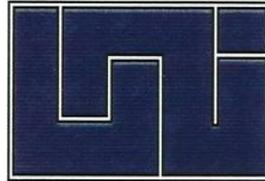


Mon
363.7285
G144
2013

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA



**INFLUENCIA DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR
PROVENIENTE DEL INGENIO MONTE ROSA SOBRE LAS PROPIEDADES
FISICO-MECANICAS Y DE DURABILIDAD DE MORTEROS DE CEMENTO
TIPO GU**

TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:

Juniet Rebeca Gaitán Arévalo

Belkiss Jessenia Tórrez Rivas

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

TUTOR:

MSc.Léster Javier Espinoza Pérez

ASESOR:

Dr. José Iván Escalante García

Managua, Nicaragua 2013

INDICE

OPINIÓN DEL CATEDRÁTICO GUÍA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
RESUMEN	iv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES	2
III. JUSTIFICACIÓN	4
IV. OBJETIVOS	5
4.1 Objetivo general	5
4.2 Objetivos específicos.....	5
V. MARCO TEÓRICO	6
5.1 Cemento para albañilería (mortero)	6
5.2 Cemento Pórtland.....	6
5.2.1 Composición química del cemento Pórtland	7
5.2.2 Composición de fases	7
5.2.3 Hidratación de los compuestos puros del cemento Pórtland	8
5.2.4 Clasificación del cemento Pórtland	10
5.2.5 Factores que afectan la velocidad de hidratación del cemento Pórtland	11
5.2.6 Factores que afectan la resistencia.....	12
5.3 Clasificación de los cementos	13
5.4 Materiales Puzolánicos.....	15
5.4.1 Tipos de puzolanas.....	16
5.4.2 Características de las cenizas de bagazo de caña de azúcar.....	17
5.4.3 Mecanismo de Hidratación del Cemento Pórtland sustituido con una puzolana	17
5.5 METODOS DE PRUEBA	18
5.5.1 Caracterización físico-química de la ceniza de bagazo de caña	18
5.5.2 Técnica de caracterización del agregado fino	20
5.5.3 Ensayo físico en mortero fresco.....	21
5.5.4 Ensayo físico-mecánico en mortero endurecido	23
5.5.5 Técnica de caracterización en pastas endurecidas	25
VI. METODOLOGIA	27
6.1 MATERIALES.....	27
6.1.1 Cenizas de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) proveniente del ingenio Monte Rosa.....	27
6.1.2 Cemento Pórtland (CP).....	30
6.1.3 Agregado fino	32
6.1.4 Agua de mezclado.....	33
6.2 MÉTODOS.....	34
6.2.1 Variables de estudio	34
6.2.2 Tiempo de fraguado	34
6.2.3 Arreglo Experimental.....	35
6.2.4 Elaboración de probetas cúbicas	36

6.2.5	Resistencia mecánica a la compresión (RMC)	37
6.2.6	Prueba de durabilidad	37
6.2.7	Preparación de pastas, y caracterización correspondiente en CINVESTAV Unidad Saltillo, México.....	37
VII.	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	40
7.1	Resultados de tiempo de fraguado	40
7.2	Resultados de resistencia a compresión de morteros 100% CP	41
7.3	Resultados de resistencia mecánica a la compresión de morteros CP/CBCA ...	41
7.4	Índice de actividad puzolánico (IAP).....	47
7.5	Resultados de resistencia a compresión de morteros are/CBCA sin tamizar.....	48
7.6	Resultados de las Pruebas de durabilidad	49
7.6.1	Resultados de durabilidad frente al ataque por ión sulfatos	49
7.6.2	Resultados de Resistencia al fuego	50
7.7	Resultados de RMC de probetas cúbicas en Cinvestav Ramos Arizpe.....	51
7.8	Resultados de Microscopia Electrónica de Barrido	53
7.9	Microanálisis EDS.....	61
7.10	Resultados de DRX	63
7.11	Resultados de análisis térmico	66
VIII.	CONCLUSIONES	69
IX.	RECOMENDACIONES.....	71
X.	NOMENCLATURA.....	72
XI.	BIBLIOGRAFÍA	74
XII.	ANEXOS	78

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	19
Ecuación 2.....	21
Ecuación 3.....	22
Ecuación 4.....	23
Ecuación 5.....	23
Ecuación 6.....	23
Ecuación 7.....	24

LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1.Composición química aproximada de los materiales alternativos empleados en construcción	7
Figura 2.Cambios en el contenido de Ca (OH) ₂ durante la hidratación del CPN-cemento Pórtland puzolánicos (Lea 1971).	18
Figura 3. Matraz normal de Le Chatelier.....	22
Figura 4. Patrón de DRX de las CBCA sin reaccionar	28
Figura 5. Fotomicrografías de las CBCA	29
Figura 6. CBCA sin reaccionar a) micrografía y b) espectro	29

Figura 7. Distribución de tamaños de partículas de las CBCA.....	30
Figura 8. Patrón de DRX de CP anhidro.....	31
Figura 9. Distribución de tamaños de partículas del CP.....	31
Figura 10. Granulometría de la arena	32
Figura 11. Impurezas orgánicas en la arena.....	33
Figura 12. Resultados de tiempo de fraguado inicial y final de las pastas con 15 y 45% CBCA y 100%CP	40
Figura 13. Resultados de la evolución de resistencia mecánica a la compresión con el tiempo.	42
Figura 14. Morteros de referencia 100% CP respecto a morteros de CP/CBCA.	43
Figura 15. Morteros CP/CBCA a 28 días respecto a morteros CP/CBCA a 56 días.....	44
Figura 16. Gráfica de superficie de respuesta para RMC de morteros CP/CBCA a 28 días	45
Figura 17. Contorno de RMC de morteros CP/CBCA a 28 días frente a relación a/c y CP/CBCA.....	46
Figura 18. Efectos principales relaciones S/N para valores de resistencia a 56 días.....	47
Figura 19. Aspecto físico de morteros expuestos a sulfatos por 28 días	50
Figura 20. Aspecto físico de los morteros después del tratamiento térmico a 900°C	51
Figura 21. Desarrollo de la resistencia a la compresión de pastas de CP-CBCA y Patrón	53
Figura 22. Microestructura de pastas de CP-CBCA a 7 días.....	54
Figura 23. Microestructura de pastas de CP-CBCA a 14 días.....	55
Figura 24. Pasta 85%CP-15%CBCA a 28 días: a) micrografía y b) espectros.....	57
Figura 25. Pasta 55%CP-45%CBCA a 28 días: a) micrografía y b) espectros.....	59
Figura 26. Sistema con 15% CBCA-85%CP a 28 días: a) micrografía y b) espectro de Ettringita	60
Figura 27. Sistema con 45% CBCA-55%CP a 28 días: a) micrografía y b) espectro de Ettringita	60
Figura 28. Situación en la cual puede ser obtenida una falsa impresión en la composición local.....	61
Figura 29. Diagrama ternario sistema 15%CBCA-85%CP	62
Figura 30. Diagrama ternario sistema 45% CBCA-55% CP	63
Figura 31. Patrones de DRX de pastas de CBCA-CP hidratadas, CP anhidro y CBCA ..	65
Figura 32. Termogramas de los sistemas S1D3, S1D28, S2D3, S2D28, CPD3.....	66
Figura 33. Patrón de DRX de pastas hidratadas de 100%CP y CP anhidro	85
Figura 34. Termograma del sistema S1D3 para la determinación de portlandita y calcita	90
Tabla 1. Rangos de composición de un cemento Pórtland	7
Tabla 2. Composición química de la ceniza del bagazo de caña de azúcar.....	17
Tabla 3. Composición química de las CBCA (% peso).....	27

Tabla 4. Composición química del CP (% peso)	30
Tabla 5. Propiedades físicas de la arena	32
Tabla 6. Tiempo de fraguado	35
Tabla 7. Arreglo ortogonal de Taguchi 3^3 para CP sustituido por CBCA	35
Tabla 8. Arreglo ortogonal de Taguchi 3^3 para arena sustituida por CBCA sin tamizar (CBCAst)	35
Tabla 9. Densidad de las mezclas puzolánicas	36
Tabla 10. Dosificaciones de estudio	38
Tabla 11. Resultados de demanda de agua para pastas de consistencia normal	40
Tabla 12. Resultados de resistencia a compresión de morteros 100% CP a 28 días	41
Tabla 13. Resultados de resistencia mecánica a la compresión de morteros de CP sustituido por CBCA tamizada	42
Tabla 14. Resultados obtenidos para dosificación óptima	47
Tabla 15. Resultados del Índice de actividad puzolánico de morteros a 28 días	48
Tabla 16. Resultados de resistencia mecánica a la compresión de morteros de 100% CP y arena sustituida por CBCA sin tamizar	48
Tabla 17. Resultados de resistencia a compresión de morteros con la fórmula óptima ...	49
Tabla 18. Resultados de RMC de probetas expuestas a sulfatos por 28 días	49
Tabla 19. Resultados de resistencia mecánica a la compresión de morteros después de ser expuestos a 900°C	50
Tabla 20. Nomenclatura de pastas CP-CBCA y Patrón	51
Tabla 21. Resultados de resistencia a la compresión de pastas de CP-CBCA y Patrón ...	52
Tabla 22. Concentraciones iniciales en % peso del $Ca(OH)_2$ y $CaCO_3$	68
Tabla 23. Composición en % en peso de Si, Al y Ca en base al 100% (Sistema 1)	86
Tabla 24. Composición en % en peso de Si, Al y Ca en base al 100% (Sistema 2)	89
Anexo 1. Análisis granulométrico	78
Anexo 2. Módulo de finura	78
Anexo 3. Proporcionamiento de mezclas de morteros CP/CBCA	79
Anexo 4. Preparación de solución de $MgSO_4$ al 5%	79
Anexo 5. Serie de tamices utilizados para análisis granulométrico del agregado fino.	80
Anexo 6. Aparato de Vicat para determinación del tiempo de fraguado y consistencia normal.	80
Anexo 7. Moldes utilizados para la elaboración de las probetas cúbicas	80
Anexo 8. Mezcladora marca Hobart, modelo A200	81
Anexo 9. Máquina de ensayos mecánicos marca SOILTEST	81
Anexo 10. Mufla marca Barnstead Thermolyne	82
Anexo 11. Aparato Blaine para determinar la finura (cm^2/g) del CP y CBCA	82
Anexo 12. Molino planetario RetschPM 400	82
Anexo 13. Equipo para difracción laser para distribución de tamaño de partícula	83
Anexo 14. Horno de vacío VWR Model 1430-2	83

Anexo 15. Microscopio Electrónico de Barrido (Phillips, modelo XL-30 ESEM) para micrografías y análisis por EDS	83
Anexo 16. Prensa hidráulica marca D.A.V.I.S.A	84
Anexo 17. Dosificaciones de pastas de cemento Pórtland puzolánico y patrón (CINVESTAV, Unidad Saltillo).....	84
Anexo 18. Resultados de DRX para patrón	84
Anexo 19. Cálculo de la composición del cemento compuesto con CP-CBCA de reactivos y productos	86
Anexo 20. Cálculo de la concentración de portlandita y calcita en pastas de CP-CBCA y 100%CP por medio de análisis térmico de ATG	90

OPINIÓN DEL CATEDRÁTICO GUÍA

La valoración de residuos sólidos industriales constituye un importante campo de acción para la Ingeniería Química. Por su parte, la industria cementera a nivel mundial es causante del 5-8% del CO₂ emitido a la atmósfera, por descarbonatación de materias primas y uso de combustibles fósiles.

En la Investigación realizada por los Bachilleres Belkiss Jessenia Tórrez Rivas y Juniet Rebeca Gaitán Arévalo se presenta una alternativa de solución a dos problemas ambientales: La acumulación de residuos industriales en uno de los Ingenios Azucareros de Nicaragua, y la disminución de la cantidad emitida de gases causantes del efecto invernadero.

En el desarrollo del presente trabajo de tesis, los Bachilleres Gaitán y Tórrez implementaron muchos de los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Química, así como fue necesario la adquisición de nuevos conocimientos para realizar e interpretar los resultados obtenidos de técnicas avanzadas durante la estancia en CINVESTAV México.

Por lo anteriormente expuesto, puedo asegurar que los Bachilleres Gaitán y Tórrez reúnen en este trabajo todos los requisitos para optar al título de Ingeniero Químico.

Sin más a que referirme, les saludo

Atentamente:

MSc. Léster Javier Espinoza Pérez
Profesor Auxiliar
Departamento de Química
Facultad de Ingeniería Química
Universidad Nacional de Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios, por darnos la sabiduría, y llenarnos de fortaleza en todo momento.

A nuestros padres por brindarnos su apoyo durante todo el camino recorrido, que con mucho esfuerzo y cariño han hecho de nosotras personas de bien; regalándonos la mejor herencia, el estudio.

Al MSc. Léster Javier Espinoza Pérez, tutor de este trabajo por su gran disponibilidad, paciencia y esmero para atender a todas nuestras consultas; y por gestionar la estancia de investigación en CINVESTAV Unidad Saltillo, México.

Al MSc. Leonardo Antonio Chavarría Carrión decano de la Facultad de Ingeniería Química por el apoyo brindado en la gestión correspondiente a la movilización a México.

Al Dr. José Iván Escalante García, asesor de este trabajo por el apoyo brindado en las gestiones necesarias para que la estancia en México fuera posible.

Al MSc. Rolando Antonio Guevara Arróliga, por su apoyo, sus consejos y su gran disponibilidad durante todo el desarrollo de esta investigación.

A todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en el desarrollo y culminación de esta investigación.

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo principalmente a Dios, por darnos la oportunidad de llegar hasta esta etapa tan importante de nuestra vida.

A nuestros padres y hermanos por motivarnos a seguir adelante a pesar de las dificultades.

A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería Química que nos transmitieron sus conocimientos con empeño y dedicación.

RESUMEN

Con el fin de evaluar el efecto de la sustitución de cenizas de bagazo de caña de azúcar (CBCA) sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad de morteros de cemento tipo GU, se determinó la composición química de las (CBCA) por medio de la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX), obteniendo un contenido en SiO_2 de 62.33%. Se realizó un estudio mineralógico el cual mostró que las (CBCA) se comportan como un material puzolánico predominantemente amorfo, con un tamaño promedio de partícula de 36.32 μm superior al del cemento Pórtland (CP) de 13.84 μm determinado por difracción láser y un área superficial de 2552 cm^2/g determinado por medio del aparato Blaine.

Se evaluó la sustitución parcial de cemento Pórtland y arena tradicional por ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) tamizada y sin tamizar, sobre las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de morteros mediante ensayos de resistencia mecánica a compresión (RMC). Se seleccionaron proporciones de 15, 30 y 45% en peso para cemento sustituido por CBCA y 30, 60 y 90% en peso para arena Motastepe sustituida por CBCA. Se comprueba que, en la medida que se aumenta el % de sustitución de CBCA las propiedades mecánicas de los morteros disminuyen y la demanda de agua aumenta debido a una mayor cantidad de partículas a lubricar. Los morteros con arena sustituida por CBCA no lograron fraguar, por ello, no fue posible medir su RMC ni continuar su estudio.

Las CBCA han demostrado ser una efectiva puzolana para mejorar la resistencia en ambientes agresivos, debido a la menor cantidad de compuestos inestables en ambiente con sulfatos y la disminución del contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente en la mezcla. Por otra parte, las propiedades de los morteros sustituidos se ven sustancialmente modificadas por la exposición a altas temperaturas, debido a la aparición de micro y macrofisuras que afectan su estructura y valores de RMC muy pobres de menos de 2Mpa.

Como complemento al desarrollo de la investigación se evaluó el comportamiento de las propiedades mecánicas de pastas de CP sustituidas con 15 y 45% CBCA con una a/c de 0.5. Posteriormente se realizó su correspondiente caracterización avanzada.

Las microestructuras de las pastas hidratadas con CBCA y CP fueron observadas por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), en donde la alta porosidad de las CBCA fue notable. Se realizó microanálisis de los productos de reacción en las microestructuras mediante Espectroscopia por Dispersión de Energía (EDS) encontrándose altas concentraciones de Ca y Si que forman el compuesto semi-cristalino de silicato cálcico hidratado (CSH) identificado también por Difracción de Rayos X (DRX) y Análisis Termogravimétrico y Térmico Diferencial (ATG y ATD), donde además se encontraron las fases de Ettringita, Portlandita y Calcita.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar como material puzolánico ha sido objeto de investigación en ciertos países de Iberoamérica tales como: España, Cuba, Brasil, Colombia, dada la preocupación que existe por preservar el medio ambiente de la contaminación y la necesidad de controlar y manejar de forma más adecuada estos desechos. A partir de ello, se han estudiado las propiedades que presenta el cemento Pórtland una vez que ha sido reemplazado parcialmente por estas puzolanas, encontrando que su adición le confiere al cemento mejores propiedades mecánicas, mayor durabilidad y un menor calor de hidratación, entre otros beneficios.

Actualmente en Nicaragua, no se le da ningún uso a las cenizas provenientes de los ingenios azucareros, ni mucho menos se ha hecho ningún estudio, es por eso, que el presente trabajo tiene la finalidad de establecer por medio de técnicas experimentales el comportamiento, propiedades mecánicas y actividad puzolánica de las cenizas de bagazo de caña de azúcar para la elaboración de un cemento mezclado hidráulico. También se evaluarán los resultados de reemplazar arena tradicional (proveniente del cerro llamado Motastepe) por las cenizas en mezcla con el cemento Pórtland para mortero, debido que el uso de la arena demanda mucho a la naturaleza y no es un recurso inagotable.

Las cenizas de bagazo de caña de azúcar que se utilizan en esta investigación, son provenientes del ingenio Monte Rosa ubicado en la ciudad de Chinandega. El bagazo de la caña de azúcar se quema y es utilizado en las calderas como fuente de energía en el proceso de producción del azúcar, obteniendo de esto las cenizas.

II. ANTECEDENTES

Los cementos Pórtland modificados por la adición de puzolanas, fueron inicialmente empleados en obras donde se requería básicamente aumentar la resistencia del concreto al ataque de sulfatos, reducir el calor de hidratación a efecto de minimizar agrietamientos por cambios térmicos en masas de concreto, reducir la permeabilidad del concreto y eliminar, o bien, contrarrestar, la reactividad alcalina del cemento y agregados reactivos, como en el caso de puentes, presas y obras hidráulicas.

Investigaciones sobre la utilización de ceniza de bagazo de caña de azúcar para la elaboración de cementos puzolánicos, han permitido establecer un alto contenido de sílice en estos materiales.

En el año 2011, fue presentado en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Veracruzana de México, el trabajo de tesis “Evaluación mecánica de pastas de cemento modificadas con escoria de horno de arco eléctrico y ceniza de bagazo de caña de azúcar”, por Pablo Carmona Durán. En esta investigación se utilizaron dos materiales: ceniza de bagazo de caña de azúcar y escoria de soldadura de arco eléctrico como sustitutos parciales del cemento Pórtland, con el fin de reducir el costo del concreto hidráulico, así como de utilizar este tipo de materiales, los cuales son subproductos de procesos industriales.

En dicho estudio, tanto en las pastas de cemento-escoria, como en las que se constituían de cemento-ceniza, se obtuvieron resultados de tiempo de fraguado que van desde los 70 minutos con 5% de escoria de horno de arco eléctrico y 72 minutos en las que contenían un 5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar, hasta los 90 minutos tanto con el 15% de escoria como de ceniza.

Al momento de trabajar conjuntamente la escoria de horno de arco eléctrico con la ceniza de bagazo de caña de azúcar, se observó que los tiempos de fraguado se reducen, desde los 68 minutos con un contenido de 2.5% de escoria y 2.5% de ceniza hasta los 78 minutos en las pastas que contenían escoria y ceniza en un porcentaje de 7.5% respectivamente.

Así mismo fue presentado el trabajo de tesis: “Caracterización electroquímica de concretos modificados con CBCA (Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar)”, por Orlando Gonzales Martínez en Veracruz, México. Esta investigación tenía como objetivo medir la velocidad de corrosión de acero embebido en concretos binarios con ceniza de bagazo de caña de azúcar, sustituyendo el cemento en una proporción no mayor al 20% del peso total de CPC (Cemento Pórtland Compuesto), con el fin de disminuir la velocidad de corrosión en los aceros de concreto armado.

La mezcla 90% CPC-10%CBCA presentó las velocidades de corrosión menores a todas las mezclas binarias y obtuvo un mejor comportamiento completamente notable que la mezcla de control con el 100% de CPC.

El trabajo “Propiedades puzolánicas de desechos de la industria azucarera (primera parte)”, realizado en Villa Clara, Cuba se orientó a demostrar, de forma convincente, la formación de productos estables como resultado de la reacción de hidratación de pastas de cal-puzolana, usando CPC y CBC como puzolanas. Se pudo demostrar que la ceniza de bagazo en estudio puede ser clasificada como material probablemente puzolánico. Sin embargo, las altas temperaturas, y la combustión incompleta que ocurre en las calderas influyen negativamente en su reactividad, que, en algunos casos puede ser despreciable. En este trabajo, se propuso un tipo de incinerador especial, en el cual se producen cenizas de excelentes propiedades, con una proporción de material amorfo de un 35%, superior a la de las cenizas inalteradas (10-15%). Se demostró experimentalmente, que la temperatura en el horno no sobrepasa los 800°C, evitando la formación de material cristalino durante la combustión.

