volume Over %	Size (um)	Volume Over %
0.05	100.00	0.58	99.54	6.63	76.87	76.32	0.57
0.06	100.00	0.67	99.33	7.72	72.85	88.91	0.00
0.07	100.00	0.78	99.07	9.00	68.47	103.58	0.00
0.08	100.00	0.91	98.73	10.48	63.75	120.67	0.00
0.09	100.00	1.06	98.30	12.21	58.69	140.58	0.00
0.11	100.00	1.24	97.78	14.22	53.31	163.77	0.00
0.13	100.00	1.44	97.14	16.57	47.63	190.80	0.00
0.15	100.00	1.68	96.36	19.31	41.68	222.28	0.00
0.17	100.00	1.95	95.41	22.49	35.51	258.95	0.00
0.20	100.00	2.28	94.24	26.20	29.14	301.68	0.00
0.23	100.00	2.65	92.82	30.53	22.91	351.46	0.00
0.27	99.99	3.09	91.10	35.56	17.09	409.45	0.00
0.31	99.95	3.60	89.04	41.43	11.97	477.01	0.00
0.36	99.90	4.19	86.60	48.27	7.75	555.71	0.00
0.42	99.82	4.88	83.76	56.23	4.45		
0.49	99.70	5.69	80.52	65.51	2.05		

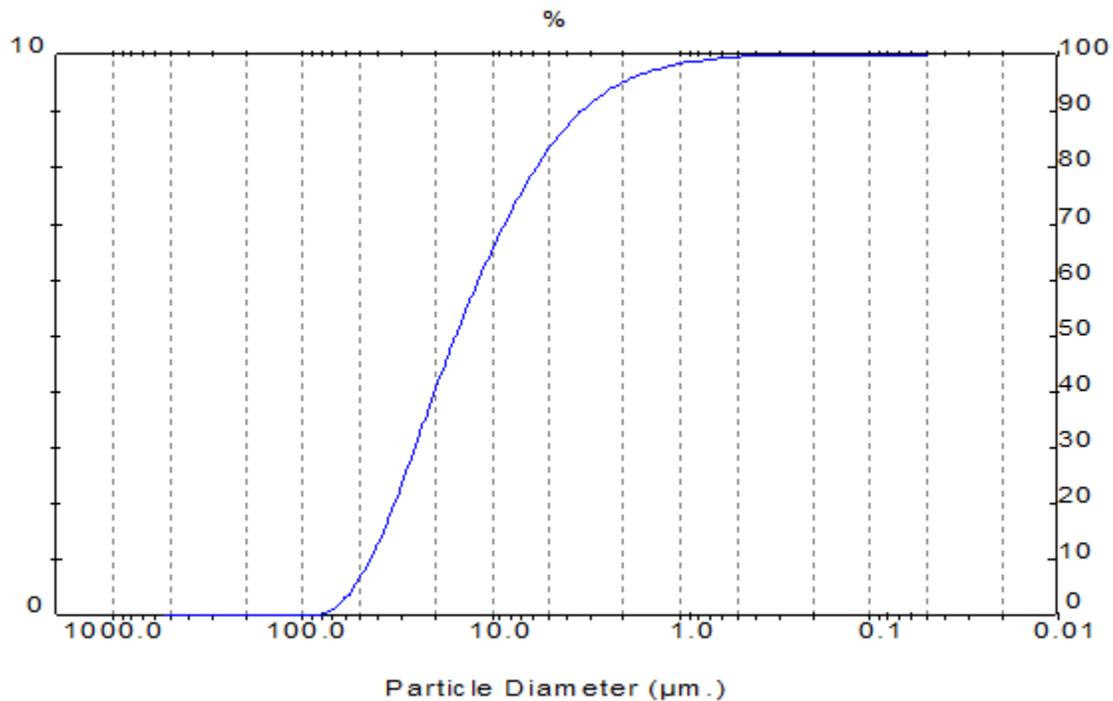


Figura 34. % volumen acumulado del ensayo de distribución de tamaño de partícula.

Tabla 25. Resultados en el histograma del ensayo de distribución de tamaño de partícula.

Sampler: Internal		Measured Beam Obscuration: 13.0 %					
Presentation: 5_CEN		Analysis: Poly disperse					
Modifications: None		Residual: 0.938 %					
Conc. = 0.0142 % Vol		Density = 2.650 g/cm ³					
Distribution: Volume		S.S.A. = 0.3137 m ² /g					
D(v, 0.1) = 3.36 µm		D[4, 3] = 20.24 µm					
Span = 2.631E+00		D(v, 0.5) = 15.56 µm					
		D(v, 0.9) = 44.31 µm					
		Uniformity = 8.187E-01					
Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.05	0.00	0.58	0.21	6.63	4.02	76.32	0.57
0.06	0.00	0.67	0.27	7.72	4.38	88.91	0.00
0.07	0.00	0.78	0.34	9.00	4.72	103.58	0.00
0.08	0.00	0.91	0.42	10.48	5.06	120.67	0.00
0.09	0.00	1.06	0.52	12.21	5.38	140.58	0.00
0.11	0.00	1.24	0.64	14.22	5.68	163.77	0.00
0.13	0.00	1.44	0.78	16.57	5.95	190.80	0.00
0.15	0.00	1.68	0.96	19.31	6.18	222.28	0.00
0.17	0.00	1.95	1.17	22.49	6.37	258.95	0.00
0.20	0.00	2.28	1.42	26.20	6.23	301.68	0.00
0.23	0.01	2.65	1.72	30.53	5.82	351.46	0.00
0.27	0.03	3.09	2.06	35.56	5.13	409.45	0.00
0.31	0.05	3.60	2.44	41.43	4.22	477.01	0.00
0.36	0.08	4.19	2.84	48.27	3.30	555.71	0.00
0.42	0.12	4.88	3.25	56.23	2.39		
0.49	0.16	5.69	3.64	65.51	1.48		
0.58		6.63		76.32			