En la segunda parte de este trabajo se confirmó la formación de compuestos estables durante la reacción puzolánica cuando se emplean desechos de la industria azucarera como fuente de puzolana. Los principales compuestos formados son hidrosilicatos de calcio de forma compleja (C-S-H, sin denotar estequiometría).

Actualmente, en los ingenios azucareros de Nicaragua se acumula una gran cantidad de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA). De ahí la importancia de esta investigación, la cual está centrada en la sustitución parcial de cemento Pórtland por CBCA, en un 15, 30 y 45%. Además, esta investigación incluye la sustitución parcial de arena por CBCA, esto permitirá conocer la reactividad puzolánica de las cenizas, reducir costos de materia prima y mitigar el impacto ambiental que involucra la producción de cemento y la extracción de arena.

III. JUSTIFICACIÓN

La generación de residuos ha aumentado considerablemente en los últimos años, existiendo una clara correlación entre la riqueza de un país y su producción de residuos. Anualmente, se producen millones de toneladas de residuos sólidos en Nicaragua. Sin embargo, existe la posibilidad de incorporar estos residuos, sobre todo los industriales, en los procesos productivos de las industrias, ejemplo de ello es el caso del bagazo de la caña, utilizado por los ingenios azucareros en las calderas como combustible para la producción de vapor de alta presión para la producción de energía eléctrica, dando como resultado otro residuo: las cenizas. Esta investigación propone una alternativa de aprovechamiento de las CBCA como material de construcción con el propósito de beneficiar al medio ambiente, pues no se recurre al procesamiento térmico de materias primas que requieren alta demanda energética de combustibles que da como resultado altas emisiones de contaminantes en la producción del cemento. A la vez se disminuye la acumulación de desechos que genera la contaminación de suelos útiles para otras actividades. La utilización de CBCA puede beneficiar económicamente los costos de producción del cemento debido a que se requiere solo de tamizado para ser implementado, además se podría obtener cemento de igual o mejor calidad del cemento Pórtland aprovechando los desechos de CBCA.

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

- Evaluar el efecto que tiene la sustitución parcial de cemento Pórtland y de arena tradicional por ceniza de bagazo de caña de azúcar tamizada y sin tamizar, respectivamente, sobre las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de morteros.

4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la composición química de las CBCA por medio de la técnica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP).
- Determinar la actividad puzolánica de las CBCA mediante índice de actividad puzolánica.
- Determinar las propiedades físico-mecánicas de morteros de cemento sustituido por CBCA tamizada en 3 niveles de 15%, 30% y 45%, mediante ensayos de resistencia a compresión a 56 días.
- Determinar las propiedades físico-mecánicas de morteros de cemento tipo GU y arena tradicional sustituida por CBCA sin tamizar a 3 niveles de 30%, 60% y 90%, mediante ensayos de resistencia a compresión a 56 días.
- Comparar las propiedades físico-mecánicas de los morteros anteriores con morteros de referencia elaborados con 100% portland y 100% arena tradicional.
- Seleccionar las dosificaciones óptimas que cumplan con la resistencia mecánica a compresión establecida en la NTON 12-008-09 “Fabricación de Bloques de Concreto”.
- Someter las dosificaciones óptimas a ensayos de durabilidad frente al ataque por ión sulfato y ataque por fuego y evaluar su resistencia residual.
- Determinar el tiempo de fraguado para cada una de las mezclas obtenidas a diferentes niveles.

V. MARCO TEÓRICO

5.1 Cemento para albañilería (mortero)

Definición

Es el material finamente pulverizado que puede contener uno o más de los materiales siguientes: Clinker Pórtland: Cualquier tipo de cemento especificado en la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE, piedra caliza, arcilla, puzolana, escoria granulada de alto horno, ceniza volante y yeso. A criterio del productor puede incorporarse, además, como auxiliar de la molienda o para impartir determinadas propiedades al mortero, otros materiales en proporción tal que no sean nocivos para el comportamiento posterior del producto, de acuerdo con lo especificado en la NMX-C-133 SCFI. El Cemento para albañilería (mortero), al mezclarse con arena y agua, produce morteros con características especiales que son utilizados para el pegado de tabiques, enjarres, repellados, aplanados, trabajos decorativos, etc.

5.2 Cemento Pórtland

Definición

Según la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense NTON 12 006 – 03 Fabricación, uso y manejo del Cemento, el cemento Pórtland es un cemento hidráulico producido al pulverizar Clinker Pórtland, consistente básicamente de silicatos de calcio hidráulicos, y que usualmente contiene una o más formas de sulfato de calcio como adición de molienda.

La producción del cemento básicamente se trata de un proceso de calcinación de una mezcla adecuadamente proporcionada y homogénea de componentes arcillosos y calcáreos, seguidamente se agregan óxidos de aluminio y hierro con el objetivo de reducir las temperaturas de clinkerización. En esta etapa se obtiene el Clinker, al cual se le agrega una cierta cantidad de sulfato de calcio (yeso) 3-5% que permita controlar el tiempo de fraguado y la velocidad de ganancia de resistencia mecánica. Por último el producto obtenido se muele finamente para obtener cemento.

No obstante, este proceso productivo está regido por normas y estándares que cada industria dedicada a la producción del cemento debe cumplir. Estas normas y estándares surgieron a raíz de la creciente demanda de cemento, ya que se requerían materiales con mejores propiedades.

5.2.1 Composición química del cemento Pórtland

El CP está compuesto principalmente por CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ; estos representan aproximadamente el 95% del total de la composición. Además en menor proporción contiene Na_2O , K_2O , MgO , SO_3 , etc. En la Figura 1 se muestra la composición química aproximada de los materiales alternativos empleados en la construcción.

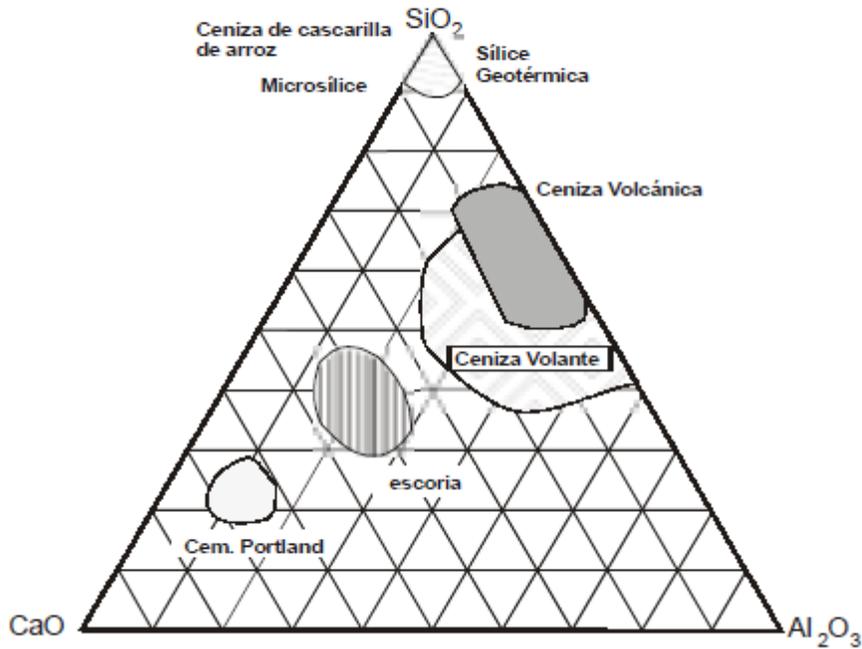


Figura 1. Composición química aproximada de los materiales alternativos empleados en construcción

5.2.2 Composición de fases

El cemento Pórtland presenta cuatro fases principales: alita (C_3S), belita ($\beta-C_2S$), aluminato tricálcico (C_3A), ferrita (C_4AF); estas pueden incorporar iones de otros elementos, debido a esto su composición y estructura puede verse substancialmente modificada. También es posible encontrar sulfatos de los álcalis y la cal libre. En la Tabla 1 se presentan rangos de composición promedio del cemento Pórtland.

Tabla 1. Rangos de composición de un cemento Pórtland

Fase	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
%	50-70	15-30	5-10	5-15

Alita (C_3S ó Ca_3SiO_5)

Es la fase más importante, esta reacciona rápidamente con el agua y se obtiene un desarrollo de las propiedades mecánicas hasta los 28 días.

Belita (β - C_2S ó Ca_2SiO_4)

Se presenta en la forma del polimorfo β . Reacciona lentamente con el agua y su contribución a la resistencia mecánica es mucho más lenta, lo hace mucho después en etapas posteriores.

Aluminato tricálcico ($Ca_3Al_2O_6$)

Para esta fase resulta necesario el uso de yeso como regulador de fraguado, debido a que esta reacciona rápidamente con el agua lo que provoca un fraguado rápido.

Ferrita (Ca_2AlFeO_5)

Su velocidad de reacción es variable, probablemente en función de la composición química.

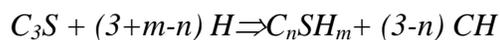
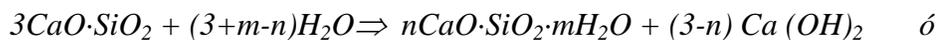
5.2.3 Hidratación de los compuestos puros del cemento Pórtland

Es importante comprender que la hidratación de cada compuesto es un proceso independiente de los otros procesos que tienen lugar durante la hidratación del cemento.

Los dos compuestos de silicato cálcico tienen casi el mismo proceso de hidratación. Sólo se distinguen por la cantidad de $Ca(OH)_2 = CH$ que se forma y por la cantidad de calor de hidratación liberado durante las reacciones.

Silicato Tricálcico

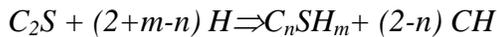
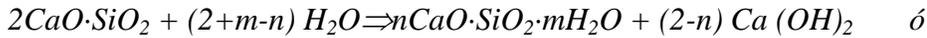
El C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$, Ca_3SiO_5) es el componente principal y el más importante del cemento Pórtland, el cual es el responsable del fraguado y endurecimiento. Su hidratación es compleja y no está totalmente entendida. Los productos de hidratación son un silicato de calcio hidratado amorfo con una relación molar $CaO/SiO_2 < 3.0$ (llamado $C-S-H$ sin implicar una composición específica) e hidróxido de calcio (portlandita).



Silicato Dicálcico

De las variantes del C_2S ($2CaO \cdot SiO_2$, Ca_2SiO_4) la β - C_2S es la más importante por su presencia en el cemento Pórtland. Sus reacciones de hidratación se ven afectadas por la temperatura o una mayor finura.

La hidratación de C_2S es similar a la de C_3S , pero es mucho más lenta porque es un compuesto menos reactivo que el C_3S . Además, el calor de hidratación de C_2S es menor que el de C_3S .

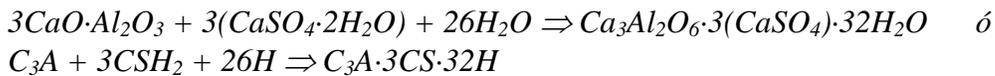


Aluminato Tricálcico

El aluminato tricálcico C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$, $Ca_3Al_2O_6$) ocurre en forma cúbica, ortorrómbica y monoclinica en función de la presencia de iones foráneos. Las tres modificaciones reaccionan de manera similar, sin embargo su reactividad depende de la cantidad de dopante. En el caso del cemento Pórtland el C_3A reacciona con el sulfato de calcio presente, por lo que las reacciones de interés en el sistema C_3A - $CaSO_4$ - H_2O :

Hidratación en presencia de $CaSO_4$

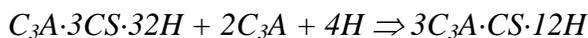
Se forma la fase ettringita (AFt) como producto principal de hidratación.



Esta reacción se acompaña de liberación de calor. Después de una etapa inicial de reacción la velocidad de reacción se disminuye pasando por un período durmiente cuya duración se incrementa conforme se aumenta la cantidad de sulfato de calcio en la mezcla. Es posible observar otra reacción si existe un desbalance entre la reactividad del C_3A y la velocidad de disolución del sulfato de calcio que resulta en un suministro insuficiente de iones SO_4^{2-} .

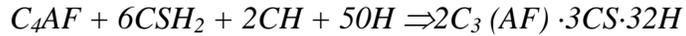


Una segunda etapa involucra una segunda reacción que ocurre cuando todo el sulfato de calcio se ha consumido. La ettringita formada inicialmente reacciona con C_3A para producir un aluminato de calcio monosulfatado (AFm) de acuerdo a la siguiente reacción:



Ferroaluminato de Calcio

La composición del ferroaluminato de calcio varía entre $C_2 (A_{0.7}F_{0.3})$ y $C_2 (A_{0.3}F_{0.7})$. En presencia de yeso y cal o yeso solamente el producto principal de reacción es la ettringita que contiene hierro:



En una reacción posterior la fase AFt se convierte a una fase AFm, esta reacción puede suceder antes de que se consuma todo el sulfato de calcio. Aparte del monosulfato es posible también observar la formación de $C_4 (AF)H_{13}$.

5.2.4 Clasificación del cemento Pórtland

El cemento Pórtland se clasifica por tipos de acuerdo a sus propiedades las cuales están en función de características y propiedades físicas y químicas.

Para el caso de los Cementos Pórtland de la Norma ASTM C 150, éstos se clasifican de acuerdo a lo siguiente:

TIPO I

Para uso general, cuando propiedades especiales de cualquier otro tipo no son requeridas.

TIPO IA

Cemento con aire incluido, similar al TIPO I, donde la condición de aire incluido es deseada.

TIPO II

Para uso general cuando se requiere una moderada resistencia a los sulfatos y un moderado calor de hidratación.

TIPO IIA

Cemento con aire incluido, similar al TIPO II, donde la condición de aire incluido es deseada.

TIPO III

Utilizado cuando se requiere una alta resistencia inicial.

TIPO IIIA

Cemento con aire incluido, similar al TIPO III, donde la condición de aire incluido es deseada.

TIPO IV

Para uso cuando se requiere un bajo calor de hidratación.

TIPO V

Utilizado cuando se requiere una alta resistencia a los sulfatos.

Cementos hidráulicos

El cemento hidráulico es un tipo de cemento que reacciona y endurece por interacción química con el agua y puede hacerlo aún bajo ella.

Estos cementos se pueden clasificar según la Norma ASTM C 1157 en:

Tipo GU: de uso general en construcción. Se emplean cuando no se requieren condiciones especiales.

Tipo HE: de alta resistencia inicial o temprana.

Tipo MS: de moderada resistencia a los sulfatos.

Tipo HS: de alta resistencia a los sulfatos.

Tipo MH: de moderado calor de hidratación.

Tipo LH: de bajo calor de hidratación.

5.2.5 Factores que afectan la velocidad de hidratación del cemento Pórtland

La velocidad de hidratación se ve influenciada por muchos factores. A su vez las propiedades mecánicas se ven afectadas también de manera parcial por el grado de reacción del cemento. En consecuencia, todos aquellos factores que afecten la velocidad de reacción afectaran las propiedades del cemento. Los factores que afectan la velocidad de reacción son los siguientes:

- **Edad de la pasta.**

Aunque el paso del tiempo es una variable que no puede controlarse, durante las diferentes etapas de la hidratación las reacciones progresan con diferente velocidad. Con excepción del periodo durmiente, la velocidad de hidratación registra su máximo en las

etapas tempranas. La velocidad de reacción disminuye con el tiempo hasta que se alcanza una etapa en la que no se registra más reacción.

En presencia de suficiente agua, aún después de cierto tiempo quedará una fracción de cemento sin hidratar. La reducción de la velocidad de reacción puede atribuirse a la formación de capas de C-S-H densas alrededor de los granos de cemento.

El mecanismo topoquímico descrito anteriormente es lento a través de estas densas capas de productos de hidratación entre más densa la capa más lenta la continuación de la reacción.

Cuando los granos son de tamaño mayor de 25 micras por lo general queda un remanente sin hidratar aún en periodos largos. Esto explica en parte la restricción o los requerimientos en cuanto a la finura del cemento.

- **Composición del cemento**

La velocidad de hidratación de las fases del cemento cuando participan simultáneamente dentro del cemento es distinta al comportamiento individual. Las diferencias de las fases individuales indican que la velocidad de hidratación global del cemento es función de la velocidad de hidratación de los componentes individuales.

- **Finura del cemento**

La velocidad de hidratación incrementa con la finura del cemento. Entre más fino o mayor sea el área superficial ofrecida para las reacciones para el agua, el cemento será en consecuencia más reactivo, especialmente en las etapas tempranas. Este efecto de incrementar la reactividad al aumentar la finura es explotado en los cementos de endurecimiento rápido.

- **Relación agua/cemento**

A menor cantidad de agua, menor hidratación. Eso puede atribuirse a la falta de espacio para la deposición de los productos de hidratación cuando hay menos agua.

- **Temperatura**

La velocidad de hidratación se ve incrementada con la temperatura, siempre y cuando la temperatura no sea tan alta que seque la pasta evaporando el agua disponible para las reacciones.

5.2.6 Factores que afectan la resistencia

La resistencia mecánica es el parámetro más importante usado para caracterizar los productos basados en cemento.

Los principales factores que determinan la resistencia de una pasta de cemento son:

- La naturaleza del ligante, la cual determina las propiedades intrínsecas del material hidrato.
- La finura del ligante, el cual es uno de los factores que determinan la cinética de hidratación y por lo tanto la velocidad de ganancia de resistencia. Generalmente la velocidad inicial de ganancia de resistencia se incrementa con el aumento de la fracción de partículas finas.
- Relación agua/cemento, esta determina la porosidad de la pasta de cemento hidratado. A un grado de hidratación dado la resistencia se incrementa con la disminución de la relación agua/cemento.
- Tiempo de hidratación, dado que conforme avance el tiempo la cantidad de cemento hidratado, y por lo tanto la resistencia aumentan.
- Temperatura de hidratación, la cual afecta la velocidad de hidratación y la microestructura, como se discutió anteriormente.

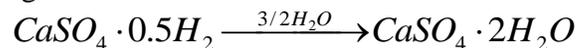
De estos factores, la resistencia en el corto plazo está regida principalmente por la finura del cemento, esta se incrementa al aumentar la cantidad de partículas de tamaño fino y al aumentar el área superficial. En contraste la resistencia en el largo plazo depende solo ligeramente de la finura del cemento, y para una relación agua/cemento dada depende principalmente de la composición del cemento.

5.3 Clasificación de los cementos

Los cementos pueden recibir el nombre del componente principal, como el cemento calcáreo, que contiene óxido de silicio, o como el cemento epoxiaco, que contiene resinas epoxídicas; o de su principal característica, como el cemento hidráulico, o el cemento rápido. Los cementos utilizados en la construcción se denominan en algunas ocasiones por su origen, como el cemento romano, o por su parecido con otros materiales, como el caso del cemento Pórtland, que tiene cierta semejanza con la piedra de Pórtland usada en Gran Bretaña para la construcción. Los cementos que resisten altas temperaturas se llaman cementos refractantes.

También existen otros tipos de cementos a base de materiales inorgánicos entre ellos se pueden citar:

- Sulfato de calcio (yeso): este tipo de cemento se obtiene por medio de la deshidratación total o parcial del yeso. Y endurece rehidratándolo para formar una masa de cristales de yeso entrelazados. Aunque este tipo de material no es muy resistente al agua.



- Ligantes a base de fosfatos: una solución acuosa de ácido fosfórico puede ser empleada para unir agregados de óxidos (p.ej. alúmina). Alternativamente se elaboran cementos sólidos por ejemplo $NH_4H_2PO_4$ que requiere sólo agua para endurecer. El enlace involucra una fase de fosfato vítrea.

- Cementos base alúmina: estos cementos contienen predominantemente aluminatos de calcio en las fases reactivas y productos. De más alto precio que el cemento Pórtland pero con más rápido desarrollo de resistencia (aun a bajas temperaturas), capacidad refractaria y resistencia al ataque químico.
- Cemento de sulfoaminoatos de calcio: producidos en procesos similares al cemento Pórtland pero con menor gasto energético, diferente configuración de fases y propiedades mecánicas similares o superiores al cemento Pórtland.
- Cemento sorel: este endurece por la interacción de magnesia ligeramente calcinada con una solución concentrada de cloruro de magnesio para formar una red de cristales de cloruro e hidróxido de magnesio.
- Cemento químicamente activado: sistemas cementosos basados en materiales como escorias de alto horno, cenizas volantes o metacaolines; activados por medios alcalinos y sin cemento Pórtland. En algunos casos las propiedades son similares o superiores a las del cemento Pórtland.

Actualmente, en nuestro país no existen obras que se puedan emprender sin el uso del cemento Pórtland. Es el pegante más barato y más versátil por su excelencia y sus propiedades físicas y mecánicas que son aprovechadas en multitud de usos. Además es el cemento activo en una mezcla de concreto o de mortero.

Cemento Blanco

El cemento Pórtland blanco difiere del cemento Pórtland gris únicamente en el color. El Cemento Pórtland blanco es fabricado con materias primas que contienen cantidades insignificantes de óxido de hierro y de manganeso, que son las sustancias que le dan el color a cemento gris. Este cemento se utiliza para fines estructurales o arquitectónicos, como muros precolados, aplanados, pinturas de cemento, paneles para fachadas, pegamento para azulejos y como concreto decorativo.

Cementos hidráulicos adicionados

Cemento hidráulico compuesto de dos o más constituyentes inorgánicos, en donde al menos uno de ellos no es cemento Pórtland o Clinker Pórtland, los cuales combinados o separados contribuyen al incremento de las propiedades de resistencia del cemento, con o sin otros componentes, adiciones de proceso o adiciones funcionales.

La clasificación de los Cementos Hidráulicos Adicionados según la Norma ASTM C 595, se presenta a continuación:

- Cemento Pórtland con escoria de alto horno (tipo IS): para uso general en construcción. Pueden considerarse las opciones Moderada resistencia a Sulfatos (MS), Aire incluido(A), Moderado calor de Hidratación (MH). El porcentaje de escoria de alto

horno en este tipo de cemento es aproximadamente 25 y 70 % de la masa total del cemento Pórtland de escoria de alto horno.

→ Cemento Pórtland Puzolánico: se consideran las opciones MS, A, MH. El contenido de puzolana es de aproximadamente 15-40% de la masa total de cemento Pórtland puzolánico. Se definen dos tipos:

→ Tipo IP: cemento Pórtland puzolánico para uso general en construcción.

→ Tipo P: cemento Pórtland puzolánico para uso general en construcción donde no se requieren altas resistencias a edades tempranas.

- Cemento de escoria: se define un tipo;

→ Tipo S: utilizado para la fabricación de concreto y en combinación con cal hidratada para la fabricación de mortero para mampostería. Su contenido en escoria puede considerarse mayor al 70% de la masa total del cemento de escoria.

- Cemento Pórtland modificado con puzolana: se define un tipo;

→ Tipo I (PM): para uso general en construcción. Su contenido en puzolana debe considerarse menor al 15 % de la masa total de cemento Pórtland modificado con puzolana.

- Cemento Pórtland modificado con escoria: para uso general en construcción. Pueden considerarse las opciones Moderada resistencia a Sulfatos (MS), Aire incluido(A), Moderado calor de Hidratación (MH).

Adiciones empleadas en los cementos hidráulicos

Las adiciones minerales finamente molidas pueden ser clasificadas de acuerdo con sus propiedades físicas o químicas como:

- Materiales Cementantes
- Materiales Puzolánicos
- Materiales Nominalmente Inertes

Para propósitos de esta investigación sólo se hará énfasis en los materiales puzolánicos.

5.4 Materiales Puzolánicos

Definición

El código ASTM (1992), en la definición 618-78, define: "las puzolanas son materiales silíceos o aluminosilíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan

químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes"

Las puzolanas contienen normalmente una gran cantidad de material amorfo y de minerales (olivino, piroxenas, hornablendas, feldespatos), desarrollando la mayoría de ellas su actividad hidráulica como consecuencia del material amorfo, materiales activos (zeolitas) y la superficie específica que les caracteriza, cualidades y compuestos que favorecen la reacción con el hidróxido de calcio.

5.4.1 Tipos de puzolanas

En una primera clasificación, las puzolanas se dividen en dos grandes grupos: naturales y artificiales.

Puzolanas Naturales

Rocas volcánicas, en las que el constituyente amorfo es vidrio producido por enfriamiento brusco de la lava. Por ejemplo las cenizas volcánicas, la pómez, las tobas, la escoria y obsidiana.

Rocas o suelos en las que el constituyente silíceo contiene ópalo, ya sea por la precipitación de la sílice de una solución o de los residuos de organismos de lo cual son ejemplos las tierras de diatomeas, o las arcillas calcinadas por vía natural a partir de calor o de un flujo de lava.

Puzolanas artificiales

Cenizas volantes: las cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral (lignito) fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.

Arcillas activadas o calcinadas artificialmente: por ejemplo residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800 °C.

Escorias de fundición: principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos. Estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.

Puzolanas mixtas o intermedias

Las cenizas de residuos agrícolas: la ceniza de cascarilla de arroz y las cenizas del bagazo y la paja de la caña de azúcar. Cuando son quemados convenientemente, se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina, cuya estructura depende de la temperatura de combustión.

A continuación se detallan las características de las CBCA, como el material puzolánico que se utilizará en esta investigación.

5.4.2 Características de las cenizas de bagazo de caña de azúcar

Contenido de cenizas

El bagazo de la caña aporta alrededor de 2.8% de cenizas. Se plantea que el porcentaje de cenizas fluctúa entre 0.78 y 3.22, en dependencia del tipo de suelo, forma de alza y recolección. Los constituyentes de la ceniza varían en cantidad dentro de estrechos límites, de acuerdo con la cantidad de terreno, tipo de abono y variedad de la caña [Villegas, 2000; Pérez, 1997; Luna, 1972]. En la Tabla 2 se presenta la composición química de la ceniza del bagazo de caña de azúcar.

Tabla 2. Composición química de la ceniza del bagazo de caña de azúcar.

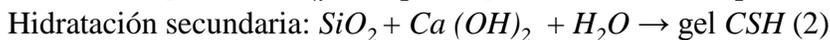
Compuesto químico	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O+Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO
%	82.7	1.1	3.4	3.0	3.5	4.6	1.7	-

Fuente: Ing. Jorge Luis Reyes Montiel. Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental.

5.4.3 Mecanismo de Hidratación del Cemento Pórtland sustituido con una puzolana

Las puzolanas, incorporadas dentro del CPP (Cemento Pórtland Puzolánico) tienen la capacidad de formar productos de hidratación a través de una reacción secundaria donde se combinan con el $Ca(OH)_2$ formado durante la hidratación de los compuestos sílico-calcáreos (C_3S y C_2S) denominada primaria (1), resultando compuestos CSH (sílico-calcáreos-hidratados).

Las reacciones que tienen lugar en el mecanismo de hidratación son los siguientes:



El SiO₂ es aportado por la puzolana y el $Ca(OH)_2$ –hidróxido de calcio– es el subproducto de poco valor cementoso generado durante la hidratación primaria y puede ser el punto de origen de algunas reacciones degenerativas del cemento Pórtland hidratado. Podrá observarse que durante la hidratación de las puzolanas no hay generación de $Ca(OH)_2$.

En el mismo sentido, la Figura 2 muestra que, a medida que avanza el proceso de hidratación, la cal libre disminuye, lo que indica la formación de productos de hidratación (en su mayor parte CSH y aluminosilicatos de calcio en menor medida) a partir de la

puzolana. Es evidente que el uso de una puzolana de buena calidad asegura, no solamente una menor cantidad de cal libre en la pasta de cemento sino que además se obtiene un mayor volumen de productos CSH por lo cual se obtiene (a igual relación agua/cemento) una menor porosidad de la pasta debido a un refinamiento de poros y, consecuentemente, menor permeabilidad respecto del CPN (cemento Pórtland ordinario) producido a partir del mismo Clinker Pórtland. Esto significa la obtención de una pasta de cemento más compacta, resistente y durable.

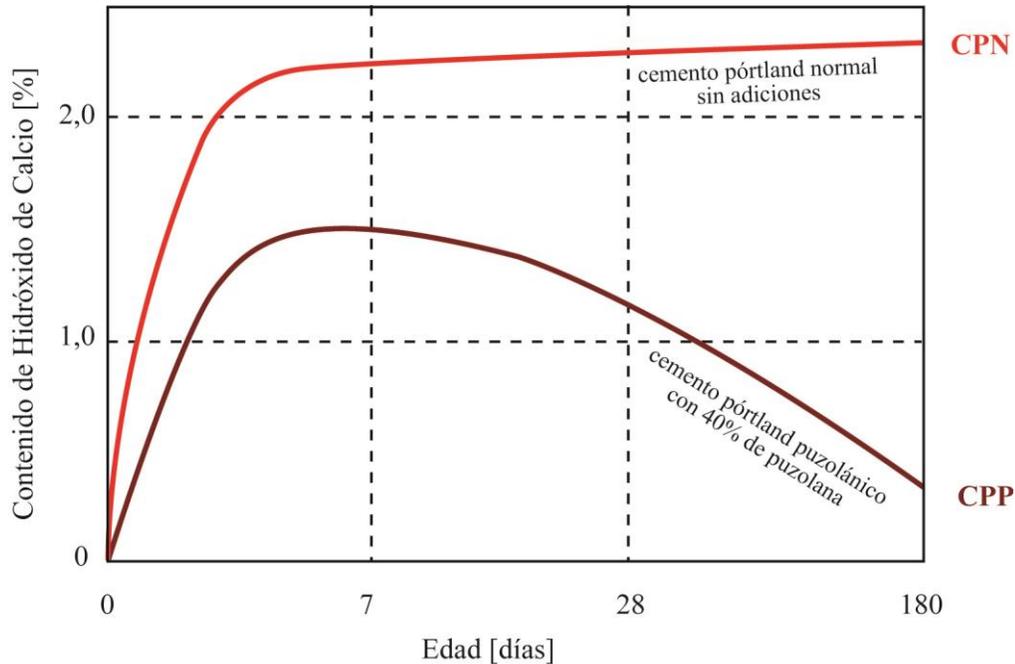


Figura 2. Cambios en el contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante la hidratación del CPN-cemento Pórtland puzolánicos (Lea 1971).
Fuentes ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

5.5 METODOS DE PRUEBA

5.5.1 Caracterización físico-química de la ceniza de bagazo de caña

5.5.1.1 Determinación del índice de actividad puzolánica

El índice de actividad puzolánica permite determinar los niveles mínimos de resistencia que presentan las puzolanas cuando son utilizadas de forma conjunta con cementos.

En el presente trabajo se hará énfasis en la determinación del índice de actividad puzolánica por resistencia a la compresión.

Según la norma NMX-C-273-1978 en esta prueba se hace una comparación entre la resistencia a la compresión de un mortero puzolánico y un mortero de referencia.

Se determina la resistencia a la compresión a la edad de 28 días y se calcula el índice de actividad puzolánicos con la Ecuación 1.

Ecuación 1

$$IAP = (A / B) * 100$$

Donde:

IAP: Índice de Actividad Puzolánica

A: promedio de resistencia a la compresión de los cubos con el mortero puzolánico.

B: promedio de resistencia a la compresión de los cubos con el mortero de referencia.

El resultado obtenido al aplicar la ecuación no debe ser menor a 0.75, es decir, el cemento puzolánico debe tener al menos 75% de la resistencia patrón.

En general, este método permite determinar de una manera sencilla si el material en estudio posee propiedades puzolánicas, las cuales aportan al cemento cualidades especiales, tales como: menor calor de hidratación, endurecimiento más lento, curado más duradero, etc.

5.5.1.2 Determinación del área superficial

El área superficial de los cementos se mide comúnmente por medio de métodos de permeabilidad de aire. Con el método Blaine se hace pasar un volumen determinado de aire a través de una cama de cemento a una velocidad que disminuye gradualmente, controlada por medio del movimiento de un líquido en un manómetro, midiendo el tiempo. El aparato se calibra empíricamente, normalmente empleando otro cemento cuya área superficial se conoce previamente, llamados cementos estándar.

5.5.1.3 Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X en polvos es un método analítico capaz de suministrar información cualitativa como la identificación de fases cristalinas, detección de fases amorfas y formación de soluciones sólidas; también proporciona información cuantitativa como la concentración de las fases cristalinas y la fracción de fases amorfas aunque fundamentalmente se utiliza como método de identificación de fases. La identificación de fases se basa en el hecho de que cada sustancia cristalina presenta un diagrama de difracción único, es decir, una serie de picos (o reflexiones) con diferente intensidad y posición.

La posición de cada reflexión en el difractograma está relacionada con las características estructurales de la muestra, tales como, su simetría y sus parámetros de red, y de la intensidad se pueden obtener datos como las posiciones atómicas, entre otros. Así, si se encuentra la igualdad exacta entre el diagrama de una mezcla desconocida y el de un patrón conocido, se puede dar por sentada la identidad química.

5.5.1.4 Determinación de distribución de tamaño de partícula

El principio de la difracción por rayos láser consiste en hacer pasar una muestra pulverulenta, en seco o en suspensión en un líquido no reactivo, a través de un rayo láser monocromático. Según la teoría de Fraunhofer se origina una figura de difracción en el detector. De este modo se consigue obtener el análisis granulométrico de las partículas.

5.5.1.5 Fluorescencia de Rayos X

La espectrometría de fluorescencia de rayos X es una técnica de espectroscopía atómica. Esta se basa en las transiciones de electrones de los átomos que se producen cuando una radiación electromagnética de cierta energía incide con el material en estudio, produciendo una excitación del átomo, el cual pasa de un estado basal (estable) a otro de mayor energía (inestable) de lo que resultan transiciones en diferentes estados energéticos en el átomo, los cuales son únicos para cada átomo en particular. Esta característica se utiliza para la identificación de los analitos o compuestos que se deseen analizar, por lo que es de gran utilidad en el análisis cualitativo.

5.5.2 Técnica de caracterización del agregado fino

5.5.2.1 Análisis granulométrico

El método consiste en determinar las cantidades en que están presentes partículas de ciertos tamaños en el material.

La distribución de los tamaños de las partículas se realiza mediante el empleo de mallas de aberturas cuadradas, de los tamaños siguientes: 3/8", 4, 8, 16, 30, 50 y 100 respectivamente.

La prueba consiste en hacer pasar la muestra a través de dichas mallas y se determina el porcentaje de material que se retiene en cada una. Los resultados de la prueba se grafican junto con los límites que especifican los porcentajes aceptables para cada tamaño, a fin de verificar si la distribución de tamaños es adecuada. Esto se puede verificar en la norma NMX C-111-ONNCCE 2004.

5.5.2.2 Módulo de finura

El módulo de finura del agregado fino, es el índice aproximado que describe en forma rápida y breve la proporción de finos o de gruesos que se tiene en las partículas que lo constituyen.

El módulo de finura de la arena se calcula sumando los porcentajes acumulados en las mallas siguientes: Numero 4, 8, 16, 30, 50 y 100 y dividiendo el total entre cien. Es un indicador de la finura de un agregado: cuanto mayor sea el módulo de finura, más grueso es el agregado. Si el módulo de finura de la arena es de 2.3 se trata de una arena fina; y si el módulo se encuentra entre 2.3 a 3.1 se trata de una arena mediana. Y si el módulo es

mayor de 3.1 se trata de una arena gruesa. Es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas de concreto.

El cálculo de porcentaje retenido se realiza por medio de la Ecuación 2.

Ecuación 2

$$\%RM = \frac{PRM}{Pm} * 100$$

Donde:

%RM: es el porcentaje retenido en mallas

PRM: es el peso retenido en cada malla en gramos

Pm: es el peso de la muestra en gramos

5.5.2.3 Impurezas orgánicas

En ocasiones en el agregado fino se presentan impurezas orgánicas, las cuales perjudican las reacciones de hidratación del cemento y su desarrollo de resistencia. La detección del alto contenido orgánico se realiza mediante la prueba colorimétrica con hidróxido de sodio, tal como lo indica la ASTM C 40.

La prueba consiste en colocar en un frasco de vidrio un determinado volumen de arena, añadiendo una solución de hidróxido de sodio al 3% en un volumen ligeramente mayor que el de la arena. Se tapa el frasco y se agita hasta que la solución se mezcle por completo con las partículas de la arena y se deja reposar por 24 horas. Después de este tiempo se observa la intensidad de la coloración comparando con una placa orgánica de colores, la cual contiene 5 vidrios de colores estándar que van de amarillo claro a café oscuro y numeradas del 1 (color más claro) al 5 (color más oscuro), el número 3 corresponde al color patrón. Debe reportarse cuál de los 5 vidrios de colores es el más cercano al color de la muestra.

Cuando la muestra analizada presenta un color mayor que el número 3 de la placa orgánica, el agregado debe considerarse que posiblemente contenga impurezas orgánicas perjudiciales.

5.5.3 Ensayo físico en mortero fresco

5.5.3.1 Determinación del peso específico

El peso específico expresa la relación entre la muestra de cemento y el volumen absoluto, el valor debe estar entre 3.10 a 3.15 g/ cm³ aunque el valor del peso específico del cemento no indica la calidad de un tipo de cemento, su principal utilidad está relacionada con el diseño y control de las mezclas de concreto mediante el cálculo de peso y volumen.

El peso específico de los cementos Pórtland varía de 2.9 a 3.15, siendo generalmente, mayor de 3.

La determinación del peso específico de los cementos consiste en establecer la relación entre una masa de cemento (g) y el volumen (ml) de líquido que esta masa desplaza en el matraz de Le Chatelier. La Figura 3 muestra la forma del frasco de Le Chatelier.

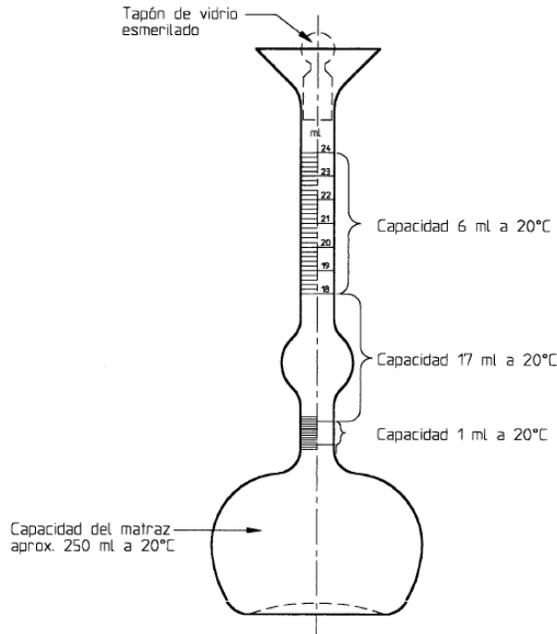


Figura 3. Matraz normal de Le Chatelier

5.5.3.2 Densidad del cemento

Con la Ecuación 3 se determinará la densidad del cemento Pórtland y la densidad de la ceniza tamizada por la malla 200:

Ecuación 3

$$\rho_c = \frac{M}{(V_f - V_i)}$$

Donde:

M: masa de la muestra de cemento.

V_i: volumen inicial del líquido introducido al frasco Le Chatelier, en cm³.

V_f: volumen final del líquido (después de introducir los 64 g de cemento), en cm³.

ρ_c: densidad del cemento, en g/cm³.

5.5.3.3 Densidad de las mezclas

La densidad de las mezclas puzolánicas se determinan mediante la Ecuación 4

Ecuación 4
$$\rho_{mezcla} = (\rho_A * \% pesoA) + (\rho_B * \% pesoB)$$

Donde:

ρ_{mezcla} : densidad de la mezcla puzolánica, en g/cm³

ρ_A : densidad del cemento Pórtland

ρ_B : densidad de la ceniza de bagazo de caña de azúcar tamizada

5.5.3.4 Determinación del tiempo de fraguado

Desde el momento en que el cemento y el agua entran en contacto se inicia una reacción exotérmica que determina el progresivo endurecimiento de la mezcla. El estado en el que la mezcla pierde su plasticidad y se vuelve difícil de manejar, se conoce como tiempo de fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final.

El tiempo de fraguado inicial alcanza un valor entre 45 a 60 minutos, el tiempo de fraguado final se estima en 10 horas aproximadamente.

Según NTE INEN 0158 el tiempo de fraguado inicial se calcula como sigue:

Ecuación 5
$$\left[\left(\frac{(H - E)}{(C - D)} \right) * (C - 25) \right] + E$$

Donde:

E: tiempo en minutos de la última penetración mayor que 25 mm,

H: tiempo en minutos de la primera penetración menor que 25 mm,

C: lectura de penetración al tiempo E, y

D: lectura de penetración al tiempo H.

El tiempo de fraguado final se calcula mediante la determinación del tiempo transcurrido entre el tiempo inicial de contacto entre el cemento y el agua y el tiempo en el que la aguja no deja una marca visible sobre la pasta (NTE INEN 0158).

5.5.4 Ensayo físico-mecánico en mortero endurecido

5.5.4.1 Determinación de la resistencia mecánica a compresión

El ensayo de Resistencia a la compresión consiste en aplicar un esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima por el área transversal original de una probeta en un ensayo de compresión, mediante la Ecuación 6.

Ecuación 6
$$R = \frac{P \max}{S}$$

Donde:

R: resistencia a la compresión en kg/cm^2 (o en Pa)

Pmáx: carga máxima indicada por la máquina, en kgF

S: área de la sección transversal del cubo, en cm^2

De la misma forma para el cálculo de resistencia a compresión se hará uso de la siguiente ecuación:

Ecuación 7
$$R = \frac{10 * Q}{a * b} * 9.806$$

Donde:

Q: es la carga soportada por el cubo (kgf)

a: es la dimensión del lado a del cubo en (mm)

b: es la dimensión del lado b del cubo en (mm)

9.806: factor de conversión de kgf/mm^2 a Mpa

5.5.4.2 Ataque por ion sulfato

Las sales en estado sólido no atacan al concreto, pero cuando se encuentran en solución pueden reaccionar con la pasta del cemento endurecida. Por ejemplo, algunas arcillas contienen álcalis, magnesio y sulfato de calcio y el agua subterránea de ese tipo de arcillas es, en realidad, una solución de sulfato; en consecuencia puede atacar el cemento, puesto que el sulfato reacciona con el Ca(OH)_2 y con los hidratos de aluminato de calcio.

Los productos de la reacción, yeso y sulfoaluminato de calcio, tienen un volumen mucho mayor que los compuestos que remplazan, de modo que su reacción con los sulfatos producen expansión y ruptura del concreto.