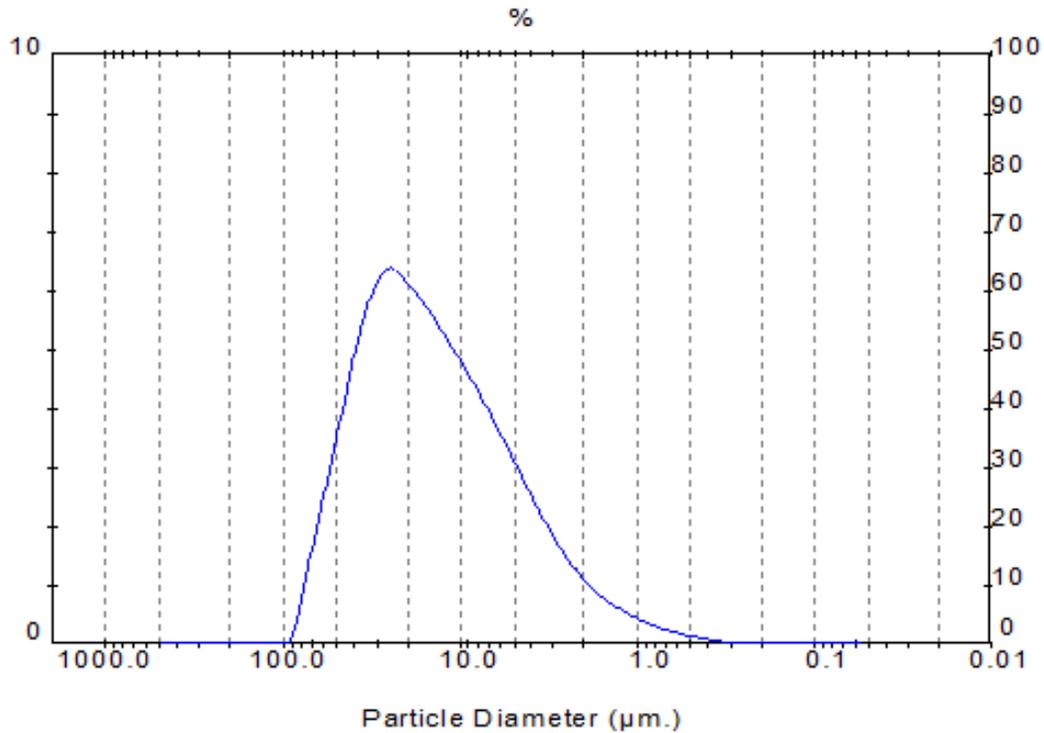


Figura 35. % de volumen en el histograma del ensayo de distribución de tamaño de partícula.

Finalmente del análisis de distribución de tamaño de partícula se obtuvo la información mostrada en la Tabla 26.

Tabla 26. Resumen análisis de distribución de tamaño de partícula.

Tamaño de partícula (μm)	DV. 10	3.36
	DV. 50	15.56
	DV. 90	44.31

El tamaño de los granos de cemento se encuentra por lo general entre 2 y 150 μm . Los granos más activos son aquellos comprendidos entre 3 y 30 μm (quienes reaccionan a mayor velocidad), mientras los granos superiores a 60 μm son prácticamente inertes, con una velocidad de reacción extremadamente lenta.

Para el proyecto el DV 90 fue de 44,31 μm , garantizando un tamaño de partícula medianamente bueno comparado con el tamaño de los granos de cemento Portland.

10. Análisis del tamaño y forma de las partículas por SEM

Una observación detallada de la ceniza por SEM, usando un microscopio de barrido electrónico marca Phenom, referencia G2 Pro, permitió determinar una morfología irregular de la muestra, con algunas partículas con superficies lisas en la parte superior (Fig. 35). Se presenta una distribución de tamaño de partícula muy variable desde 2 micrones hasta 90 micrones (Fig. 36, 37 y 38).

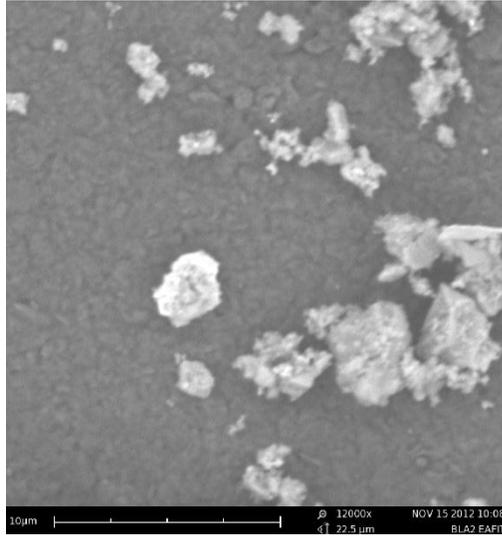


Figura 36. Microscopia de barrido electrónico (SEM) - Morfología de la ceniza de hoja de bambú, 1200x.

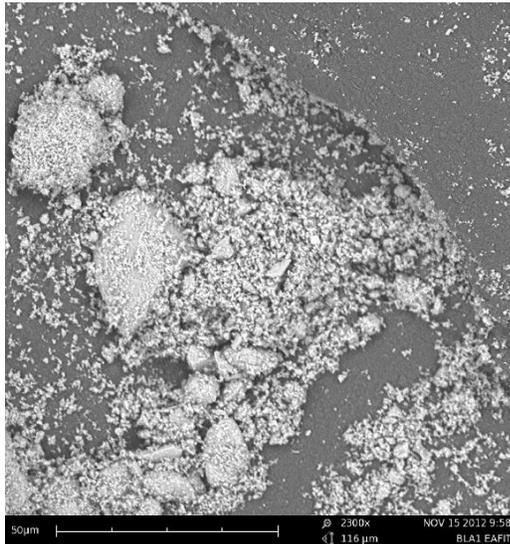


Figura 37. Microscopia de barrido electrónico (SEM) - Morfología de la ceniza de hoja de bambú, 2300x.



Figura 38. Microscopia de barrido electrónico (SEM) - Morfología de la ceniza de hoja de bambú, 480x.

11. Medición de la actividad puzolánica, Ca(OH)_2 + BLA.

Para llevar a cabo una determinación cualitativa o cuantitativa de la actividad puzolánica experimentalmente se han desarrollado muchas metodologías (Frías, *et al.*, 2005). En este proyecto, como en estudios realizados por el autor Villar (2010), un método simple de evaluación de la conductividad se utilizó con el fin de estudiar la actividad puzolánica para la ceniza de las hojas de bambú. El método utilizado sigue la conductividad de la solución saturada de hidróxido de calcio-puzolana versus el tiempo de reacción. Cien mililitros de solución saturada de Ca(OH)_2 son mezclados con 2,10 g de ceniza de hoja de bambú (proporción que se encuentra comúnmente en la literatura para experimentos similares) agitándose magnéticamente a temperatura ambiente (25 °C), véase Fig. 39.

Previo a la adición de la ceniza de hoja de bambú en la solución saturada, se realizó la toma de mediciones de conductividad eléctrica en la solución saturada de Ca(OH)_2 , variando la concentración de la misma y tomando mediciones de conductividad cada vez. Esto permitió realizar una curva base de reactividad ($\mu\text{sm/cm}$ vs. concentración de Ca(OH)_2), tal como se observa en la Fig. 40.