▪ Prueba de resistencia a los sulfatos

En este tipo de pruebas se almacenan especímenes sumergidos en soluciones de sulfato de sodio o de magnesio, o en una mezcla de ambos. El mojado y secado alternados acelera el daño causado por la cristalización de las sales dentro de los poros del concreto. El efecto de la exposición se puede calcular por la pérdida de resistencia de los especímenes, por los cambios en el módulo dinámico de elasticidad, por expansión, por su pérdida de peso e incluso a simple vista.

5.5.4.3 Resistencia al fuego

Las propiedades del concreto se modifican por la exposición a altas temperaturas, debido a la aparición de micro y microfisuras que afectan su estructura. El grado de alteración que se produce depende del nivel de temperatura alcanzado, del tiempo de exposición y de la composición del concreto.

A medida que la pasta de cemento es expuesta a temperaturas crecientes se pueden indicar como puntos salientes la expulsión del agua evaporable (100°C), el comienzo de la deshidratación del silicato de calcio hidratado (180°C), la descomposición del hidróxido de calcio (500°C) y la del silicato de calcio hidratado (alrededor de 700°C).

En consecuencia las afectaciones producidas por las altas temperaturas son mucho más notorias cuando el concreto supera los 500 °C; considerándose que para este nivel, los daños que se producen son prácticamente irreversibles.

La deshidratación y cambios de porosidad de la pasta de cemento y las deformaciones diferenciales o procesos de transformación de los agregados que genera la exposición a altas temperaturas afectan como era de esperar la resistencia del concreto.

5.5.5 Técnica de caracterización en pastas endurecidas

5.5.5.1 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

El microscopio electrónico de barrido utiliza los electrones dispersados por la superficie de la muestra cuando esta es barrida por un haz de la misma. Su rango de trabajo al emplear electrones en vez de fotones es más amplio que en la microscopia óptica, pudiendo llegar a magnitudes del orden de 200Å. La microscopia electrónica de barrido posibilita el estudio de la orientación y el tamaño de las partículas, poros y fisuras, la identificación de especies cristalinas y nuevas fases de neoformación y las morfologías microscópicas de las alteraciones existentes. Además, al incorporar un sistema de análisis químico (EDAX y microsonda) posibilita la determinación de la composición química y mineralógica de cualquier fase o cristal, ya que puede centrar el haz de electrones solo en ella.

5.5.5.2 Análisis térmico: Análisis Térmico Diferencial (ATD o DTA) y Termogravimétrico (ATG)

Las técnicas de análisis térmico forman un grupo caracterizado por tener en común la medida de una propiedad física de una sustancia y/o de sus productos de reacción en función de la temperatura, mientras que la sustancia está sometida a un programa controlado de calentamiento o enfriamiento. El análisis térmico diferencial da una idea de las transformaciones físico-químicas que tienen lugar en una sustancia determinada, y a la temperatura a la que dichas transformaciones aparecen. Su fundamento es la medida de la diferencia de temperatura entre la muestra y un material de referencia, cuando las dos especies están sujetas a dos regímenes de temperatura, en un ambiente calentado o enfriado a velocidad controlada. Como es lógico el material no debe sufrir transformaciones en el rango de temperatura en que se realiza el estudio.

El registro obtenido indica si la sustancia es térmicamente activa en el rango de temperatura seleccionado, mediante la aparición de una serie de picos cuya posición depende fundamentalmente de la composición química y estructura cristalina de la

sustancia, y cuya superficie está relacionada con la energía envuelta en la reacción que está ocurriendo.

El análisis termogravimétrico es la técnica con la cual se registra la variación de peso de una sustancia en función del tiempo o la temperatura, cuando dicha sustancia se encuentra en un ambiente calentado o enfriado a velocidad controlada.

Al utilizar simultáneamente el ATD y el ATG, es posible, distinguir por una parte, reacciones que ocurren sin cambio de peso, como transiciones cristalinas, transformaciones de segundo orden, y reacciones en fase sólida, y por otra parte aquellos fenómenos que implican pérdida o ganancia de peso.

VI. METODOLOGIA

6.1 MATERIALES

Los materiales utilizados para el desarrollo de la investigación fueron los siguientes:

6.1.1 Cenizas de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) proveniente del ingenio Monte Rosa

Debido a las condiciones iniciales que presentaban las cenizas, para su acondicionamiento se tuvieron que secar en un horno durante 24 horas a una temperatura de 110 °C, se tomaron lotes de 5000 g con el cual se determinó el porcentaje de humedad libre siendo de 77% en peso; luego se tamizaron haciéndolas pasar por una malla ASTM 200 con una abertura de tamiz de 0.074 mm.

La ceniza cuenta con una gravedad específica de 2.13 Kg/m³, determinada por medio del desplazamiento de gasolina a través del matraz de Le Chatelier y un área superficial de 2552 cm²/g determinada mediante permeabilidad al aire con el aparato de Blaine.

En la Tabla 3 se muestra la composición química de las CBCA, la cual fue determinada mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X con dispersión de longitud de onda, para lo cual se utilizó un equipo marca BRUKER modelo S4 PIONNER, en el Laboratorio de Análisis Químico del CINVESTAV IPN- Unidad Saltillo, México. De acuerdo al análisis las cenizas están compuestas principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 .

Tabla 3. Composición química de las CBCA (% peso)

ZrO ₂	Cl	SrO	MnO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	PPI	SiO ₂
0.006	0.017	0.031	0.095	0.395	0.399	0.509	1.15	1.59	3.556	4.145	4.921	6.726	14.13	62.33

En la Figura 4 se muestra el patrón de difracción de las CBCA que se obtuvo mediante su análisis por Difracción de Rayos X en un Difractómetro Phillips PW3040. Las fases cristalinas encontradas fueron Albita $Na(AlSi_3O_8)$ y Cristobalita (SiO_2), la presencia del halo amorfo entre 15° a 38° 2θ, indica que la ceniza es predominantemente amorfa.

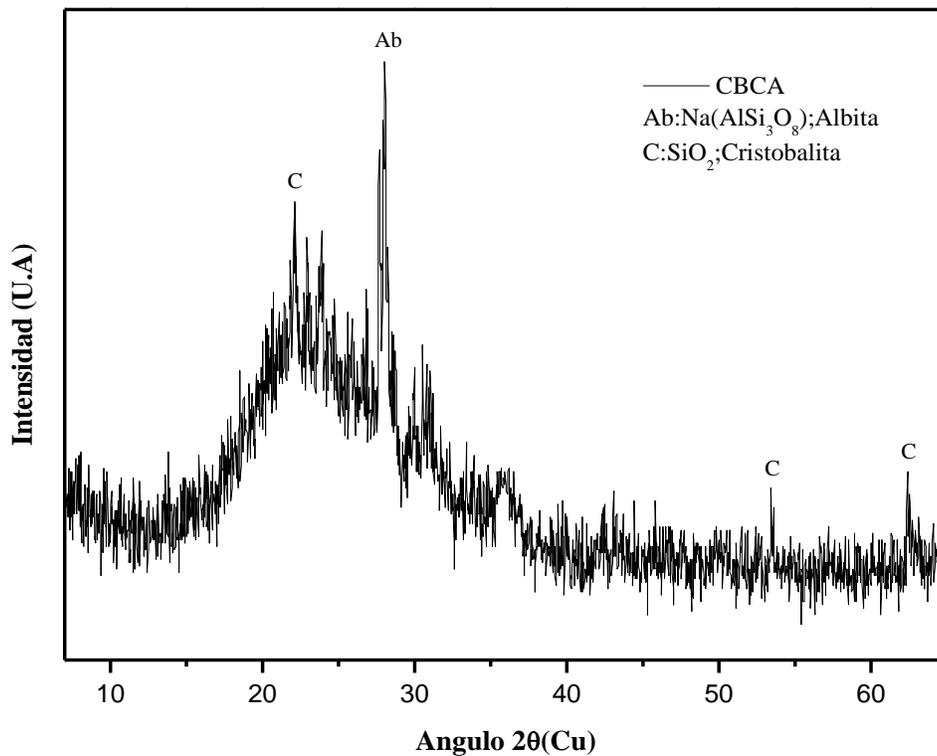


Figura 4. Patrón de DRX de las CBCA sin reaccionar

En la Figura 5 se muestra la fotomicrografía de las CBCA sin reaccionar obtenida por microscopía electrónica de barrido (MEB), la cual para su previo análisis se montó en cinta de grafito. Puede observarse la morfología de partículas irregulares en forma de bastones, esferas y semiesferas, y estructura porosa. El equipo que se utilizó fue un MEB marca Phillips modelo XL30ESEM.

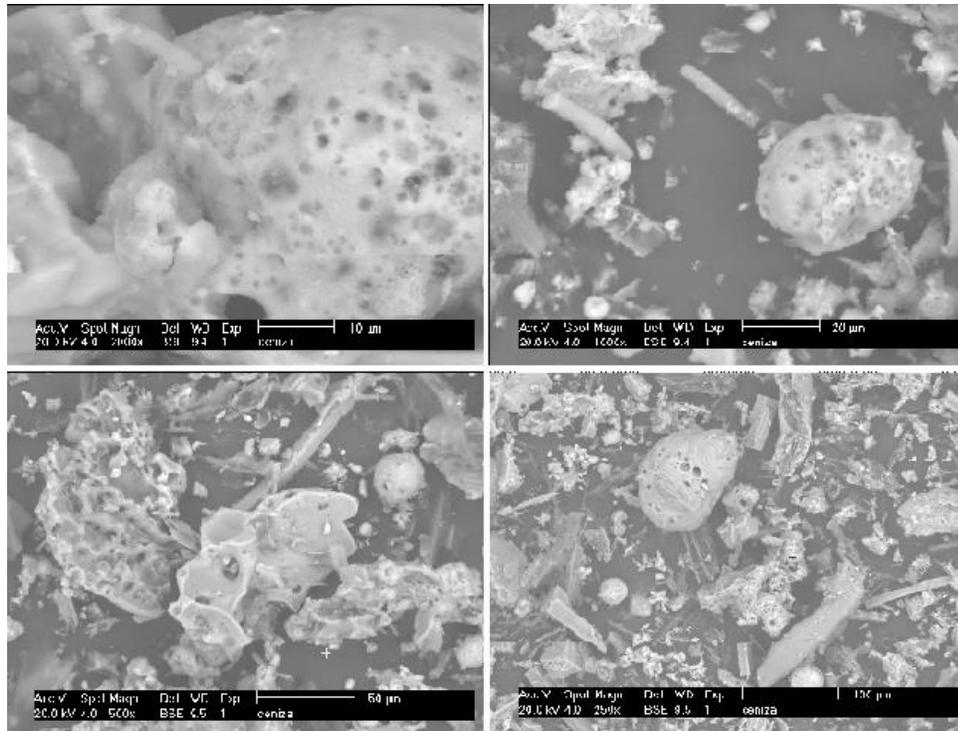


Figura 5. Fotomicrografías de las CBCA

En la Figura 6 se muestra la composición química de las partículas de ceniza sin reaccionar, obtenido mediante Espectroscopía por Dispersión de Energía (EDS). Esta fue montada en resina, desbastadas con lija N° 1200 en una desbastadora Struers Labopol-21 y pulidas con pasta de diamante 3 micras y 1.25 micras, utilizando metanol como lubricante. Como se puede observar en la Figura 6, se encontraron altas concentraciones de Si y en menor contenido Al y Na (en acuerdo con su composición química por FRX).

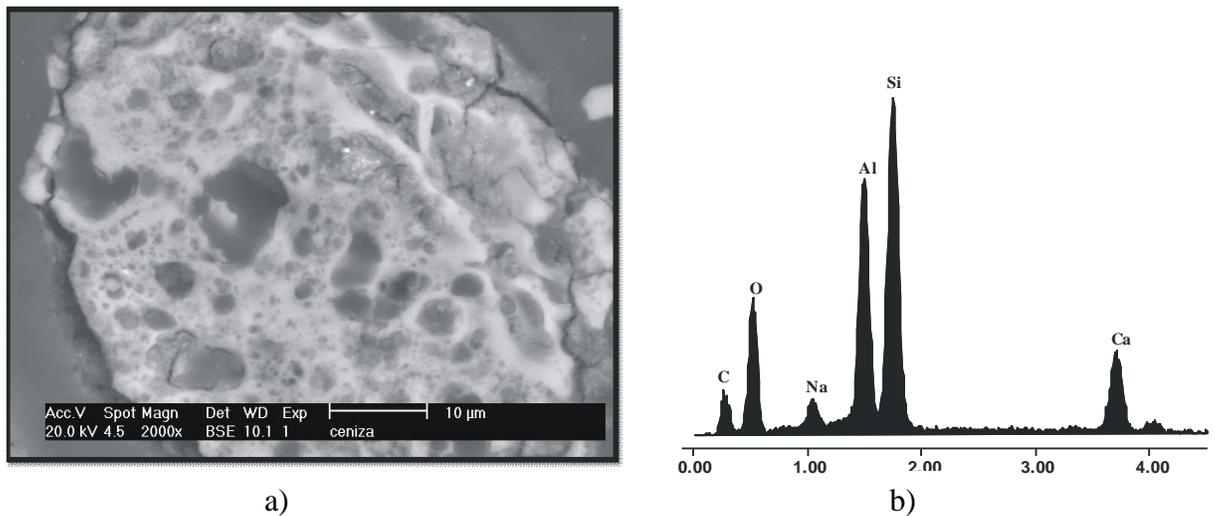


Figura 6. CBCA sin reaccionar a) micrografía y b) espectro

La distribución de tamaños de partículas de las CBCA se muestra en la Figura 7 con un tamaño promedio de partículas de 36.32 μm , la cual fue determinada por medio de Difracción láser.

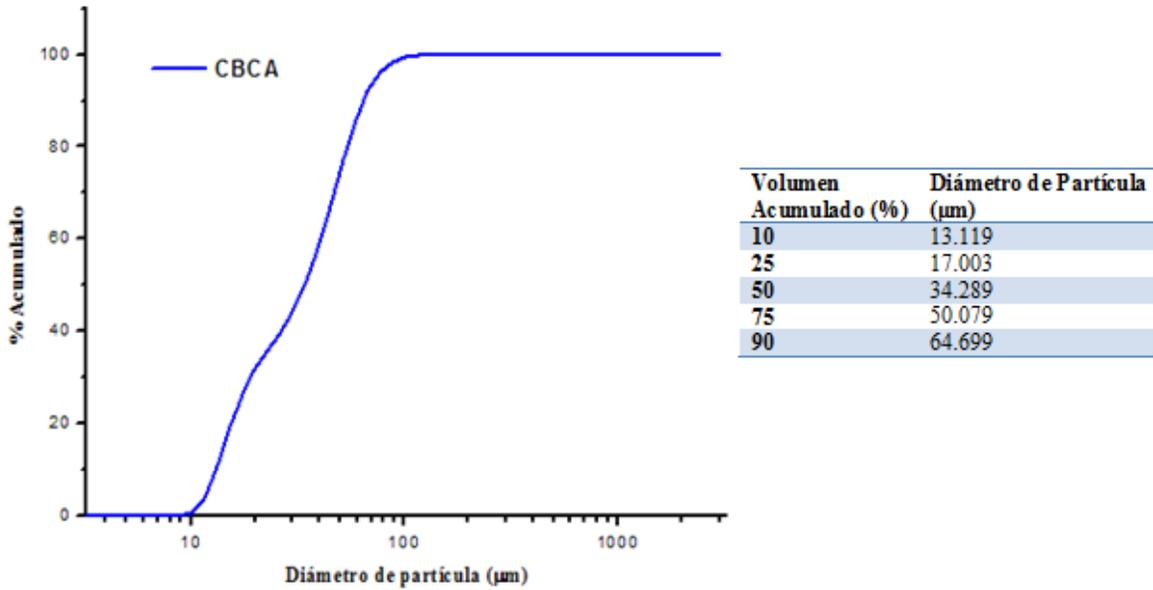


Figura 7. Distribución de tamaños de partículas de las CBCA

6.1.2 Cemento Pórtland (CP)

Se utilizó CP con una gravedad específica de 3.08 Kg/m^3 , determinada por medio del desplazamiento de gasolina en el matraz de Le Chatelier y un área superficial de 3296 cm^2/g , determinada mediante permeabilidad al aire con el aparato de Blaine.

En la Tabla 4 se muestra la composición química de un CP mexicano marca Holcim obtenida mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X.

Puede observarse en la Tabla 4 que la composición química del cemento difiere de la composición química de las CBCA principalmente en sus contenidos de SiO_2 y CaO .

Tabla 4. Composición química del CP (% peso)

ZrO ₂	Cl	SrO	MnO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	PPI	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	ZnO
0.009	0.037	0.076	0.111	0.212	4.187	0.440	0.087	1.040	61.49	0.750	2.343	3.750	11.450	13.900	0.019	0.102

En la Figura 8 se muestra el patrón de difracción obtenido mediante Difracción de Rayos X, se pudo observar fases cristalinas como Calcita (CaCO_3), Alita (Ca_3SiO_5), Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Belita (Ca_2SiO_4), Aluminato tricalcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) y Ferrita ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$). Típicamente reportados en un cemento Pórtland, este análisis mineralógico corresponde a un CP Mexicano marca Holcim.

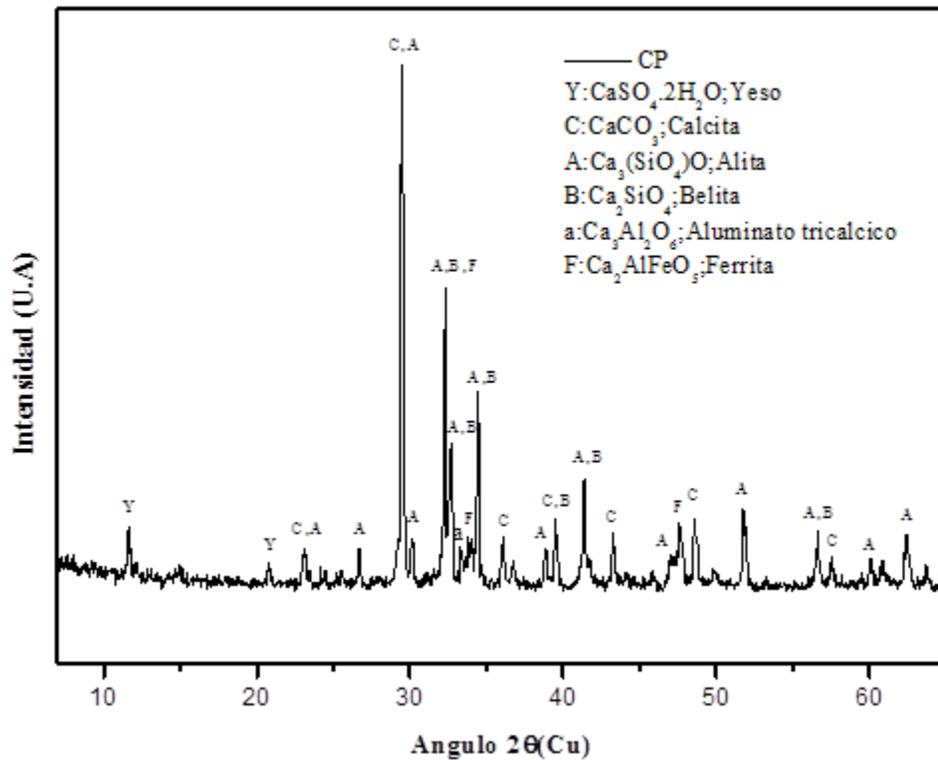


Figura 8. Patrón de DRX de CP anhidro

La distribución de tamaños de partículas del CP se muestra en la Figura 9 con un tamaño promedio de partículas de 13.84 μm, la cual fue determinada por medio de Difracción láser.

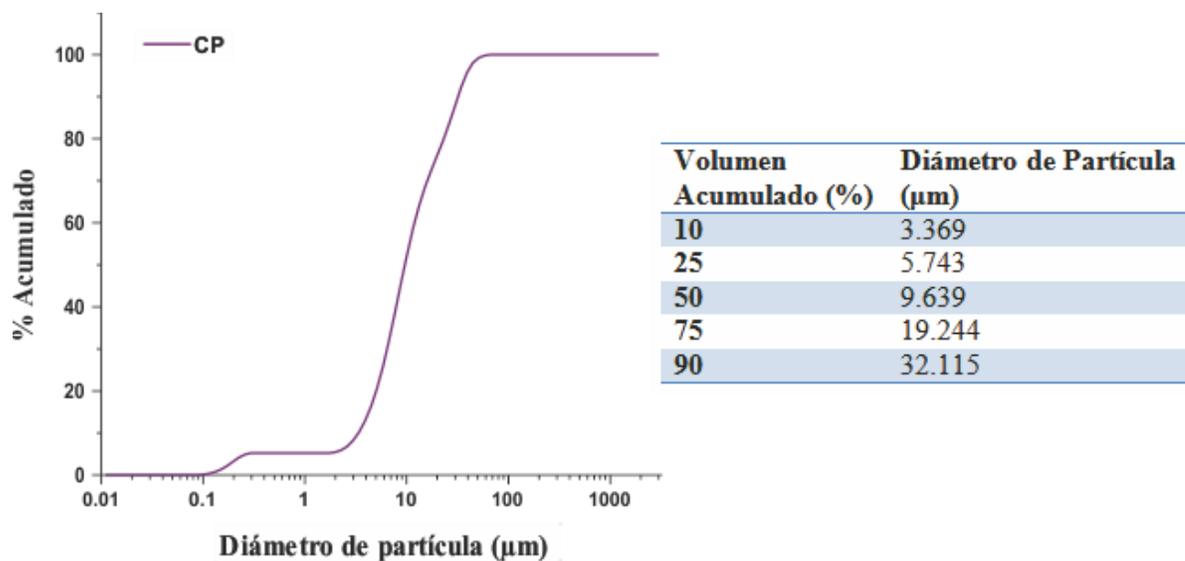


Figura 9. Distribución de tamaños de partículas del CP

Puede observarse que el tamaño promedio de partícula de la CBCA es mucho mayor que el del CP, pudiendo esperar una menor reactividad de parte de la CBCA, debido a que hay menor área superficial disponible para las reacciones.

6.1.3 Agregado fino

El agregado que se utilizó proviene del cerro Motastepe. Su granulometría se controló de acuerdo a la norma NMX-C-077-1997-ONNCE. En la Figura 10 se muestra la curva granulométrica de la arena.

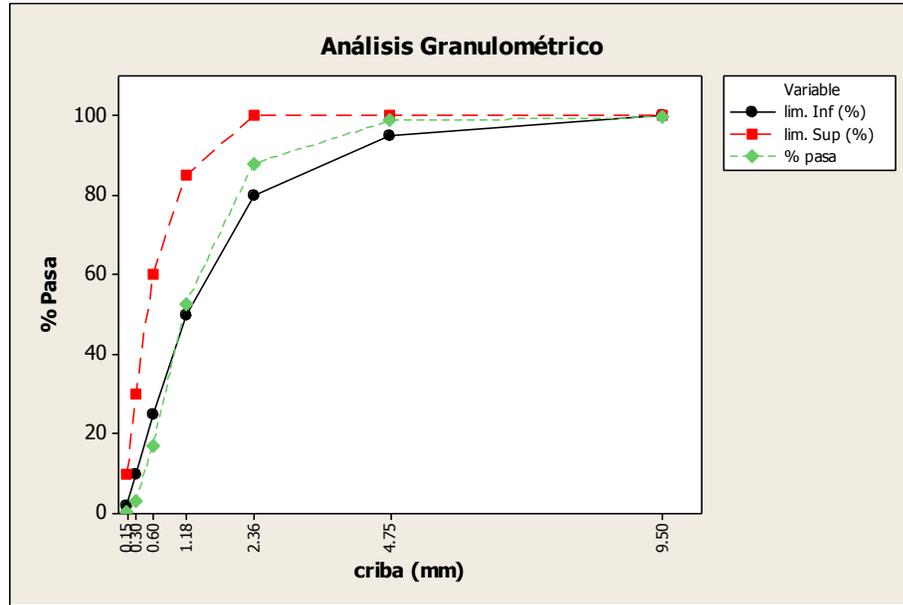


Figura 10. Granulometría de la arena

Como se observa en la Figura 10, la granulometría de la arena se encuentra dentro de los límites de granulometría para agregado fino, con un módulo de finura de 3.37 que indica que es una arena gruesa.

En la Tabla 5 se presentan las propiedades físicas de la arena y la norma que se utilizó para su determinación.

Tabla 5. Propiedades físicas de la arena

Masa específica aparente saturada y superficialmente seca (ME _{ss}), en g/cm ³	0.25	NMX-C-165-1984
Masa específica seca (ME _s), en g/cm ³	0.24	NMX-C-165-1984
% Absorción	6.3	NMX-C-165-1984
Módulo de finura	3.37	NMX-C-111-ONNCE 2004

El agregado fino utilizado se muestra libre de impurezas orgánicas, como se observa en la Figura 11, el color más cercano es el número 1, siendo el 3 el color patrón o de referencia.



Figura 11. Impurezas orgánicas en la arena

6.1.4 Agua de mezclado

Para elaborar las mezclas de mortero se utilizó agua potable del Laboratorio de Materiales y Suelos del Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios (RUPAP) de la UNI, costado Sur de Villa Progreso, Managua, Nicaragua, así como también del Laboratorio de Cementos del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV), Unidad Saltillo, México.

6.2 MÉTODOS

6.2.1 Variables de estudio

Se fabricaron probetas cúbicas de CP de 50 mm de arista, según la especificación de la norma NMX-C-061-1976, sustituidas por CBCA con arena tradicional a diferentes niveles y de igual forma se fabricaron probetas cúbicas de CP de 50 mm de arista con arena sustituida por CBCA a diferentes niveles.

Se prepararon morteros de referencia 100% CP y 100% arena proveniente del cerro Motastepe para efectos de comparación.

Para la elaboración del diseño de mezclas de mortero modificado con CBCA, los parámetros de partida considerados fueron:

→ Para cemento sustituido

Relación agua/cemento (a/c)

La relación agua/cemento para elaborar las mezclas fue de 0.40, 0.45 y 0.50 con el fin de verificar con cuál de las tres relaciones se alcanza la resistencia adecuada a los 56 días de curado.

Relación CP/CBCA

Para la mezcla cementante se utilizó una relación en peso CP/CBCA de 85/15, 70/30 y 55/45

Relación arena/cemento (are/c)

Para la preparación de morteros adicionados se trabajó con una relación en peso are/c de 2/1, 3/1 y 4/1.

→ Para arena sustituida

Se utilizó la misma relación a/c mencionada en el procedimiento descrito anteriormente para cemento sustituido y 100% CP. La arena fue sustituida en los niveles de 30, 60 y 90% en peso por CBCA sin tamizar.

6.2.2 Tiempo de fraguado

Para la realización del tiempo de fraguado de las mezclas, se determinó primeramente la consistencia normal de cada pasta, según ASTM C187.

Se determinó el tiempo de fraguado de acuerdo a la norma NTE INEN 0158 para las mezclas que se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Tiempo de fraguado

CP (%)	CBCA (%)
85	15
55	45
100	0

6.2.3 Arreglo Experimental

El desarrollo del diseño experimental se llevó a cabo por medio del método Taguchi, el cual utiliza técnicas estadísticas para realizar experimentos que pretenden determinar las mejores combinaciones de variables de producto y proceso para fabricar un producto y ahorrar costos de pruebas.

En la Tabla 7 se presenta el arreglo ortogonal de Taguchi 3^3 para CP sustituido por CBCA a diferentes niveles.

Tabla 7. Arreglo ortogonal de Taguchi 3^3 para CP sustituido por CBCA

a/c	are/c	CP/CBCA
0.40	2/1	15
0.40	3/1	30
0.40	4/1	45
0.45	2/1	30
0.45	3/1	45
0.45	4/1	15
0.50	2/1	45
0.50	3/1	15
0.50	4/1	30

En la Tabla 8 se presenta el arreglo ortogonal de Taguchi 3^3 para arena sustituida por CBCA sin tamizar a diferentes niveles.

Tabla 8. Arreglo ortogonal de Taguchi 3^3 para arena sustituida por CBCA sin tamizar (CBCAst)

a/c	are/c	are/CBCAst
0.40	2/1	30
0.40	3/1	60
0.40	4/1	90
0.45	2/1	60
0.45	3/1	90
0.45	4/1	30
0.50	2/1	90
0.50	3/1	30
0.50	4/1	60

6.2.4 Elaboración de probetas cúbicas

Se realizaron en total 216 probetas de 125 cm³ cada una. Según la norma NMX-C-061-1976 las probetas deben ser cúbicas de 5 cm por lado.

Para la elaboración de los cubos del primer arreglo experimental se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

1. Para la preparación de la arena se realizó el mezclado con agua durante 90 segundos, midiendo la cantidad de agua según el porcentaje de absorción de la arena.
2. Para la elaboración de las mezclas de mortero se utilizó una mezcladora marca Hobart, modelo A200.
3. Se agregó el agua de mezclado y la cantidad de CP calculadas, se mezclan por 30 segundos a velocidad baja.
4. Se agrega la cantidad de arena lentamente durante 30 segundos.
5. Concluidos los 30 segundos se cambia a velocidad alta durante 30 segundos más.
6. Se detiene la mezcladora y se deja reposar por 90 segundos, durante los primeros 15 segundos de este tiempo se desprende rápidamente con la espátula todo el mortero que haya quedado adherido en las paredes del recipiente.
7. Se concluye el mezclado haciendo funcionar la mezcladora durante 60 segundos a velocidad alta.
8. Los moldes previamente engrasados, se llenan con la mezcla (verificar NMX-C-061-1976) y se dejan fraguar por 24 horas para luego desmoldar y se dejan curando al aire libre.

En la Tabla 9 se presenta la densidad de las mezclas puzolánicas del primer arreglo experimental.

Tabla 9. Densidad de las mezclas puzolánicas

CPO/CBCA	are/c	a/c	Densidad (g/cm ³)
15%	2/1	0.40	2.94
30%	3/1	0.40	2.80
45%	4/1	0.40	2.65
30%	2/1	0.45	2.80
45%	3/1	0.45	2.65
15%	4/1	0.45	2.94
45%	2/1	0.50	2.65
15%	3/1	0.50	2.94
30%	4/1	0.50	2.80

Para la elaboración de los cubos del segundo arreglo experimental se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

1. Se mezclaron las cantidades de arena y CBCA según los porcentajes de sustitución, se agregó agua tomando en cuenta el porcentaje de absorción de la arena y se realizó el mezclado por 90 segundos.

Se repiten los pasos del 2 al 8 descritos anteriormente.

6.2.5 Resistencia mecánica a la compresión (RMC)

Se realizaron 12 probetas cúbicas para cada una de las 18 corridas experimentales. Con el objetivo de realizar ensayos de resistencia a compresión a 7, 14, 28 y 56 días, se tomaron tres probetas cúbicas para su medición de RMC por cada día de ensayo para obtener un promedio representativo. Se utilizó una máquina de ensaye a compresión marca SOILTEST con capacidad de carga de 15 toneladas (30000 libras).

6.2.6 Prueba de durabilidad

6.2.6.1 Ataque por ión sulfato

Con la fórmula óptima obtenida de acuerdo a los resultados de RMC, se fabricaron doce probetas cúbicas, a las cuales se les dio un tiempo de curado al aire libre de 28 días.

El día 28 del tiempo de curado, se tomaron cuatro probetas y se sumergieron por 28 días en una solución de $MgSO_4$ al 5%. Finalizados los 28 días se midió su resistencia mecánica a la compresión.

6.2.6.2 Resistencia al fuego

Se tomaron cuatro probetas cúbicas de la dosificación óptima curadas a 28 días, luego se colocaron en una mufla marca Barnstead Thermolyne a $900^{\circ}C$ por dos horas, luego se dejaron enfriando por doce horas y se midió su resistencia a la compresión.

6.2.7 Preparación de pastas, y caracterización correspondiente en CINVESTAV Unidad Saltillo, México

6.2.7.1 Preparación de pastas y probetas cúbicas

Como parte del desarrollo de esta tesis, se realizó una estancia de investigación en el Laboratorio de Cementos del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados de México. Durante esta etapa de la tesis se prepararon pastas de CP-CBCA. Las dosificaciones preparadas se muestran en % en peso en la Tabla 10. También se elaboraron probetas de referencia 100% CP con una relación a/c 0.5 para efectos de comparación.

Tabla 10. Dosificaciones de estudio

Sistema	CP (%)	CBCA (%)	a/c
1	85	15	0.5
2	55	45	0.84
Patrón	100	0	0.5

Durante la preparación de la pasta del sistema 2, se encontró que la cantidad de agua agregada de 0.5 no era suficiente para poder obtener una mezcla trabajable, por ello, ésta mezcla se trabajó con una relación a/c de 0.84.

El proceso de preparación de las pastas fue el siguiente:

1. Se pesaron las materias primas
2. Se mezcló el CP y CBCA para obtener un cemento bien homogenizado
3. Se agregó el agua a la mezcladora
4. Se agregó el material cementante (CP+CBCA)
5. Los componentes se mezclaron al cabo de 5 minutos.
6. Se llenaron los moldes de Nylamid de 1" de lado.
7. Las probetas recién elaboradas se vibraron por un tiempo de 10 segundos con el fin de eliminar burbujas de aire presentes.
8. Luego se envolvieron las probetas con bolsas plásticas y paños húmedos y se introdujeron a la cámara isotérmica de 60 °C y se dejaron fraguar por 24 horas.
9. Después del fraguado se desmoldaron y se mantuvieron en la misma cámara isotérmica de curado de 60 °C envueltas con paños húmedos.

6.2.7.2 Resistencia a la compresión

Para obtener la resistencia a la compresión se tomaron cubos de la cámara isotérmica a edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días para poder tener un promedio representativo. Para obtener el área donde se aplicó la carga, se midieron las dimensiones de los cubos con un vernier con una precisión de 0.01 mm, sometiéndolos a compresión en una prensa hidráulica marca D.A.V.I.S.A aplicando la carga en caras diferentes a las de vaciado.

6.2.7.3 Difracción de Rayos X (DRX)

Se tomaron los restos de los cubos ensayados a las edades 7, 14 y 28 días de curado, y se sumergieron en metanol con el fin de detener la reacción de hidratación, luego se secaron a vacío (35 °C y 21 in Hg) en un horno de vacío VWR Model 1430-2, posteriormente se tomó 15 gramos de muestra se trituró manualmente en un mortero de porcelana y luego se introdujo la muestra en un molino planetario RetschPM 400 y finalmente se hizo pasar la muestra pulverizada por la malla 100 con el fin de obtener tamaños de partículas menores a 147 µm.

6.2.7.4 Análisis térmico

Se llevó a cabo el mismo procedimiento que para las muestras de difracción descrito anteriormente. Las muestras se caracterizaron por un análisis simultáneo de ATG y ATD

mediante un analizador térmico diferencial gravimétrico simultáneo (Perkin-Elmer, modelo PyrisDiamond TG/DTA). Las muestras fueron colocadas en un crisol de alúmina. Las condiciones a las que se llevó cabo el análisis fue a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en atmósfera de nitrógeno hasta 1000°C.

6.2.7.5 Microscopía Electrónica de Barrido

Se extrajeron cubos de la cámara isotérmica que no fueron ensayados mecánicamente a edades de 7, 14 y 28 días de curado y se mantuvieron en metanol y posteriormente se secaron en un horno de vacío, el mismo utilizado para las muestras de difracción. Las muestras fueron desbastadas en una desbastadora Struers Labopol-21 con lija 1200 y luego fueron pulidas sobre un paño húmedo con pasta de diamante de 3 y 1.25 μm utilizando metanol como lubricante. Las muestras ya pulidas fueron recubiertas con cobre previo al análisis en el Microscopio Electrónico de Barrido (Phillips, modelo XL-30 ESEM) para micrografías y análisis por EDS.

VII. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

7.1 Resultados de tiempo de fraguado

En la Tabla 11 se presenta la demanda de agua para la obtención de pastas de consistencia normal. En la cual se obtiene que, el incremento de la demanda de agua para pasta con 15% CBCA es de 8% con respecto a pastas 100% CP, y de un 38% para pastas con 45% CBCA con respecto a pastas 100% CP. En la medida en que aumenta el porcentaje de sustitución de CP por CBCA incrementa la demanda de agua. Esto puede deberse en parte a la mayor finura del CP con respecto a las CBCA, esto sumado a la diferencia de densidades provoca un aumento en la cantidad de partículas a lubricar y mojar dentro de los sistemas y en consecuencia aumenta la demanda de agua (1). Además es necesario tomar en cuenta la estructura porosa de las CBCA, lo cual también ocasiona una mayor demanda de agua, debido a que cierto porcentaje de agua es absorbido a través de la estructura de poros, necesiándose de esta manera más agua para lubricar las partículas.

Tabla 11. Resultados de demanda de agua para pastas de consistencia normal

Consistencia normal		
%CBCA	%CP	Agua (%)
15	85	38
45	55	68
0	100	30

En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos en la determinación de tiempo de fraguado.

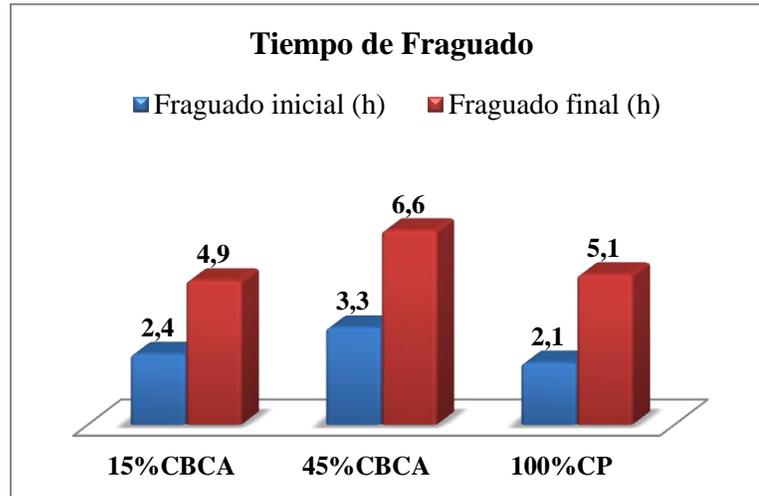


Figura 12. Resultados de tiempo de fraguado inicial y final de las pastas con 15 y 45% CBCA y 100% CP

Para la pasta con 15% de CBCA se observa un fraguado inicial mayor con respecto al de referencia 100%CP y un fraguado final menor. Por otro lado, la pasta con 45% CBCA

presentó un fraguado inicial y final mucho mayor con respecto al de referencia 100%CP. Se puede notar que, un aumento en el porcentaje de sustitución provoca un incremento en los tiempos de fraguado de las pastas. Esto debido a que el tiempo de fraguado tiende a ser mayor en los cementos mezclados al desarrollarse las reacciones hidráulicas con menor rapidez, hecho que puede ser contrarrestando con un aumento en la finura del cemento (2).

7.2 Resultados de resistencia a compresión de morteros 100% CP

En la Tabla 12 se presentan los resultados de resistencia mecánica a la compresión de morteros de referencia (patrones 100% CP) curados a 28 días. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar obtenida con un promedio de tres cubos.

Tabla 12. Resultados de resistencia a compresión de morteros 100% CP a 28 días

Patrones	a/c	are/c	RMC (Mpa)
PC1	0.40	2/1	27.64 (1.54)
PC2	0.40	3/1	18.57 (1.57)
PC3	0.40	4/1	6.09 (0.81)
PC4	0.45	2/1	22.94 (1.83)
PC5	0.45	3/1	18.16 (2.68)
PC6	0.45	4/1	9.72 (0.96)
PC7	0.50	2/1	18.13 (2.92)
PC8	0.50	3/1	16.08 (0.75)
PC9	0.50	4/1	9.69 (0.98)

7.3 Resultados de resistencia mecánica a la compresión de morteros CP/CBCA

En la Tabla 13 se presentan los resultados de resistencia mecánica a la compresión de morteros de CP sustituido a diferentes niveles por CBCA tamizada curado hasta 56 días. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar obtenida con un promedio de tres cubos por cada día de curado

Tabla 13. Resultados de resistencia mecánica a la compresión de morteros de CP sustituido por CBCA tamizada

Resistencia mecánica a la compresión (Mpa)							
Corrida	a/c	are/c	% CBCA	Edad de prueba (días)			
				7	14	28	56
C1	0.4	2/1	15	7.71 (3.71)	13.79 (0.66)	9.57 (0.41)	11.65 (0.05)
C2	0.4	3/1	30	0.59 (0.10)	1.75 (0.75)	1.72 (0.27)	1.63 (0.68)
C3	0.4	4/1	45	0.53 (0.00)	0.62 (0.00)	0.18 (0.00)	0.59 (0.37)
C4	0.45	2/1	30	4.75 (0.59)	7.16 (1.38)	5.05 (2.20)	6.36 (2.83)
C5	0.45	3/1	45	0.74 (0.14)	0.95 (0.22)	0.56 (0.21)	0.59 (0.19)
C6	0.45	4/1	15	2.35 (0.65)	2.29 (0.05)	2.02 (0.59)	1.81 (0.05)
C7	0.5	2/1	45	1.78 (0.47)	2.32 (0.09)	1.07 (0.50)	1.90 (0.19)
C8	0.5	3/1	15	8.11 (0.58)	8.92 (1.03)	7.28 (2.06)	8.02 (0.00)
C9	0.5	4/1	30	2.53 (0.10)	2.17 (0.45)	1.90 (0.49)	2.02 (0.14)

En la Figura 13 se muestran los resultados de resistencia mecánica a la compresión (Tabla 13) de morteros de CP-CBCA tamizada por cada día de curado.