Seguido de la medición de conductividad de la solución con hidróxido de calcio a diferentes concentraciones, se adicionó la ceniza de hoja de bambú (2,10 g), tomando mediciones de conductividad cada lapso de tiempo, inicialmente cada media hora hasta alcanzar las diez primeras horas, posteriormente cada hora hasta las diecisiete horas y finalmente cada seis horas hasta llegar a setenta horas de mediciones posterior al inicio de la reacción, tal como se observa en la Fig. 41.

La Fig. 41 permite determinar la conductividad de la solución de la ceniza de la hoja de bambú con el Ca(OH)_2 en un intervalo de tiempo, presentando una pendiente de la curva mucho mayor durante las primeras diez horas, sin embargo este proceso de reacción se mantiene incluso hasta el final de la toma de datos, a las setenta horas posteriores al inicio de la prueba.



Figura 39. A la izquierda se observa la solución saturada de Hidróxido de calcio, Ca(OH)_2 , y a la derecha la muestra de ceniza (2,10 g).

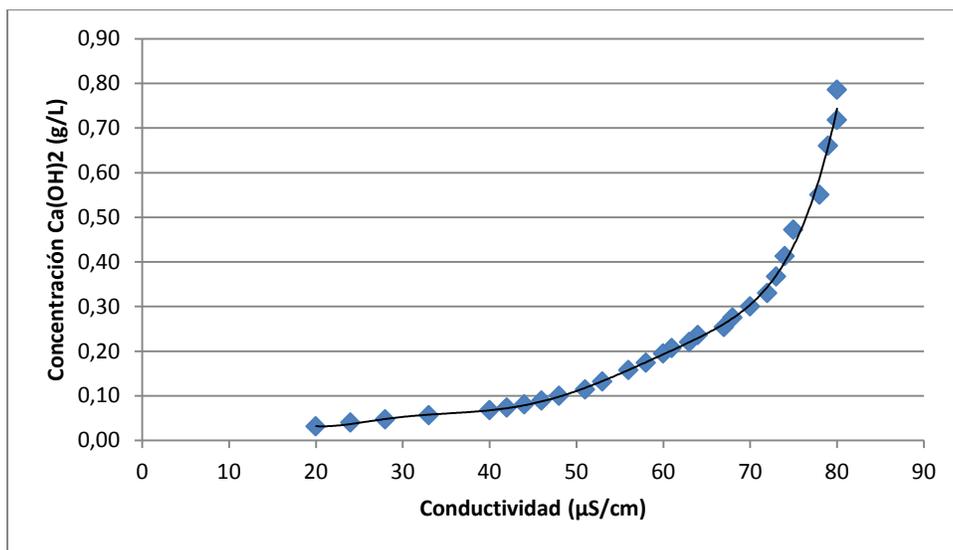


Figura 40. Curva de calibración, concentración Ca(OH)_2 (g/L) Vs conductividad ($\mu\text{S/cm}$).

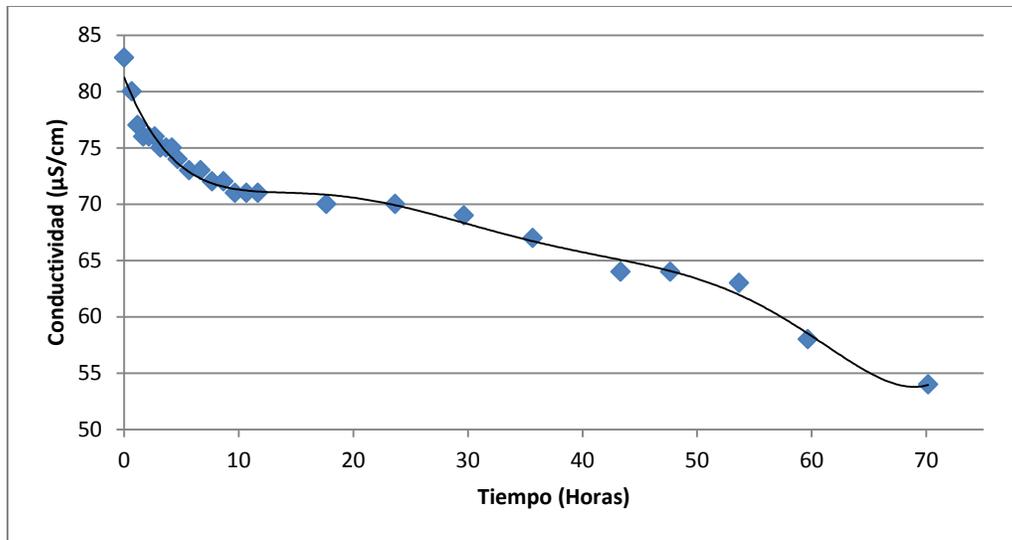


Figura 41. Curva de Conductividad ($\mu\text{S/cm}$) Vs tiempo de reacción.

Mediante la correlación con la curva base, Fig. 40, se puede verificar que a mayor conductividad mayor es la concentración de Ca(OH)_2 , y viceversa, por lo tanto se observa que incluso hasta las setenta horas posteriores al inicio de las mediciones la ceniza, ésta continua reaccionando con el Ca(OH)_2 , permitiendo la formación del gel hidratado de calcio (C-S-H).

Con base en los resultados obtenidos de las Fig. 40 y 41, es posible afirmar que la reactividad de la ceniza de la hoja de bambú analizada es muy buena, presentando una mayor actividad puzolánica durante las primeras diez horas posteriores al inicio de la reacción.

12. Índice de actividad de resistencia

Posterior a la caracterización química de la ceniza de las hojas de bambú es bien importante determinar si el material, además de tener un alto contenido de Sílice, se comporta adecuadamente al interior de una mezcla de mortero y/o concreto, 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.

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 hojas de bambú.

La elaboración de los cubos de mortero se realizó con base en la NTC 220, elaborando 6 cubos de mortero para la mezcla de control y 6 cubos para la mezcla con ceniza de hojas de bambú. De los seis cubos de cada mezcla tres se fallaron a 7 días y los tres restantes se fallaron a 28 días.

La cantidad de materiales utilizados para la elaboración de los especímenes se muestra a continuación:

✓ **Mezcla de control**

- Arena Normalizada de Ottawa: Para la elaboración de 6 cubos de mortero se usaron 1375 g.
- Cemento Portland Tipo III (Estructural de Argos): Para la elaboración de los 6 cubos de mortero se usaron 500 g.
- Agua potable: La relación agua – material cementante (A/C) fue de 0,484, por lo tanto se adicionaron 242 ml de agua.