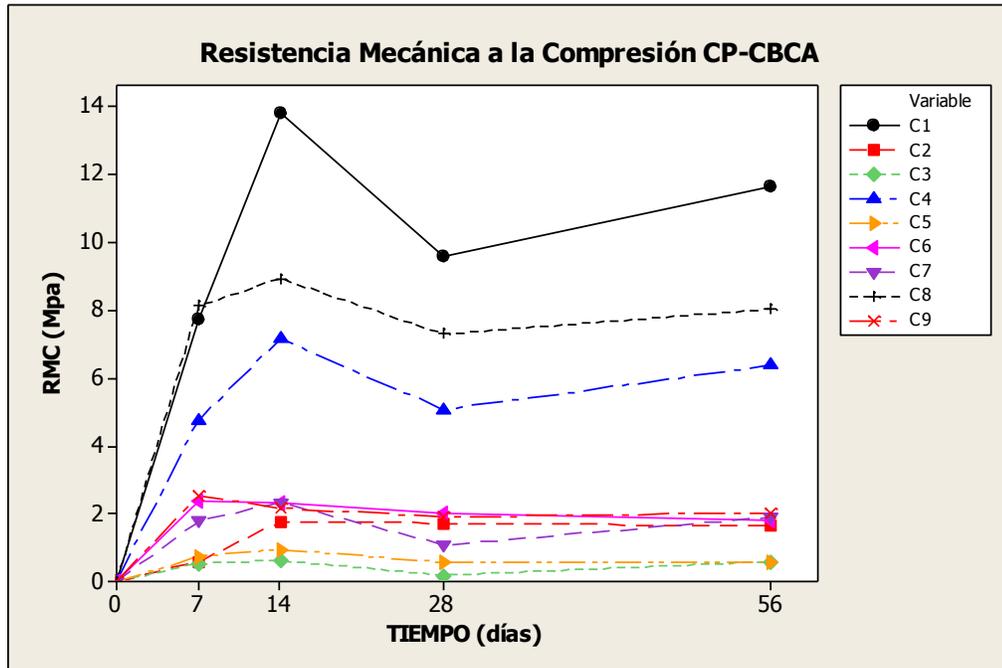


Figura 13. Resultados de la evolución de resistencia mecánica a la compresión con el tiempo.

Se observa de la Figura 13 que, a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de CBCA disminuyen las propiedades mecánicas de los morteros a cualquier edad de curado.

Puede observarse que, para C1 (15%CBCA), C8 (15%CBCA) y C4 (30%CBCA) el comportamiento presentado es similar, con un incremento de resistencia a edades tempranas, disminución de resistencia a la edad de 28 días y un incremento a 56 días de curado.

Para C2 (30% CBCA), C3 (45% CBCA), C5 (45% CBCA), C6 (15% CBCA) y C7 (45% CBCA), se comprueba que el porcentaje de sustitución que más detrimento causa sobre las propiedades mecánicas es 45%, siendo C3 la que menos resistencia presenta tomando en cuenta que tiene la menor a/c: 0.40 y la mayor are/c: 4/1. Es importante destacar que C6 y C9 presentan resistencias similares, a 7 días C6 con 2.35 Mpa y C9 con 2.53Mpa y de forma similar en los demás días ensayados. Ambas tienen en común la cantidad de are/c, aunque el %CBCA y la a/c difieren, los cuales podrían considerarse como los parámetros causantes de una disminución o incremento de resistencia. Siendo C9 la que presenta mayor a/c, %CBCA y resistencia, puede decirse que un incremento de a/c y %CBCA repercute en una disminución de las propiedades mecánicas.

A continuación en la Figura 14 se presenta la comparación entre los morteros de referencia (patrones 100% CP) y los morteros CP/CBCA.

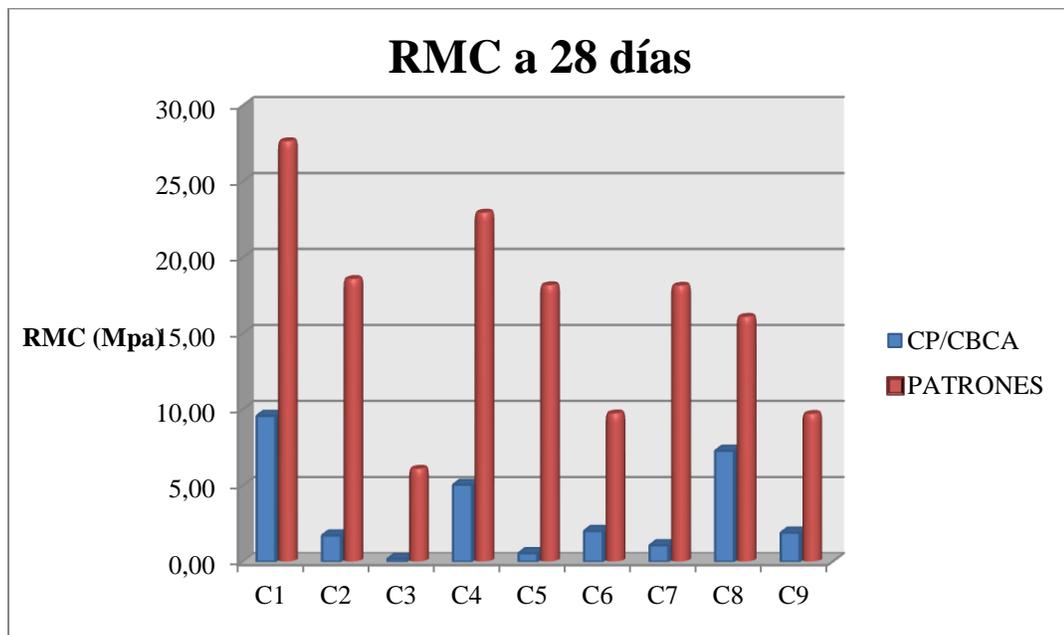


Figura 14. Morteros de referencia 100% CP respecto a morteros de CP/CBCA.

Se observa de la Figura 14 que, ninguno de los morteros de cemento sustituido sobrepasa la resistencia de los morteros de referencia o patrones.

Los morteros C2, C3, C5 y C7 presentaron reducción de resistencia de hasta 90% con respecto a morteros 100% CP. Para C9 la resistencia disminuye en un 80% respecto al patrón. Así mismo, los morteros C4 y C6 disminuyen su resistencia hasta más del 70%. La menor reducción de resistencia la presentan C1 y C8, con 65% y 55% respectivamente respecto a morteros de referencia.

Siendo C1 (15%CBCA) y C8 (15%CBCA) los morteros que presentaron menor porcentaje de reducción de resistencia, puede decirse que éstos resultados indican la viabilidad de sustitución parcial de cemento por CBCA hasta en un 15%. Además, C8 es el mortero que presenta el menor porcentaje de reducción, y la relación a/c con nivel más alto de 0.50, el cual puede considerarse como el nivel óptimo, aunque es necesario realizar un análisis más exhaustivo para llegar a la conclusión sobre cuáles son los niveles óptimos de dosificación de cada factor propuesto.

La Figura 15 muestra los resultados de resistencia de morteros CP/CBCA a edad de 28 días respecto a morteros CP/CBCA a edad de 56 días. Esta figura se construyó con el fin de evaluar el avance de la reacción puzolánica entre el Ca(OH)_2 de la hidratación del CP y el SiO_2 aportado por la CBCA.

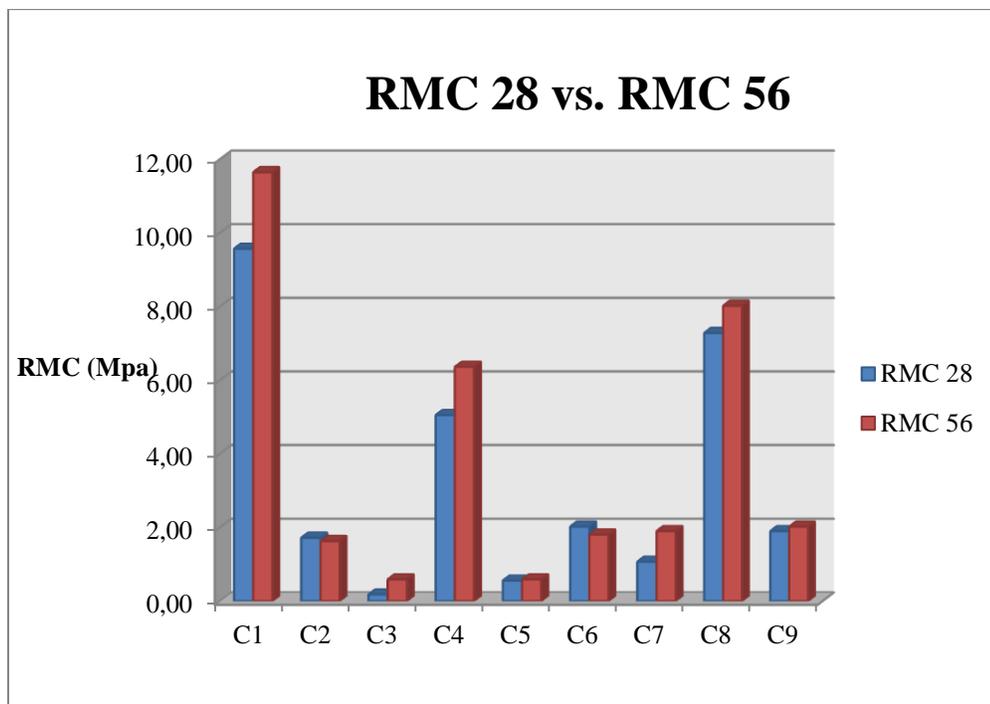


Figura 15. Morteros CP/CBCA a 28 días respecto a morteros CP/CBCA a 56 días

A simple vista se puede observar de la Figura 15 un incremento en la resistencia a compresión a partir de la edad de 28 días hasta 56 días. Aunque al parecer C1, C4 y C8 parecen ser los morteros que presentan mayor resistencia, el incremento de resistencia medido en porcentaje es mayor para C3 y C7 con 227% y 78% respectivamente. A pesar de que C3 presenta un incremento de 227%, su valor de resistencia de 0.59Mpa para la edad de 56 días lo convierten en un dato trivial, ya que es un valor muy pequeño

comparado con la resistencia presentada por los demás morteros. De la misma manera ocurre con C7, ya que a los 56 días de curado no sobrepasa los 2Mpa.

Los morteros C1 y C4 presentan un incremento de 22% y 26% respectivamente. Por ultimo C5, C8 y C9 desarrollan una resistencia a los 56 días de 5%, 10% y 6% respectivamente. Por otro lado, C2 y C6 presentan pérdida de las propiedades mecánicas de hasta un 5% y 10% respectivamente.

En la Figura 16 se presenta la gráfica de superficie de respuesta de RMC a 28 días, la cual representa la relación funcional entre la respuesta y los factores experimentales. Dicha gráfica muestra sólo dos factores a la vez, cualquier factor extra se mantiene en un nivel constante. Se puede apreciar que en los dos puntos óptimos se tiene una relación a/c de 0.50 y CP/CBCA de 15%.

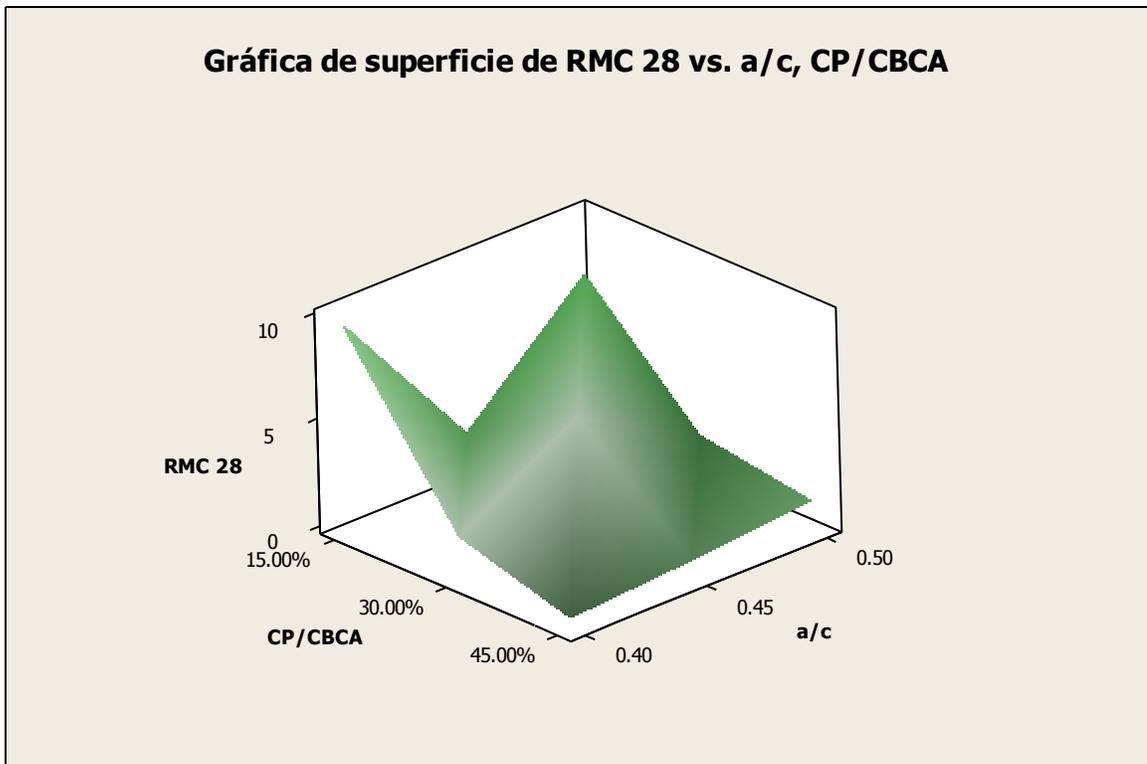


Figura 16. Gráfica de superficie de respuesta para RMC de morteros CP/CBCA a 28 días

En la Figura 17 se presenta la gráfica de contorno de RMC a 28 días que permite visualizar la superficie de respuesta, la cual sugiere que para maximizar la resistencia a compresión se requiere de un % de sustitución de CBCA menor al 20% y una relación a/c mayor a 0.48.

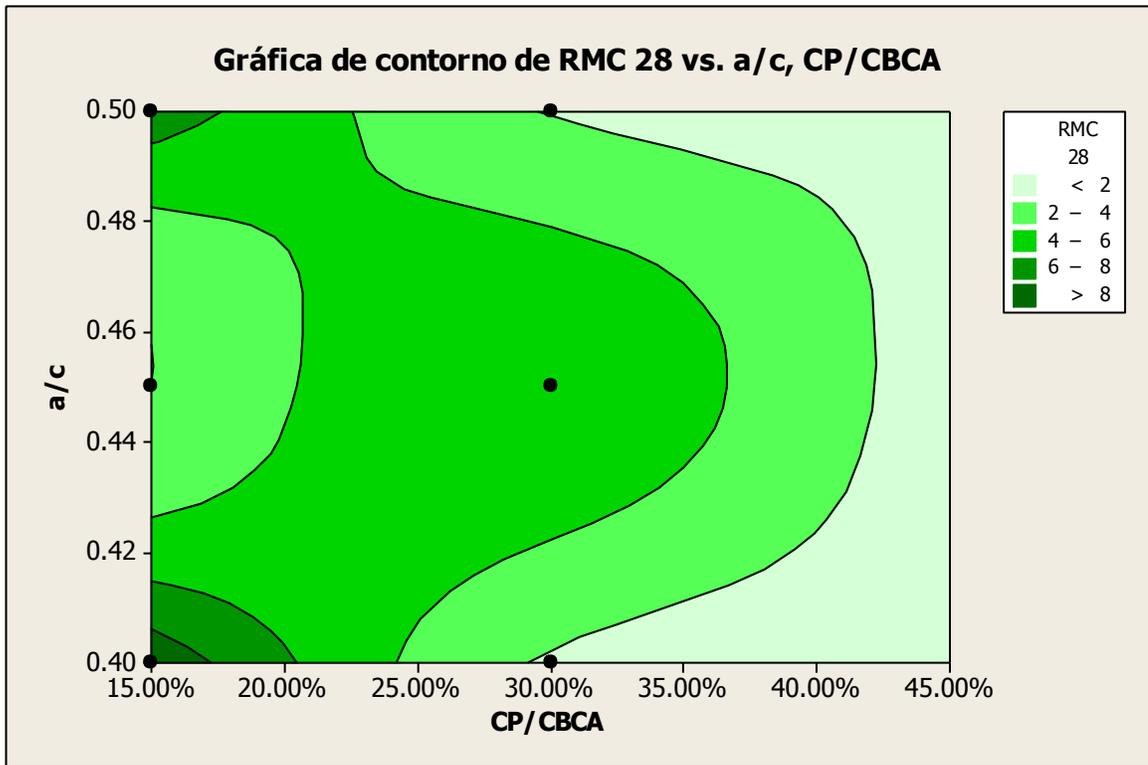


Figura 17. Contorno de RMC de morteros CP/CBCA a 28 días frente a relación a/c y CP/CBCA

Es necesario definir los niveles óptimos en que debe fijarse cada parámetro o factor. Para esto se realizó el análisis correspondiente a los valores generados sobre la variable respuesta (RMC), a través de la gráfica de efectos principales para relaciones S/N “Más grande es mejor”, por medio del software estadístico Minitab. Esto se muestra en la Figura 18, la cual permite evaluar la estabilidad del rendimiento de una característica de calidad, que en este caso es la resistencia mecánica a compresión.

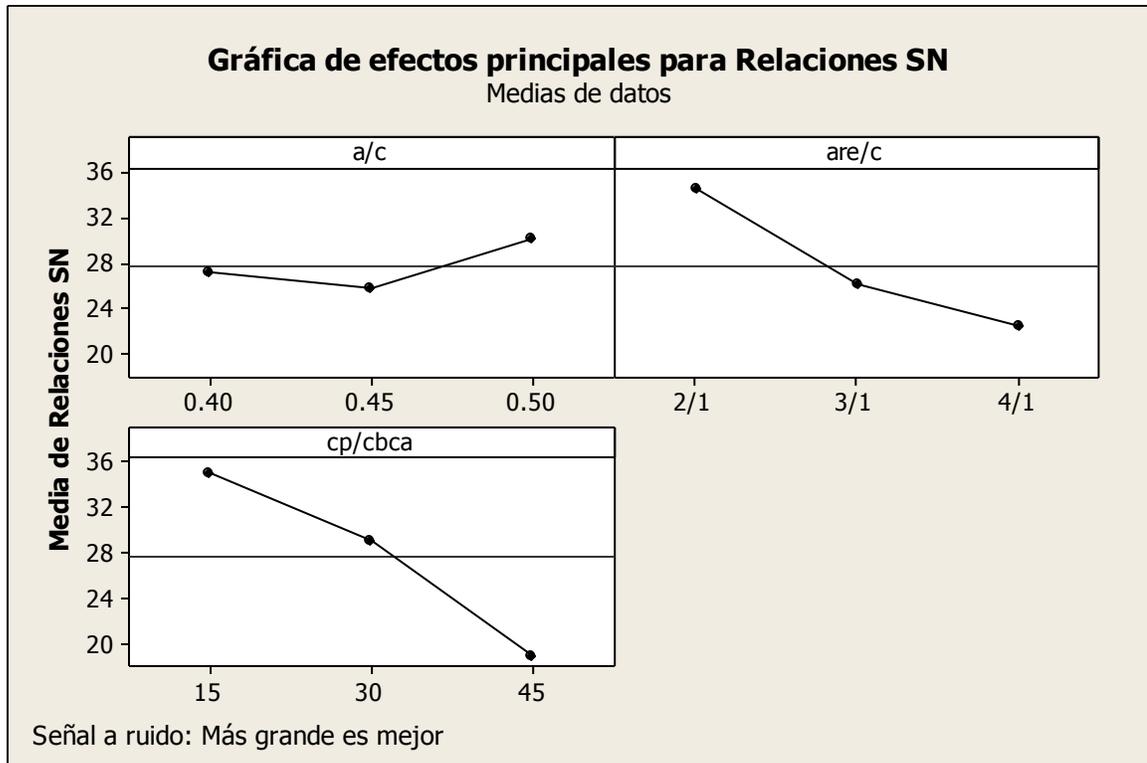


Figura 18. Efectos principales relaciones S/N para valores de resistencia a 56 días

Se observa en la Figura 18 que, para maximizar la resistencia es necesario utilizar el nivel más bajo de CP/CBCA: 15%, además el nivel más alto de a/c: 0.50 y el nivel más bajo para are/c: 2/1.

Estos resultan ser los niveles óptimos para llegar a la fórmula que permita obtener menor variabilidad y un incremento de las propiedades mecánicas de morteros de cemento sustituido por CBCA, esto se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados obtenidos para dosificación óptima

Dosificación óptima	
a/c	0.50
are/c	2/1
CP/CBCA	85/15

Es probable que a valores de 0.40 y 0.45 no se disponga de suficiente agua para las reacciones de hidratación del CP y la subsecuente reacción puzolánica.

7.4 Índice de actividad puzolánico (IAP)

El ensayo indica, según la Tabla 15, que la CBCA no posee un IAP aceptable, cuyo valor en todos los casos resultó siempre muy inferior a 75%.

Tabla 15. Resultados del Índice de actividad puzolánico de morteros a 28 días

Morteros	RMC 28 días (Mpa)	RMC 100% CPO	IAP (%)
C1	9.57	27.64	34.62
C2	1.72	18.57	9.28
C3	0.18	6.09	2.93
C4	5.05	22.94	22.02
C5	0.56	18.16	3.11
C6	2.02	9.72	20.79
C7	1.07	18.13	5.90
C8	7.28	16.08	45.28
C9	1.90	9.69	19.64

El mayor valor de IAP reportado corresponde al sistema C8, que contiene 15% de CBCA y una relación a/c de 0.50, que son los valores óptimos determinados previamente.

7.5 Resultados de resistencia a compresión de morteros are/CBCA sin tamizar

En la Tabla 16 se presentan los resultados de resistencia mecánica a la compresión de morteros de 100% CP y arena sustituida por CBCA sin tamizar a diferentes niveles.