✓ **Mezcla de ensayo**

- Arena Normalizada de Ottawa: Para la elaboración de 6 cubos de mortero se usaron 1375 g.
- Cemento Portland Tipo III (Estructural de Argos): Para la elaboración de los 6 cubos de mortero se usaron 400 g.
- Ceniza de Hojas de Bambú: Se usaron 100 g de ceniza.
- Agua potable: La cantidad de agua necesaria en mililitros para lograr una fluidez de $\pm 5,00\%$ con respecto a la mezcla de control. Logrado con una relación A/C de 0,57.

✓ **Procedimiento de preparación de la mezcla**

- Al recipiente con el cemento se le adiciona el agua de amasado.
- Se lleva a la mezcladora eléctrica en velocidad 1 (Lenta) durante 30 segundos.
- Al cumplirse los 30 segundos en velocidad 1 y sin apagar la mezcladora se le adiciona la arena normalizada durante 30 segundos.
- Se apaga la mezcladora, se sube a velocidad 2 (Media) y se deja durante 60 segundos.
- Se apaga la mezcladora y se deja en reposo el mortero durante 90 segundos, protegiendo la mezcla con un trapo húmedo para evitar que pierda su humedad.

- Finalmente se descubre la mezcla y se mezcla en velocidad 2 (Media) durante otros 30 segundos.

Posterior a la preparación de la mezcla se realizó la evaluación de la fluidez de la mezcla de control. Para la medición de la fluidez de las mezclas se usó una mesa de flujo, véase la Fig. 42.



Figura 42. Mesa de flujo.

✓ **Fluidez del mortero**

El diámetro inferior del cono para la medida de fluidez es de 10,16 cm, véase Fig. 43. Al cono se le adiciona la mezcla en tres capas, distribuyendo 25 golpes para 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 durante los 25 golpes, es así como el porcentaje que resulta entre el diámetro inicial y el final, logrado posterior a los 25 golpes en la mesa de flujo, determina el porcentaje de fluidez de la mezcla.

La fluidez de la mezcla de reemplazo con ceniza de hojas de bambú debe estar $\pm 5,00\%$ con respecto a la mezcla de control, por lo tanto al lograrse este valor se encuentra la relación A/C de la mezcla con ceniza. Para la mezcla de control se logró entonces una fluidez del 84,00%, mientras que para la mezcla con reemplazo de ceniza se obtuvo el 79,00%.



Figura 43. Cono de la mesa de flujo.

✓ **Elaboración de los cubos**

Posterior a la medición de la fluidez, habiendo logrado el porcentaje dentro del rango esperado para la fluidez de la mezcla con ceniza, respecto a la mezcla de control, se llevaron ambas mezclas en los moldes metálicos para la elaboración de los cubos, véase Fig. 44.

✓ **Almacenamiento de los especímenes**

Los especímenes se almacenaron en un cuarto húmedo a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 20 a 24 horas, posteriormente se retiraron de los moldes para almacenarlos en agua saturada de cal, tal como lo especifica la NTC 220, hasta el día en el que fueron retirados para su falla.

✓ **Fallo de los especímenes**

La falla de los cubos para determinar su resistencia a la compresión se realizó con base en la NTC 220, fallando 3 especímenes de la mezcla de control y 3 especímenes de la mezcla de ensayo a edades de 7 días y 28 días.

Los resultados obtenidos para los cubos fallados a los 7 y 28 días se muestran en la Tabla 27 y en la Fig. 45.



Figura 44. Elaboración de los cubos de mortero, en la parte superior de la fotografía se observan los cubos de la mezcla de control y en la parte inferior de la fotografía los cubos de la mezcla de ensayo.

Tabla 27. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para los cubos de mortero, mezcla de control y mezcla de ensayo.

Resistencias de morteros usando cubos de 50,8mm NTC 220								
Mezcla de Control					Mezcla de Ensayo			
Edad (Días)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Carga (KN)	f'c (MPa)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Carga (KN)	F'c (MPa)
7	286	2,18	96,80	37,51	272,00	2,07	98,98	38,35
7	286	2,18	102,80	39,84	272,00	2,07	99,30	38,48
7	286	2,18	97,90	37,94	272,00	2,07	97,10	37,63
Promedio:				38,43	Promedio:			38,15
28	286	2,18	106,10	41,11	272,00	2,07	100,20	38,83
28	284	2,17	105,50	40,88	272,00	2,07	105,40	40,84
28	286	2,18	110,90	42,97	272,00	2,07	103,70	40,18
Promedio:				41,66	Promedio:			39,95

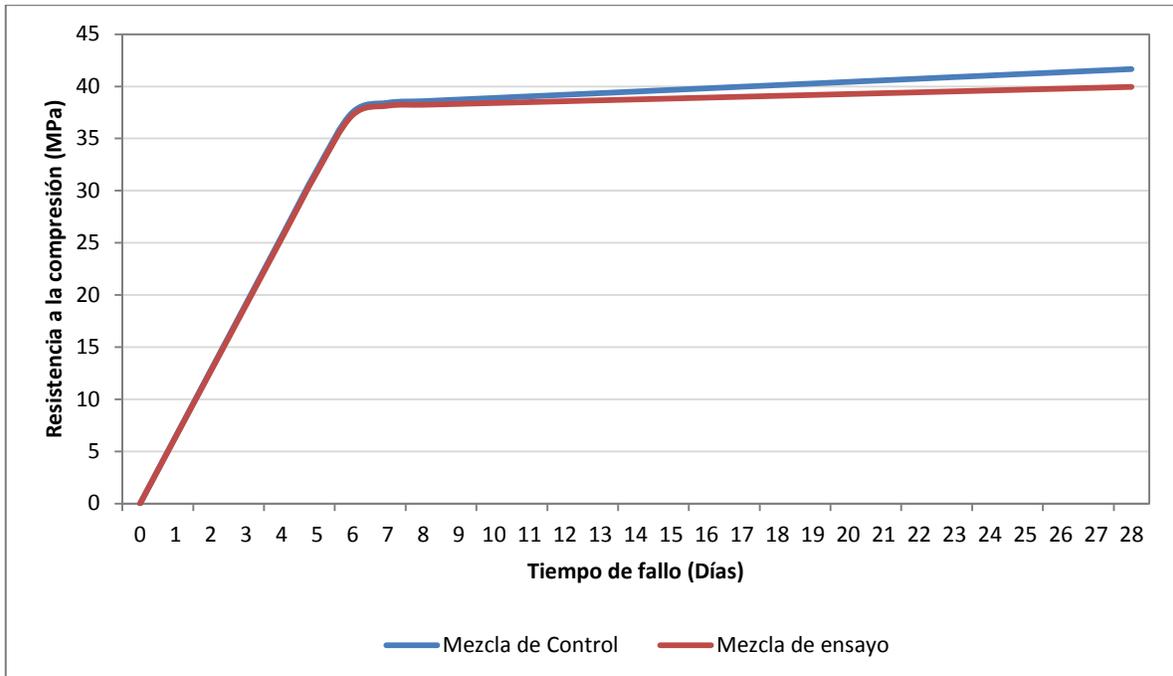


Figura 45. Resultados de la resistencia a la compresión promedio de los cubos de mortero a 7 y 28 días.