Tabla 16. Resultados de resistencia mecánica a la compresión de morteros de 100% CP y arena sustituida por CBCA sin tamizar

Resistencia mecánica a la compresión (Mpa)							
Corrida	a/c	are/c	% CBCA	Edad de prueba (días)			
				7	14	28	56
C10	0.4	2/1	30	1.01 (2.78)	0.95 (5.01)	0.65 (2.29)	0.59 (2.62)
C11	0.4	3/1	60	NF*			
C12	0.4	4/1	90	NF*			
C13	0.45	2/1	60	NF*			
C14	0.45	3/1	90	NF*			
C15	0.45	4/1	30	NF*			
C16	0.5	2/1	90	NF*			
C17	0.5	3/1	30	NF*			
C18	0.5	4/1	60	NF*			

*NF: No Fraguó

En la Tabla 16, como se observa de C10 hasta C18, únicamente logró fraguar C10, obteniendo valores de resistencia a compresión prácticamente inútiles. Las demás corridas (C11-C18), por otro lado, al momento del desmolde se observó que el exceso de CBCA impidió que se desarrollara el fraguado de la mezcla. Al intentar extraer las

probetas de los moldes éstas se fraccionaron, por ello no fue posible medir su resistencia a compresión.

Por lo tanto, no resulta conveniente la realización de este ensayo ni la continuación de esta parte del estudio, ya que los porcentajes de sustitución propuestos, así como la relación a/c utilizada no contribuyeron o no resultaron benéficas para el desarrollo de las propiedades mecánicas de los morteros.

7.6 Resultados de las Pruebas de durabilidad

En la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos al medir la resistencia a compresión de los morteros con la dosificación óptima (15% CBCA, a/c: 0.50, are/c: 2/1) curados por 28 días.

Tabla 17. Resultados de resistencia a compresión de morteros con la fórmula óptima

	RMC (Mpa)
cubo1	15.33
cubo2	14.71
cubo3	13.37
cubo4	13.37
Promedio	14.20
Desviación	0.99

Puede observarse que la fórmula óptima presenta la mayor resistencia medida a 28 días.

7.6.1 Resultados de durabilidad frente al ataque por ión sulfatos

En la Tabla 18 se presentan los resultados de resistencia a compresión de morteros expuestos en solución de sulfato de magnesio hasta por 28 días.

Tabla 18. Resultados de RMC de probetas expuestas a sulfatos por 28 días

	RMC (Mpa)	%Aumento de RMC
cubo1	18.28	16.10
cubo2	17.83	17.50
cubo3	18.72	28.57
cubo4	19.17	30.23
Promedio	18.50	23.10
Desviación	0.58	7.33

Se observa de la Tabla 18 un aumento de resistencia de 23.10% para las probetas expuestas a sulfatos por 28 días. El mejoramiento de resistencia es atribuido a factores tales como: optimización de la formulación y por ende mayor impermeabilidad del mortero debido al refinamiento de la estructura de poros provocado por los productos de la reacción puzolánica y la consecuente reducción de la velocidad de difusión de los

iones agresivos en la matriz, disminución del contenido de $Ca(OH)_2$ liberado durante la hidratación de los silicatos de calcio de cemento por combinación con la ceniza; también se ha sugerido que en los cementos Pórtland con adiciones existen condiciones desfavorables para la formación de ettringita (3).

En la Figura 19 se observa el aspecto físico de los morteros expuestos a sulfatos por 28 días, se puede observar que los especímenes no presentan ningún tipo de deformación ni agrietamiento a simple vista.



Figura 19. Aspecto físico de morteros expuestos a sulfatos por 28 días

7.6.2 Resultados de Resistencia al fuego

En la Tabla 19 se presentan los resultados obtenidos de resistencia mecánica para los morteros después de ser expuestos a altas temperaturas.

Tabla 19. Resultados de resistencia mecánica a la compresión de morteros después de ser expuestos a 900°C

	RMC (Mpa)	% Reducción de RMC
cubo1	1.78	88.37
cubo2	1.34	90.91
cubo3	1.43	89.33
cubo4	1.52	88.67
Promedio	1.52	89.32
Desviación	0.19	1.13

En la Figura 20 se presenta el aspecto físico de morteros luego de la exposición a 900°C por 2 horas y su posterior enfriamiento por 12 horas.



Figura 20. Aspecto físico de los morteros después del tratamiento térmico a 900°C

Como se observa en la Figura 20, luego de la exposición a 900°C, las probetas quedan volumétricamente deformadas. La medición de resistencia a compresión comprueba su disminución de hasta un 89% (Tabla 19).

Posiblemente, una de las causas de la disminución de resistencia se debe a que, por encima de los 500°C se da la cristalización de $\beta\text{-C}_2\text{S}$, además se considera que la temperatura de 600°C es el límite práctico para mantener la integridad estructural del concreto hecho con CP (4)

7.7 Resultados de RMC de probetas cúbicas en Cinvestav Ramos Arizpe

En la Tabla 20 se presenta la nomenclatura empleada para pastas elaboradas con cemento Pórtland y ceniza de bagazo de caña de azúcar, así como para pastas patrones con 100% cemento Pórtland.

Tabla 20. Nomenclatura de pastas CP-CBCA y Patrón

Nomenclatura	
S1D3	Sistema 15%CBCA-85%CP día 3
S1D7	Sistema 15%CBCA-85%CP día 7
S1D14	Sistema 15%CBCA-85%CP día 14
S1D28	Sistema 15%CBCA-85%CP día 28
S2D3	Sistema 45%CBCA-55%CP día 3
S2D7	Sistema 45%CBCA-55%CP día 7
S2D14	Sistema 45%CBCA-55%CP día 14
S2D28	Sistema 45%CBCA-55%CP día 28
CPD3	Patrón 100%CP día 3
CPD7	Patrón 100%CP día 7
CPD14	Patrón 100%CP día 14
CPD28	Patrón 100%CP día 28

En la Tabla 21 se muestran los datos obtenidos de resistencia a la compresión de muestras ensayadas a 1, 3, 7, 14 y 28 días de curado para los cuales se seleccionaron 4 cubos por edad de ensaye, también se incluyen entre paréntesis los datos de desviación estándar. Es importante resaltar que se fabricaron pastas y no morteros (es decir no se utilizó arena de ningún tipo), esto es para facilitar los análisis siguientes tales como DRX, TG y ATD, en los cuales la SiO_2 proveniente de la arena puede dificultar la interpretación de los resultados

Tabla 21. Resultados de resistencia a la compresión de pastas de CP-CBCA y Patrón

Resistencia mecánica a la compresión (Mpa)								
Corrida	a/c	%CP	% CBCA	Edad de prueba (días)				
				1	3	7	14	28
S1	0.5	85	15	14.64 (1.16)	21.01 (0.8)	22.42 (2.48)	24.98 (1.56)	29.64 (1.5)
S2	0.84	55	45	4.25 (0.7)	9.3 (0.46)	10.47 (0.6)	13.08 (1.06)	14.58 (0.37)
Patrón	0.5	100	0	17.53 (1.37)	22.53 (2.12)	24.65 (3.01)	25.08 (1.81)	29.56 (2.08)

Como puede observarse en la Figura 21 a edades tempranas de curado entre los 1 y 7 días las muestras patrones con una relación a/c de 0.5 alcanzaron valores de resistencia mecánica por encima de las pastas compuestas con 15% de CBCA siendo de 17Mpa, 22 Mpa y 24.5 Mpa mostrando un comportamiento superior al del sistema con 45% de CBCA para todas la edades de estudio. Durante el progreso de la reacción de hidratación se pudo notar como el sistema con 15% de CBCA alcanzó aproximadamente un 2% de ganancia de resistencia mecánica entre los 7 y 14 días, logrando así igualar las resistencias de las pastas con 100% CP (25 Mpa), manteniendo la misma tendencia hasta los 28 días reportándose resistencias de 29.6 en el sistema con 15% CBCA y 29.5 en el patrón.

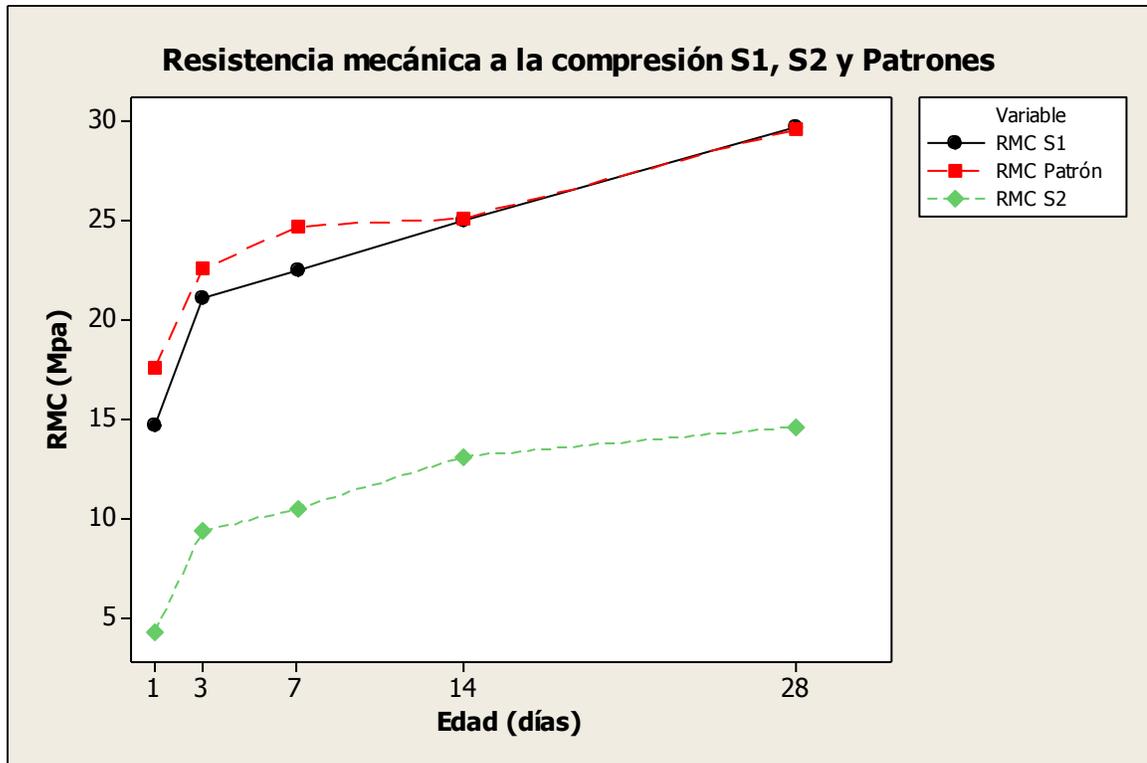


Figura 21. Desarrollo de la resistencia a la compresión de pastas de CP-CBCA y Patrón

Aunque con el sistema con 45% cenizas se obtuvieron resistencias bajas es importante destacar que sí hubo progreso en cuanto a desarrollo de resistencia mecánica entre los 1 y 14 días siguiendo posteriormente un comportamiento constante después de los 14 días de curado manteniendo resistencia entre los 13 y 14 Mpa.

7.8 Resultados de Microscopia Electrónica de Barrido

A continuación se muestran los resultados de las microestructuras de muestras selectas a 7, 14 y 28 días de curado analizadas a 250, 500 y 1000 aumentos obtenidas mediante electrones retrodispersados, de acuerdo al principio de la técnica es posible distinguir por su orden de brillantez proporcional al número atómico promedio de la zona irradiada las fases correspondientes (4) en donde las áreas más brillantes son zonas de cemento sin reaccionar, las zonas grises productos de reacción, y finalmente las zonas más negras perteneciente a los poros.

Al comparar ambos sistemas en la Figura 22 puede observarse que en el sistema S1D7 existe la presencia de varios granos de cemento parcialmente hidratado esto pudo observarse claramente en la micrografía a 250 aumentos a excepción del sistema S2D7 que es muy pobre la presencia de granos de cemento. En el sistema con S2D7 se aprecia una gran cantidad de partículas de cenizas en contraste al sistema con S1D7 pudiéndose distinguir por su morfología irregular, esto es de esperar debido a las diferencias en porcentajes de sustitución de cenizas en ambos sistemas. En la micrografía a 500 aumentos puede notarse que una partícula original de cemento anhidro reaccionó

completamente y es identificada por su tono de gris, habiendo sido verificado mediante análisis puntual por Espectroscopia por dispersión de Energía (EDS).

PTR Partícula totalmente reaccionada de CP

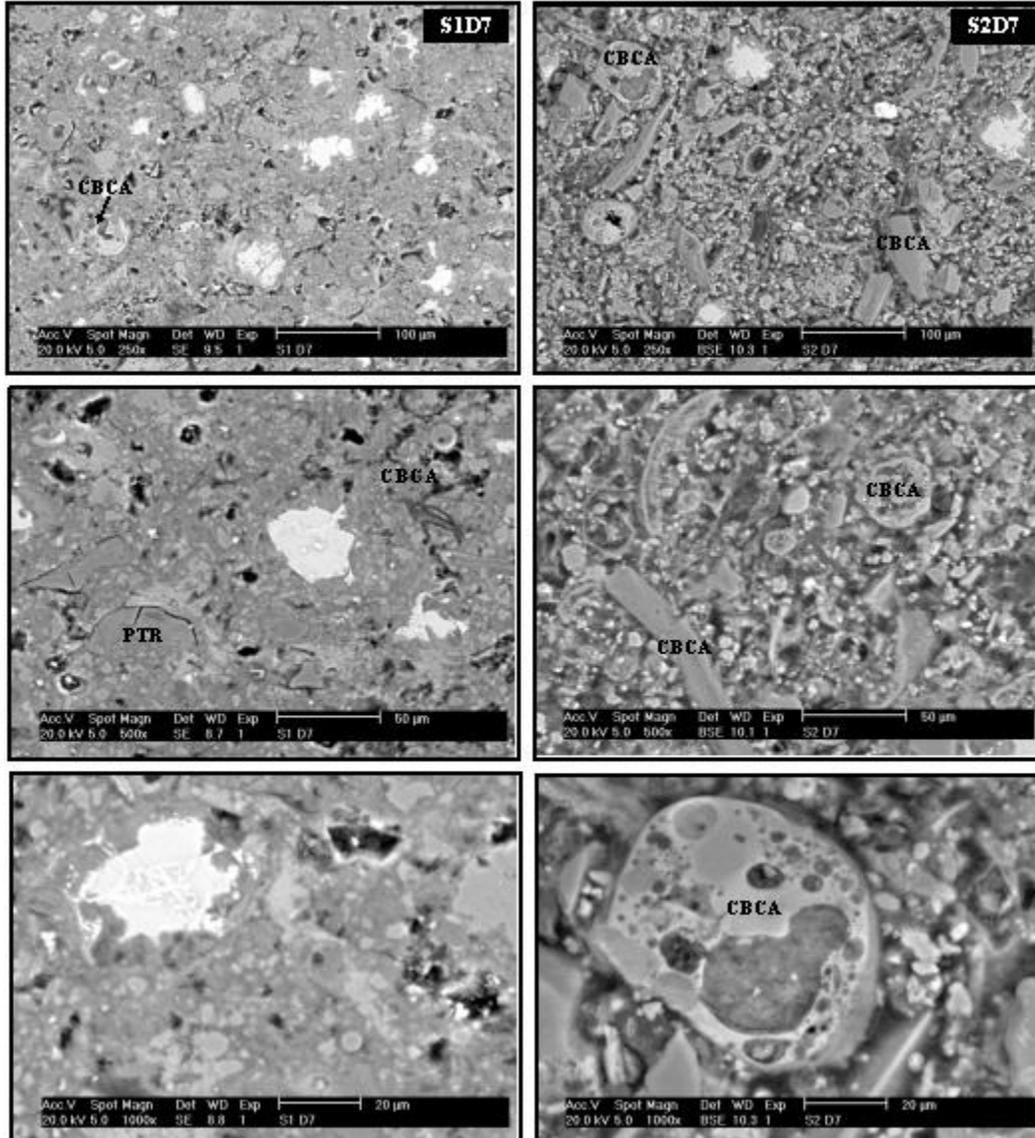


Figura 22. Microestructura de pastas de CP-CBCA a 7 días

La Figura 23 presenta las micrografías para muestras selectas a 14 días de curado para ambos sistemas. Para el sistema con 15% de cenizas a las magnificaciones de 250 y 500 puede notarse la presencia de granos de cemento parcialmente reaccionado con lo cual puede verificarse la evolución de la reacción de hidratación con el tiempo (4); sin embargo, al observar la micrografía a 250 aumentos solamente se logra identificar un grano de cemento parcialmente reaccionado, en el sistema con 45% de cenizas a mayores magnificaciones no se pueden encontrar pero si puede observarse una gran cantidad de cenizas sin reaccionar. Igualmente puede notarse como el sistema con 15% cenizas posee una matriz más densa y compacta comparado con el sistema con 45% de cenizas.

A Anillos de reacción del cemento Pórtland

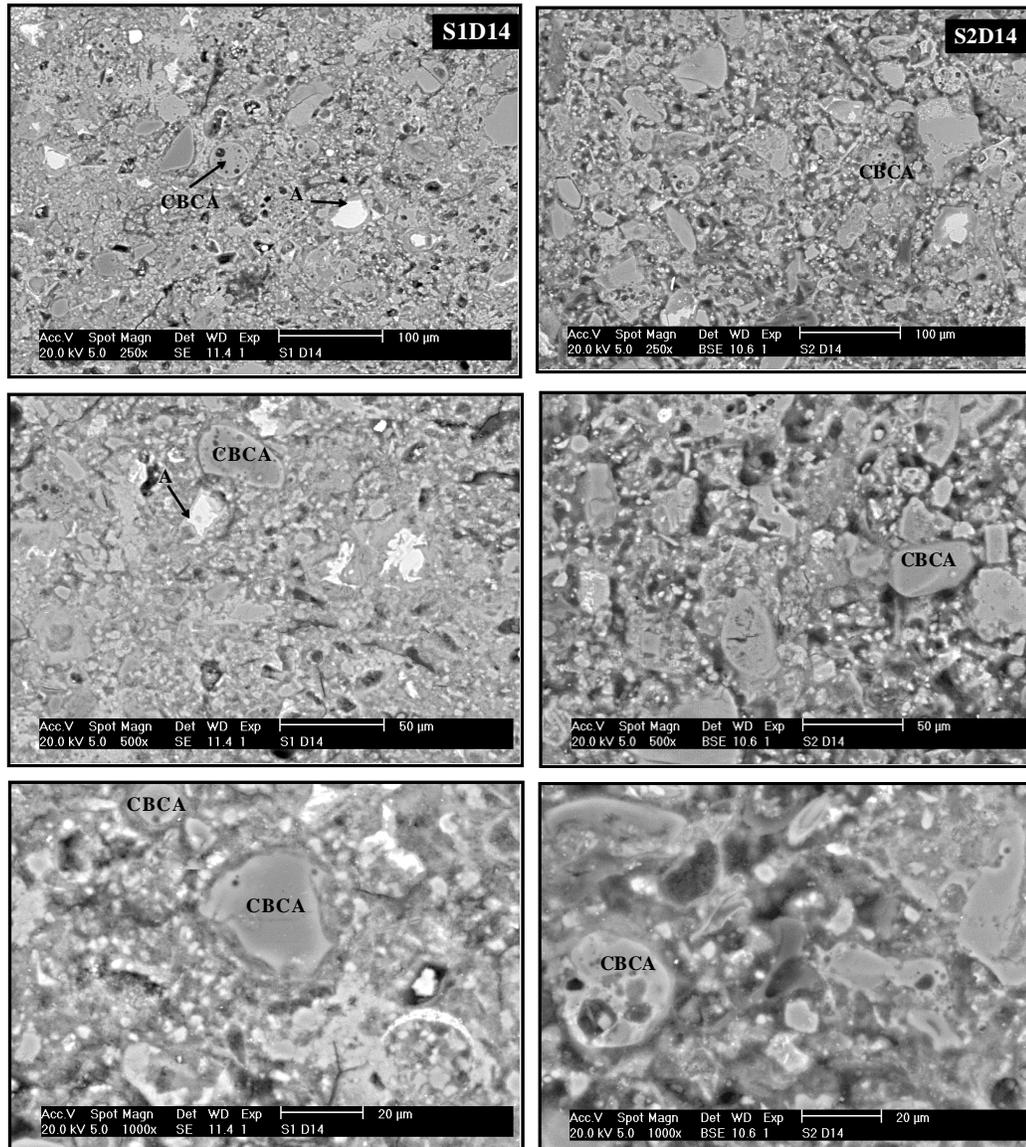


Figura 23. Microestructura de pastas de CP-CBCA a 14 días

En la Figura 24 se presenta la microestructura para una muestra con 15% CBCA curada a 28 días, el análisis de Espectroscopia por Dispersión de Energía (EDS) indica que los productos internos y externos poseen un alta concentración en Ca, Si con lo que puede asumirse la formación de gel silicato de calcio hidratado (*CSH*). La presencia de granos de cemento parcialmente hidratados y de partículas de cenizas indica que no todo el $Ca(OH)_2$ está participando en la reacción y que por tanto la reacción aún no ha finalizado a los 28 días.

Al comparar los resultados de las micrografías con los resultados de resistencia a la compresión puede asumirse que el incremento en resistencia aun a los 28 días se debe al

ligero progreso de la reacción puzolánica y es de esperarse que aun después de los 28 días puedan darse ganancias de resistencia mecánica debido a que todavía faltan granos que no han reaccionado completamente con la sílice reactiva de las cenizas.