La resistencia a la compresión de los cubos fallados a los 7 días y los fallados a los 28 no difieren mucho, el incremento de resistencia tanto en los cubos de la mezcla de control como en la mezcla de ensayo presentaron un comportamiento muy similar, logrando un desarrollo de la resistencia a los 7 días de un 92,25% para la mezcla de control y de 95,49% para la mezcla de ensayo, considerando el valor de resistencia a los 28 días como el 100,00%.

De la Tabla 28, se puede observar que el índice de actividad puzolánica de la mezcla de ensayo (mezcla con reemplazo) es de 99,25% para los cubos fallados a los 7 días, y de 95,91% para los cubos fallados a 28 días, verificando nuevamente que la principal reactividad puzolánica se presenta en las primeras horas de inicio de la reacción, haciéndose más lenta con el tiempo, pero sin detenerse.

Tabla 28. Resultados finales de la prueba de índice de actividad de resistencia para los cubos de mortero, mezcla de control y mezcla de ensayo.

Muestreo y ensayos de cenizas volantes o puzolanas naturales para uso como aditivo mineral en el concreto NTC 3823				
ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA				
Ensayos	Mezcla de control		Mezcla de ensayo	
Requerimiento de agua [ml]	242,50		285,00	
Fluidez [%]	84,00		79,00	
Edad de Falla [días]	7,00	28,00	7,00	28,00
Resistencias [MPa]	38,43	41,66	38,15	39,95
I.A.P [%]			99,25	95,91
OBSERVACIONES:	El satisfacer el índice de actividad a 7 ó 28 días indica que se cumple con la norma (NTC 3493)			

13. Análisis de resultados

La falla a la compresión de los cubos a 7 días arroja como resultado que los cubos de mortero con reemplazo de cemento con ceniza logran un 98,00% de la resistencia alcanzada por los cubos de mortero de la mezcla de control. Este porcentaje es muy alto si se compara con lo especificado por la NTC 220, en donde se pide que deban alcanzar al menos el 70,00% de la resistencia de los cubos de la mezcla de control. Sin embargo, el comportamiento de la mezcla en los cubos de mortero con reemplazo de ceniza a los 28 días no superó la alcanzada por los cubos elaborados con la mezcla de control, llegando a un 97,00% de la resistencia alcanzada por los cubos de la mezcla de control.

Lo anterior permite identificar que la ceniza de la hoja de bambú tal como se observa en el análisis de reactividad por medio de la solución saturada de hidróxido de calcio, logra una alta reactividad puzolánica durante las primeras 50 horas posterior al inicio de la reacción, y que a largo plazo esta reactividad no presenta un incremento, por lo que se puede decir que es de reactividad temprana y puede ser usada como material de remplazo para el cemento.

Tal como se observa en la Fig. 46, la apariencia de los morteros es bien diferente, el cubo del lado izquierdo de la figura presenta un color más claro que el de la derecha, y se puede ver que la porosidad es mucho menor en este que en el cubo del lado derecho de la figura.



Figura 46. Aspecto de un cubo de mortero elaborado con ceniza de hoja de bambú (Cubo a la izquierda de la figura) versus un cubo de mortero elaborado con cemento Portland estructural (Cubo a la derecha de la figura).

Dados los resultados a la compresión obtenidos del fallo de los cubos de mortero mostrados en la Tabla 27, es posible determinar que, a pesar de existir una diferencia visual en el grado de porosidad de las muestras, no se presenta un mejor comportamiento mecánico de los cubos con remplazo de ceniza con respecto a los de la mezcla de control; de la misma manera no se obtiene una gran diferencia en cuanto a la densidad de la mezcla de ensayo, ya que los cubos con remplazo de ceniza lograron tan solo el 95,00% de la densidad con respecto a la mezcla de control.

Es bien importante destacar que la preparación de la mezcla con remplazo de cemento por ceniza se logró con una relación A/C de 0,57; comparado con una relación A/C de la mezcla de control de 0,484. Lo anterior permite identificar que a pesar que la mezcla con remplazo fue preparada con una relación agua / material cementante mayor que la mezcla de control, se lograron resultados a la compresión para los cubos a los 7 y 28 días muy similares en ambos casos.

La fluidez evaluada para la mezcla de control y la mezcla con remplazo, fue de 84,00% y 79,00% respectivamente, lo cual indica que la manejabilidad de la mezcla con remplazo de ceniza es un poco más compleja. Sin embargo, esto podría mejorarse con la adición de superplastificantes, permitiendo una mejor manejabilidad y una reducción en la relación agua / material cementante, reflejándose en mayores resistencias a la compresión para los cubos con remplazo con respecto a los de la mezcla de control.

Sin embargo lo anterior es un hecho no comprobado, por lo tanto se deja como una segunda etapa del proyecto el verificar el comportamiento de la mezcla con remplazo de ceniza de hojas de bambú usando superplastificantes de última generación para la elaboración de la mezcla.

6. Conclusiones y recomendaciones generales

El objetivo principal del presente proyecto era determinar el proceso más adecuado para la obtención de la ceniza de la hoja de bambú, su caracterización química y física a través de análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX), espectrofotometría de barrido electrónico (SEM), entre otros, para la evaluación final como material de reemplazo o de adición, en la preparación de mezclas de mortero y/o concreto de alta resistencia.

La identificación del procesamiento del material fue experimental, inicialmente se planteó un proceso, el cual no fue exitoso, obteniendo una ceniza de color negro con alto contenido de inquemados de aproximadamente un 52,80%, lo cual se alejó muchísimo del límite máximo permitido del 6,00%, especificado por la ASTM C618.

De este primer acercamiento al procesamiento de las hojas de bambú para la elaboración de la ceniza se generó un valioso aprendizaje, logrando la identificación de algunos puntos críticos como el corte, la prequema y la disposición del material al interior del horno para la quema final. Habiendo corregido estos pasos se logró entonces un material con una cantidad de inquemados del 6,97%, y con una suma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ de 82,07%, superior al valor de 70,00% para cenizas tipo F, y al 50,00% para cenizas tipo C, tal como lo determina la ASTM C618.

Con base en los resultados anteriores se pudo inferir que la ceniza de las hojas de bambú podrían estar catalogadas como material puzolánico, continuando así con la metodología propuesta, realizando pruebas de reactividad puzolánica en una solución saturada de hidróxido de calcio, de donde se identificó que la ceniza presentaba una alta reacción con el hidróxido de calcio durante las primeras diez horas de reacción, sin embargo ésta nunca se detuvo e incluso a las setenta horas todavía seguía reaccionando pero en menor medida.

Lo anterior dio la pauta para la evaluación final de ceniza, realizando un análisis de distribución de tamaño de partícula para identificar el tamaño del material obtenido en el procesamiento y un análisis mediante microscopía electrónica de barrido para comprobar el tamaño de las partículas y su apariencia. De estos se pudo identificar que existe un rango muy amplio para el tamaño de las partículas de la ceniza, encontrando tamaños desde aproximadamente 1 micrómetro hasta 90 micrómetros.

Del análisis de distribución de tamaño de partícula también se encontró que la densidad de la ceniza es de $2,65 \text{ g/cm}^3$, con un área superficial de partícula de $0,3137 \text{ m}^2/\text{g}$, lo cual, si se compara con la densidad de la partícula del cemento Portland de aproximadamente $3,00 \text{ g/cm}^3$ y área superficial de $0,327 \text{ m}^2/\text{g}$, se puede decir que la ceniza es un material más liviano que el cemento y con un área superficial aproximadamente igual a la del cemento Portland. Esto permite concluir que las mezclas realizadas sólo con cemento Portland son ligeramente más densas que una con un

reemplazo importante con ceniza de hojas de bambú. Los cubos de mortero elaborados con remplazo de ceniza de hojas de bambú lograron una densidad del 95% con respecto a los elaborados solamente con el cemento Portland estructural.

La evaluación final de la ceniza se hizo entonces mediante la elaboración de dos mezclas de mortero, con base en la NTC 220. La primera se llamó mezcla de control, la cual contenía cemento Portland tipo III, y la segunda llamada mezcla de ensayo con un reemplazo de un 20,00% de cemento en peso por ceniza de hojas de bambú. De ambas mezclas se elaboraron seis cubos de mortero, fallando tres de cada mezcla a 7 y 28 días. De este ensayo físico se encontró que la resistencia promedio de la mezcla de control a los 7 y 28 días fue de 38,43 MPa y 41,66 MPa respectivamente; mientras que para la mezcla de ensayo se encontró 38,15 MPa para el ensayo a los 7 días y 39,95 MPa para el fallo de los cubos a los 28 días.

El índice de actividad puzolánica de la mezcla con reemplazo de ceniza de hojas de bambú fue de 99,26% para la mezcla ensayada a los 7 días, y de 95,91% para la mezcla ensayada a los 28 días. Esto demuestra que la mezcla con reemplazo con ceniza presenta un alto índice de actividad puzolánica, presentando a este material como una interesante propuesta para el uso en la industria del cemento.

La ceniza de hojas de bambú se presenta como un material con alto contenido de Sílice, es así que mediante el análisis con FRX se logró encontrar concentraciones de 75,85% para este caso, y del resto de los óxidos en bajas concentraciones. Finalmente, la suma de todos estos componentes hacen que la ceniza de hojas de bambú sea un material altamente reactivo; por lo tanto puede ser considerado como una puzolana natural, de acuerdo con lo visto en el presente informe y con base en lo especificado en el ASTM C618.

Es de resaltar entonces, que el uso de la ceniza de las hojas de bambú como material de remplazo del cemento Portland en las mezclas de mortero, permitirían obtener mezclas con una mayor resistencia a los 28 días, mejorando la elaboración de las mismas con el uso de superplastificantes, los cuales permiten una reducción de la relación agua – material cementante (A/C), incrementando así la resistencia a la compresión en morteros e incluso en concretos.

De los resultados obtenidos en este proyecto, es posible identificar diversas condiciones en el procesamiento y en la metodología de caracterización de este material, dentro de la cuales se pueden destacar las siguientes:

- El proceso de secado, prequema y quema controlada es indispensable para la correcta obtención de la ceniza; del buen manejo de esto depende en gran medida el lograr el porcentaje indicado de los minerales deseados.

- La quema de la ceniza en el horno eléctrico debe hacerse por pequeñas capas que garanticen una quema uniforme, reduciendo la probabilidad de obtener un alto contenido de inquemados.
- La calcinación controlada de hojas de bambú a 650° C durante 2 horas aproximadamente, representa las condiciones adecuadas para obtener un material con un alto porcentaje de partículas amorfas.
- El tamizado de la ceniza no es absolutamente necesario para realizar una buena caracterización química de la misma.
- Mediante el uso de microscopia electrónica de barrido (SEM) y análisis de distribución de tamaño de partículas (DTP), se logra la identificación del tamaño de las partículas, su geometría, apariencia, entre otras características.
- La actividad puzolánica de la ceniza caracterizada por medio del método de la conductividad eléctrica muestra una alta actividad en edades tempranas, siendo mayor durante las primeras 10 horas y continuando la reacción incluso hasta después de las primeras 70 horas.
- La ceniza de la hoja de bambú es un buen material puzolánico que reacciona con el hidróxido de calcio formando silicato de calcio hidratado, el cual es el responsable de la resistencia de los morteros y concretos.
- La apariencia del mortero con ceniza de hojas de bambú es diferente a la del mortero con cemento Portland: para el primero se logra un color gris claro, mientras que para el segundo es un color gris oscuro; por lo tanto, deberá estudiarse en detalle la influencia de diferentes porcentajes de adición en las mezclas, versus el cambio de tonalidad en el color de la misma.
- El remplazo del cemento Portland por ceniza de hojas de bambú en la elaboración de morteros requiere una mayor relación agua / material cementante, para lograr una manejabilidad de la mezcla similar a la del mortero sin remplazo.

El resultado obtenido con la mezcla de mortero puede no suministrar una buena correlación de cómo contribuye la ceniza de las hojas de bambú en la resistencia del concreto. Para verificar esto se debe realizar un diseño de mezcla de concreto con el uso de la ceniza de las hojas de bambú como material de remplazo o adición del cemento Portland.

El análisis de la ceniza de la hoja de bambú bajo diferentes condiciones de adición, temperatura, humedad, reactividad álcali, entre otros, debe ser realizado de manera que se obtenga una caracterización completa del material.

Se recomienda que, para la elaboración de las mezclas de mortero o concreto con la adición o remplazo con ceniza de hojas de bambú, se use un aditivo superplastificante para ayudar a reducir la relación agua / material cementante, para mejorar la manejabilidad de la mezcla e incrementar la resistencia a la compresión.

Otros estudios futuros son:

- Diseño de mezclas de concreto con adición y remplazo del cemento Portland por ceniza de hojas de bambú.
- El análisis de la interacción suelo-ceniza para la estabilización de suelos lateríticos en la construcción de carreteras, evaluando índices de plasticidad, CBR, fuerza de cizalladura, entre otros.
- Evaluación del efecto de la temperatura en el incremento o no de la reactividad puzolánica.
- Efectividad del aditivo mineral en el control de las reacciones álcali-sílice.
- Los estudios futuros deben incluir el análisis de la influencia de la temperatura de calcinación en la actividad puzolánica de estos residuos agrícolas, pérdida al fuego, contenido de humedad, requerimiento de agua, estabilidad volumétrica, entre otros.
- Con base en la información obtenida es posible realizar bajo el modelo cinético-difusivo, la descripción de la cinética de reacción puzolánica en el sistema CH / Blash, debiendo para esto determinar inicialmente el coeficiente de cinética (constantes de velocidad de reacción y la energía libre de activación). Las constantes de velocidad de reacción, conjuntamente con la energía libre de activación pueden dar un índice exacto de la reactividad o actividad puzolánica de los materiales. Este método se plantea como una alternativa para una segunda etapa del proyecto.

7. Referencias bibliográficas

AASHTO M 295-11. (2011), "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Standard published 2011 by American Association of State and Highway Transportation Officials.

AASHTO M 302-13. (2013), "Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars (ASTM C 989-10)". Standard published 2013 by American Association of State and Highway Transportation Officials.

Abrams, D. (1925), "Effect of Hydrated Lime and Other Powdered Admixtures in Concrete". Proceedings of the American Society for Testing Materials, Vol. 20, Part 2, 1920. Reprinted with revisions as Bulletin 8, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, 78 páginas. Disponible a través de la PCA como LS08.

ACI 211.1-91. (2009), "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete". Standard published 01/01/1991 by American Concrete Institute.

ACI Committee 232. (1996), "Use of Fly Ash in Concrete", ACI 232.2R-96, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 34 páginas.

ACI-323. (1995), "State - of -the -Art Report on Polymer - Modified Concrete: ACI 548.3R – 95".

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

Aitcin, P.-C, Sarkar SL, Yaya D. (1987), "Microstructural study of different types of very high strength concrete". Proceedings of the MRS symposium. Pittsburgh (PA): Materials Research Society.

Aitcin, P.-C. (1983), "Condensed Silica Fume", ISBN 2-7622-0016-4, 52 pp. Sherbrooke, Québec, Canada: Editions de L'Université de Sherbrooke.

Aitcin, P.-C. (1986), "New High tech, ready mix concretes. Engineering Digest", 32(10), November, 32-3.

Aitcin, P.-C. (2007), "High Performance Concrete Demystified". Québec, Canada: Taylor & Francis.

Aitcin, P.-C.; Laplante, P.; Bedard, C. (1985), "Development and experimental use of a 90 MPa field concrete". ACI SP-87, High Strength Concrete, Editor H.G.Russell, pp. 51-70.

ASTM C1073-12. (2012), "Standard Test Method for Hydraulic Activity of Slag Cement by Reaction with Alkali". Standard published 07/15/2012 by ASTM International.

ASTM C109/C109M. (2012), "Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)". Standard published 12/15/2012 by ASTM International.

ASTM C114 11b. (2013), "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement"
ASTM C1240. (2012), "Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures". Standard published 08/01/2012 by ASTM International.

ASTM C150/C150M – 12. (2001), "Especificación Normalizada para Cemento Portland"
ASTM C191-08. (2008), "Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle". Standard published 06/01/2008 by ASTM International.

ASTM C192/C192M-13. (2013), "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory". Standard published 08/01/2013 by ASTM International.

ASTM C266-08e1. (2008), "Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles". Standard published 06/01/2008 by ASTM International.

ASTM C33. (2003), "Standard Specification for Concrete Aggregates". Standard published 01/01/2013 by ASTM International.

ASTM C39/C39M-12a. (2012), "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens". Standard published 09/01/2012 by ASTM International.

ASTM C618. (2005), "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete".

ASTM C989 / C989M - 12a. (2012), "Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars". Standard published 07/15/2012 by ASTM International.

Bache, H. (1981), "Densified Cement / Ultra Fine Particled-Based Materials, Second International Conference on Superplasticizer in Concrete", Ottawa, pp.1-35. Ottawa.

Bambusetum. (2012), (<http://www.bambusetum.com/bambu.html>, revisado el 20 de abril de 2012).

Barger, G; Lukkarila, M; Martin, D.; Lane, S; Hansen, E; Ross, M; y Thompson, J. (1997), "Evaluation of a Blended Cement and a Mineral Admixture Containing Calcined Clay Natural Pozzolan for High-Performance Concrete". Proceedings of the Sixth International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
Bernhardt, C. (1952), "SiO₂ - Dust as admixture to cement". Betogen, Idag, pp. 29-53.

Bhatty, M; Greening, N. (1986), "Some Long Time Studies of Blended Cements with Emphasis on Alkali- Aggregate Reaction". 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction.

Burg, R, y Ost, B. (1994), "Engineering Properties of Commercially Available High-Strength Concretes – Including Three-Year Data". Research and Development Bulletin RD104, Portland Cement Association.

Carrasquillo, P. (1987), "Durability of concrete containing fly ash for use in highway applications". ACI SP-100, Concrete Durability, Editor: J.M. Scanlon, pp. 843-861.

Carrasquillo, R.; SLATE, F.; NILSON, A. (1981), "Properties of high strength concrete subject to short term loading". ACI Journal, May-June 1981, pp. 179-186.

Cerna, J. (2004), "Seminario Composición Química del Cemento". U. NAL de Cajamarca, Facultad de Ingeniería.

Detwiler, G. (1991), "High strenght silica fume concrete". Chicago Style. Concrete International.
Detwiler, R.; Bhatty, J.; y Bhattacharja, S. (1996), "Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements". Research and Development Bulletin RD112, Portland Cement Association, 108 páginas.

Detwiler, Rachel J. (2000), "Controlling the Strength Gain of Fly Ash Concrete at Low Temperature". Concrete Technology Today, CT003, Portland Cement Association, pág. 3 a 5.

Fatitis A.; Shah, S.P. (1985), "Lateral reinforcement for high strength concrete columns". ACI. SP-87, High Strength Concrete, Editor: H.G. Russell, pp. 213-232.

Freedman, S. (1971), "High Strenght Concrete". IS1 76-OIT, Portland Cement Association, Skokie, IL, 19 pp.

Frías, M; Villar, E; Sánchez, de R; Valencia, M. (2005), "The effect that different pozzolanic activity methods has on the kinetic constants of the pozzolanic reaction in sugar cane straw clay ash/lime system".

Gálligo, E. (1990), "Hormigón de alta resistencia, estado actual de conocimientos". Editor: CEEOP, pp. 09 – 143.

Gebler, S, y Klieger, P. (1983), "Effect of Fly Ash on the Air-Void Stability of Concrete". Research and Development Bulletin RD085, Portland Cement Association.

Gebler, S., y Klieger, P (1986), "Effect of Fly Ash on Some of the Physical Properties of Concrete". Research and Development Bulletin RD089, Portland Cement Association.

Gómez, G. (2006), "Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos". Mineralogía de la Fracción Arcilla (6 edición). Colombia: IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi).

González, M. (2008), "Especial para el tiempo.com/verde". Publicación el tiempo.com, Sección Medio ambiente, Fecha de publicación, 18 de octubre de 2008.

Hassan, H.F.; Orami, S.K. Al-; Taha, R. (2006), "The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical properties of high-strength concrete". Construction and Building Materials.

Hattori, K. (1981), "Experiences with Mighty Superplasticizer in Japan". ACI SP-62, pp.37-66.

Helland, S. (1986), "Silica fume in high strength concrete". Nordisk Betong, pp. 91-95.

Helmuth, R. (1987), "Fly Ash in Cement and Concrete". SP040T, Portland Cement Association.

Hollan, T.C.; Luther, M.D. (1987), "Improving Concrete Quality with silica fume". ACI SP-104, International Symposium on Concrete and Concrete Construction, Editor: Tuthill L.H. & Grant T. Halvorsen, pp. 107-122.

Hui-sheng Shi, L. (2009), "Characteristics of municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash-cement matrices and effect of mineral admixtures on composite system". Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Education Ministry, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai, China.

Ibáñez Asensio, Sara. (2011), "Tectosilicatos". Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Valencia.

ICA. (2000), "Curso - Taller de Concreto", (pág. 32). Ciudad de México.

ICCYC. (2009), "Uso Racional de los Agregados para Concreto". Boletín N°1. Costa Rica.

Lange, David A. (1994), "Long-Term Strength Development of Concrete". RP326, Portland cement Association.

Malhotra, V. M. (1996), "Pozzolanic and Cementitious Materials". Gordon and Breach Publishers, Amsterdam, 208 páginas.

Malhotra, V.M.; Carrette, G.G. (1983), "Silica fume concrete: properties, applications and limitations". Concrete International, pp. 40-46.

Mehta, PK. (1986), "Concrete: structure, properties and materials". Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall.

Memorias: "III Seminario Nacional de Minería", CFIA, 4 y 5 de octubre del 2007.

Métodos de difracción de rayos X. (2012). Curso de cristalografía. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Facultad de Ciencias. Consultado el 1 de abril de 2012.

Moreno, J. (1987), "High Strength Concrete in Chicago high rise buildings, in Concrete Structures for the future, Proceedings of IABASE Symposium". Versailles, Paris, IABASE-AIPC-IVBH, Zurich, ISBN 3-85748-053-1, pp. 407-12. Versailles, Paris.

Moreno, J. (1990), "225 W Walken Drive". Concrete International, pp. 35-39.

Nieto. (1985), "El Bambú, estudio del Mercado Mundial". Volumen I.

Nilson, A. (1985), "Design implications of current research". ACI SP-87, High Strength Concrete, Editor: H.G.Russell, 1985, pp.85-118.

NSR-10. (2010), "Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente". Capitulo C, pp. 124-125.

NTC-1513. (1994), "Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para la elaboración, curado acelerado y ensayo a compresión de especímenes de concreto". Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

NTC-174. (2000), "Concretos - Especificaciones de los agregados para concreto". Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

NTC-220. (2004), "Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado". Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

NTC-3459. (2001), "Concretos - agua para la elaboración de concreto". Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

NTC-3823. (1997), "Ingeniería civil y arquitectura. muestreo y ensayo de cenizas volantes o puzolanas naturales para uso como aditivo mineral en el concreto de cemento Portland". Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

NTC-4367. (1999), "Ingeniería civil y arquitectura. concretos. especificaciones para el uso de microsílca como adición en mortero y concreto de cemento hidráulico". Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

PCA (2000), "Survey of Mineral Admixtures and Blended Cements in Ready Mixed Concrete" Portland Cement Association.

Powers, T. (1968), "The properties of Fresh Concrete". John Wiley and Sons, Inc. New York.

Ronnenberg, H. a. (1990), "High strength concrete for North Sea platforms". Concrete International, 12(1), pp. 29-34.

Salas, E. (2006), "Tesis Doctoral, Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia". Páginas 1 a 48, Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Construcciones y Arquitectura, Editorial Universitat Politècnica de Catalunya.

Salazar, A. (2002), "Síntesis de la tecnología del concreto, una manera de entender a los materiales compuestos". 3° edición, Corporación Construir, Cali, Colombia.

Scurlock et al. (2000), "Bamboo: an overlooked biomass resource?"

Singh, Dasa SS, Singh NP, Dwivedi VN (2007). "Hydration of bamboo leaf ash blended Portland cement". Ind J Eng Mater Sci; 14 (1): 69-76.

Tazawa, B.E.; Yonekura, A. (1986), "Drying Shrinkage and creep of concrete with condensed silica fume". ACI SP-91, International Conference on the use of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Editor: V.M. Malhotra, Madrid España, pp. 903-921.

Teneche, G. (2012), <http://www.guadabaybambu.es.tl/Estudio-6.htm>, revisado el 20 de abril de 2012.

Tucker, G. (1932), "Concrete and Hydraulic Cement, US patent 2, 141, 569". Application Wednesday 21 November, Serial N° 643,740. Patent granted in 1938. US.

Villar, E. (2010), "Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters".

Viñas, D. (2012), "Conceptos mineralógicos, génesis de los minerales, procesos supergénicos, metamorfismos, propiedades físicas, eléctricas y magnéticas".

Whiting, D. (1989), "Strength and Durability of Residential Concretes Containing Fly Ash". Research and Development Bulletin RD099, Portland Cement Association.

Yogendran, V.; Langan, B.W., Maque, M.N.; Ward, M.A. (1987), "Silica fume in high strength Concrete". ACI Materials Journal, pp. 124-129.