Para distinguir las zonas analizadas en las microestructuras éstas se representan de la siguiente manera:

- Partícula de CP anhidra
- Partícula de CBCA
- PI: productos de reacción formados dentro de las fronteras de granos de cemento parcialmente hidratado (anillos de reacción) llamados productos internos.
- PE: productos de reacción fuera de la frontera correspondiente a los productos que conforman la matriz, llamados productos externos.

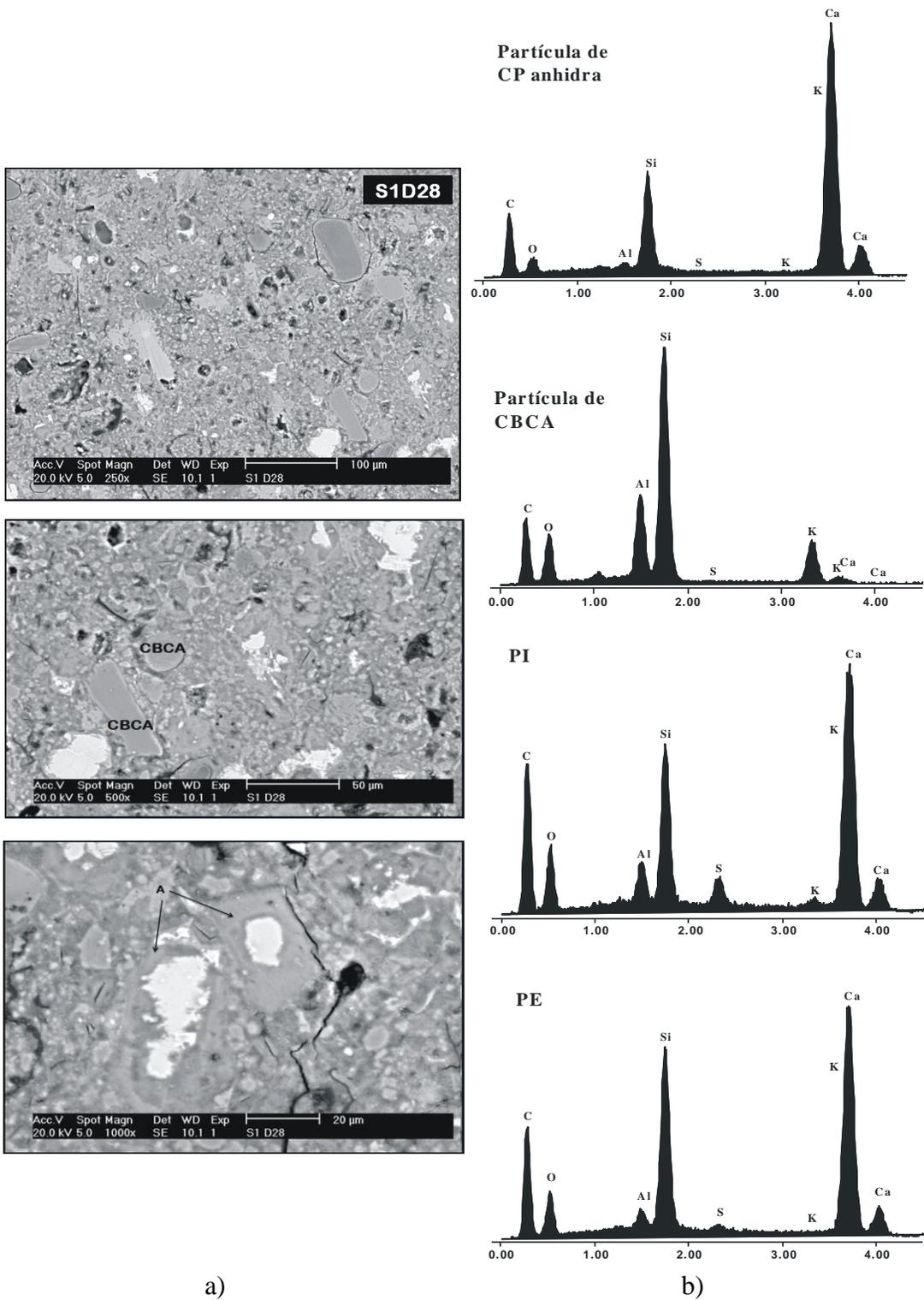


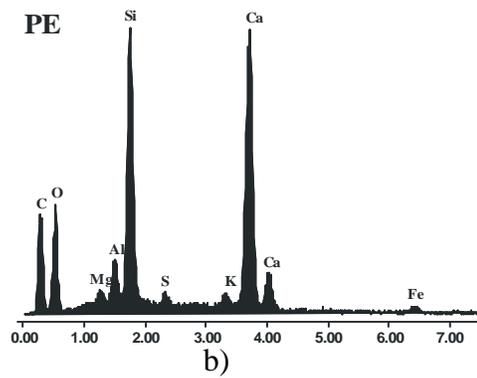
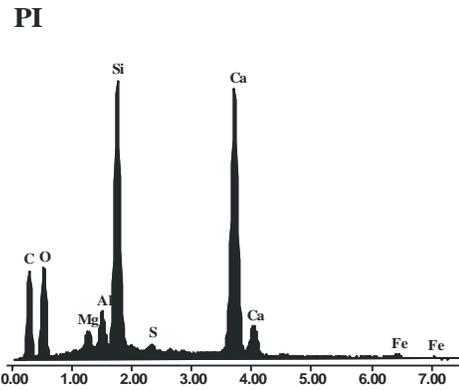
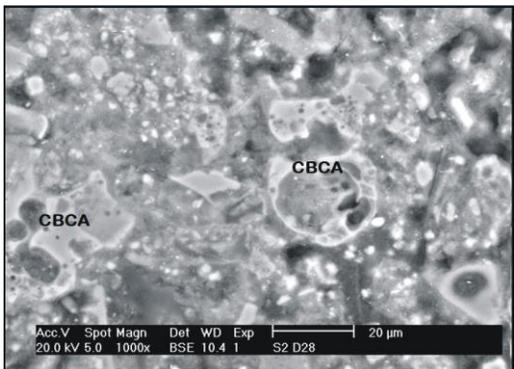
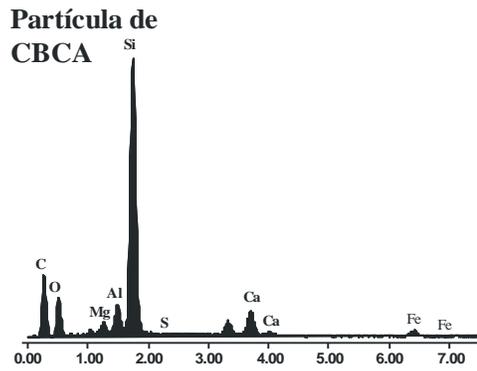
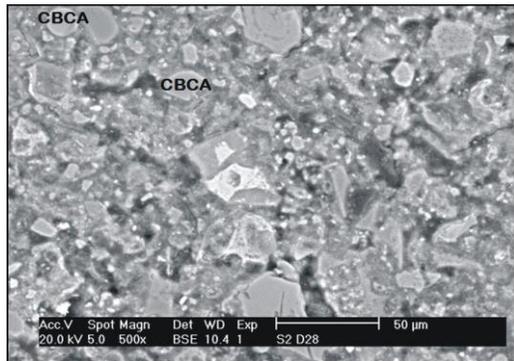
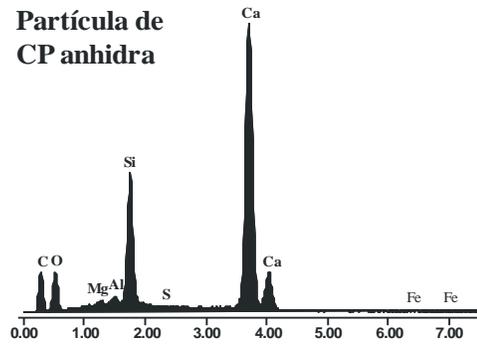
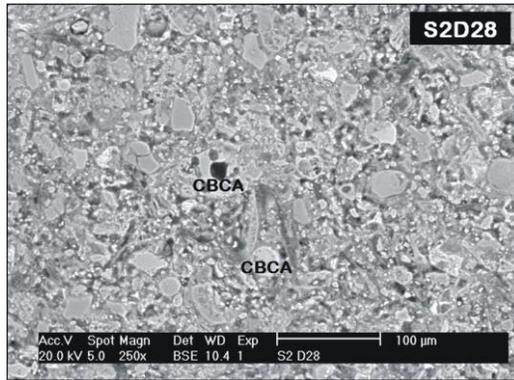
Figura 24. Pasta 85%CP-15%CBCA a 28 días: a) micrografía y b) espectros

En las micrografías que se presentan en la Figura 25 puede notarse claramente como en el sistema con 45% de cenizas no existe variación en la brillantez de las fotos y puede por tanto decirse que la reacción de hidratación del CP finalizó quedando así sin suministro

de $Ca(OH)_2$ para que pudiera seguir ocurriendo la reacción puzolánica, a esto se debe la presencia de una gran cantidad de partículas de cenizas sin reaccionar; esto puede distinguirse a todas las magnificaciones y por tal razón a todas las magnificaciones no pueden distinguirse granos de cemento parcialmente reaccionados.

Estos resultados concuerdan con los resultados de resistencia a la compresión donde prácticamente no se registra ganancia mecánica a los 28 días de curado esto debido a que la microestructura de dicho sistema está conformado en su mayor parte por cenizas las cuales por sí mismas no posee ningún valor cementante (4) de acuerdo a definiciones de materiales puzolánicos.

Las micrografías de las muestras estudiadas a 28 días de curado indican que para el sistema con 45% CBCA no es de esperarse desarrollo de resistencia mecánica después de dicha edad de curado caso contrario al sistema con 15% CBCA , debido a que la matriz está compuesta principalmente por partículas de cenizas sin reaccionar por el contrario el sistema con 15% CBCA está compuesta por una matriz más densa y compacta en la que existen ciertos granos de CP parcialmente hidratado y partículas de cenizas entre los cuales es de esperarse siga progresando la reacción puzolánica después de los 28 días de curado.



a)

b)

Figura 25. Pasta 55%CP-45%CBCA a 28 días: a) micrografía y b) espectros

Microestructuras de Ettringita

En la Figura 26 y Figura 27 se presentan las fotomicrografías de partículas de ettringita, a la par se muestra el análisis por Espectroscopia por Dispersión de Energía (EDS), distinguiéndose por su morfología en forma de agujas hexagonales, éstas se encontraron alojadas en los poros de las muestras. Su formación en las muestras se debió principalmente a la reacción entre el aluminato de tricálcico presente con el sulfato de calcio del cemento Pórtland. Además en la Figura 27 se puede observar la presencia de partículas de portlandita distinguiéndose por su morfología en forma de cristales hexagonales.

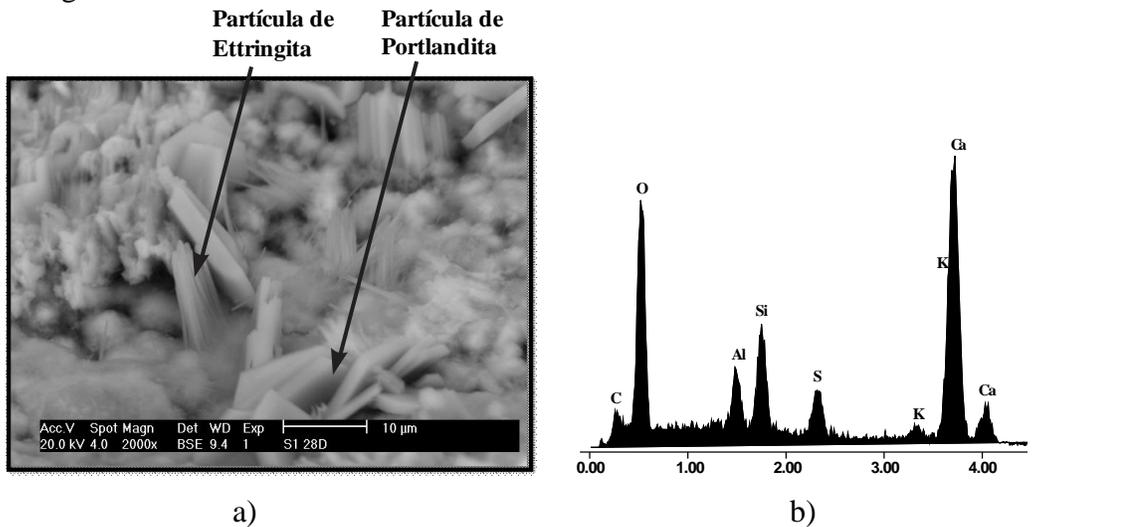


Figura 26. Sistema con 15% CBCA-85%CP a 28 días: a) micrografía y b) espectro de Ettringita

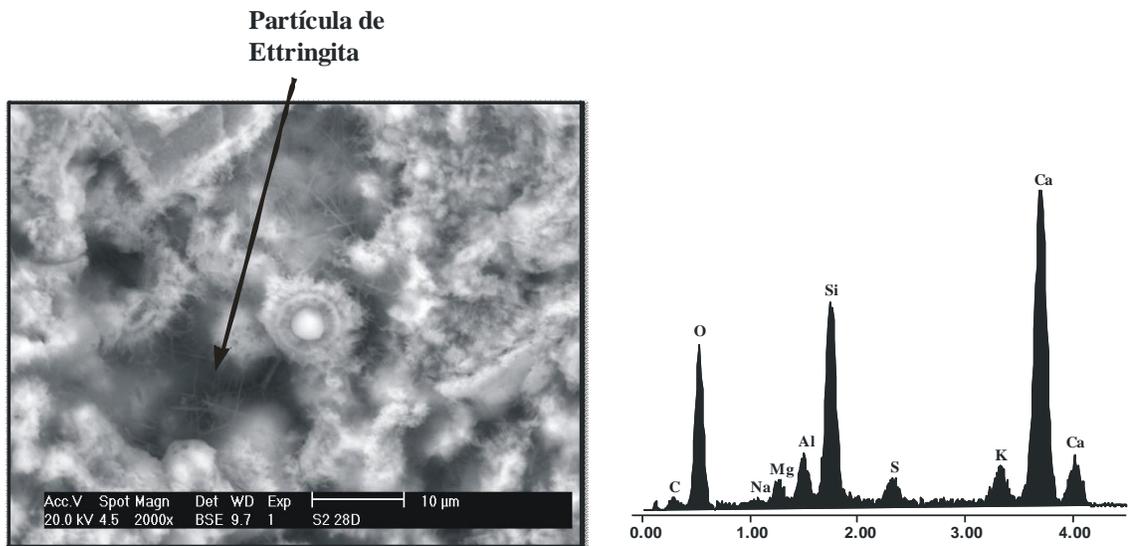


Figura 27. Sistema con a) 45% CBCA-55%CP a 28 días: a) micrografía b) y b) espectro de Ettringita

7.9 Microanálisis EDS

Los análisis puntuales fueron hechos sobre las muestras S1D28 y S2D28. El objetivo del análisis se basó en la determinación de la composición de los productos de reacción internos y externos.

Cabe señalar que la técnica EDS puede incurrir en errores durante la medición de la composición química local. Esto se debe a que la sección de la zona de análisis se realiza visualmente en la imagen por electrones retrodispersados; sin embargo, la señal de rayos X originada de la muestra proviene de una zona más profunda que la visualizada en la imagen, y es posible que el volumen de excitación incluya otras fases no visualizadas en la imagen seleccionada, esto se ilustra en la Figura 28. Este tipo de error es involuntario y no se puede controlar; la única forma de intentar reducir esta fuente de ruido es mediante la obtención de un número representativo de microanálisis en diferentes zonas de la muestra.

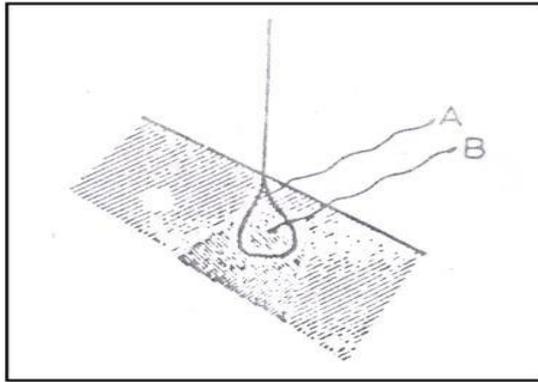


Figura 28. Situación en la cual puede ser obtenida una falsa impresión en la composición local

Los resultados del análisis puntual se presentan para ambos sistemas (15% y 45% CBCA) y se representan mediante diagramas ternarios composicionales en términos del porcentaje atómico de Ca-Si-Al. Se realizaron 18 microanálisis tanto a los productos externos como internos. Se agregaron en ambos diagramas las composiciones teóricas de los cementos compósitos y de los productos de hidratación.

Las relaciones promedios de Si/Ca de productos internos y externos de 0.6 y 1.1 respectivamente demuestran que si hubo formación de gel *CSH*. Esto se demuestra considerando que según estudios hechos sobre la estructura del *CSH* por medio de análisis de microsonda electrónica (5) (6) y termogravimetría (7) indican que las relaciones Si/Ca varían entre 0.5 y más de 1.7 y que en general se acepta que el gel *CSH* en cemento Portland varíe en el rango de 0.5-0.6 (8).

La Figura 29 corresponde al diagrama ternario para el sistema con 15% CBCA. En la Figura 29 se aprecia como los productos internos (PI) se encuentran de forma agrupada orientados en la zona rica al Ca en cambio los productos externos (PE) se encuentran más dispersos presentando una composición diferente, con lo que se puede asumir que existe

la formación de más de un producto externo en donde un grupo es algo similar a los productos internos por estar ubicado cerca de la zona rica en Ca y otros orientados a la zona rica en Si (es importante señalar que en este caso es posible que no se trate de un producto de reacción sino de ceniza que se detectó durante el análisis, esto considerando el error de la técnica).

Puede observarse la variabilidad que existe entre la composición química de los productos internos y externos respecto a la composición nominal o teórica del cemento compuesto. También puede observarse que los productos internos poseen una relación más íntima con la composición química del gel *CSH* (tobermorita) que los productos externos; y que en las zonas en las cuales se realizaron los análisis puntuales no se detectó ninguna relación de la ettringita y la kuzelita entre los filamentos de *CSH* que componen los productos internos y externos; esto se asume debido a la lejanía que existe entre los productos internos y externos con el eje Ca, Al que los contiene. Igualmente no se detectó relación alguna de los compuestos de calcita ($CaCO_3$) y portlandita ($Ca(OH)_2$) con los productos de reacción internos y externos mediante este análisis.

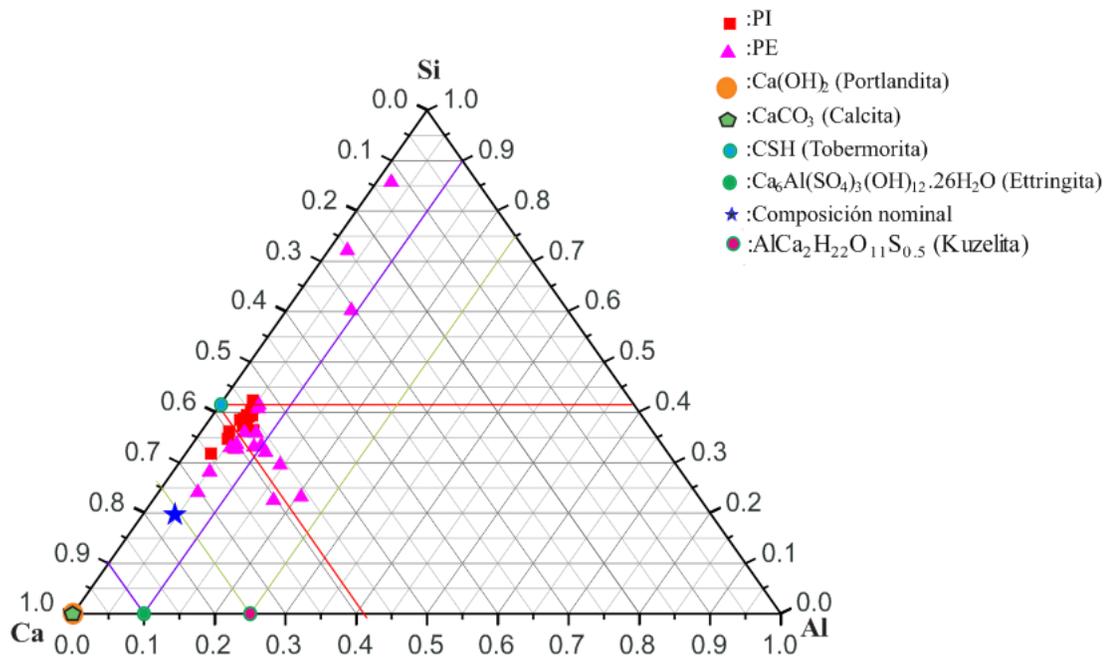


Figura 29. Diagrama ternario sistema 15%CBCA-85%CP

La Figura 30 corresponde al análisis puntual para el sistema con 45%CBCA. De acuerdo a la Figura 30 existe una composición similar entre los productos internos y externos, sus relaciones promedio de Si/Ca demuestran lo dicho siendo de 0.82 y 0.81 lo que demuestra la formación de gel *CSH* para productos internos y externos. Los productos de reacción internos y externos muestran una mayor composición de Ca y Si respecto a su ubicación en el diagrama composicional con pequeñas fracciones de Al, sin embargo con

algunos puntos que se encuentran separados se puede asumir que existe otro tipo de producto externo.

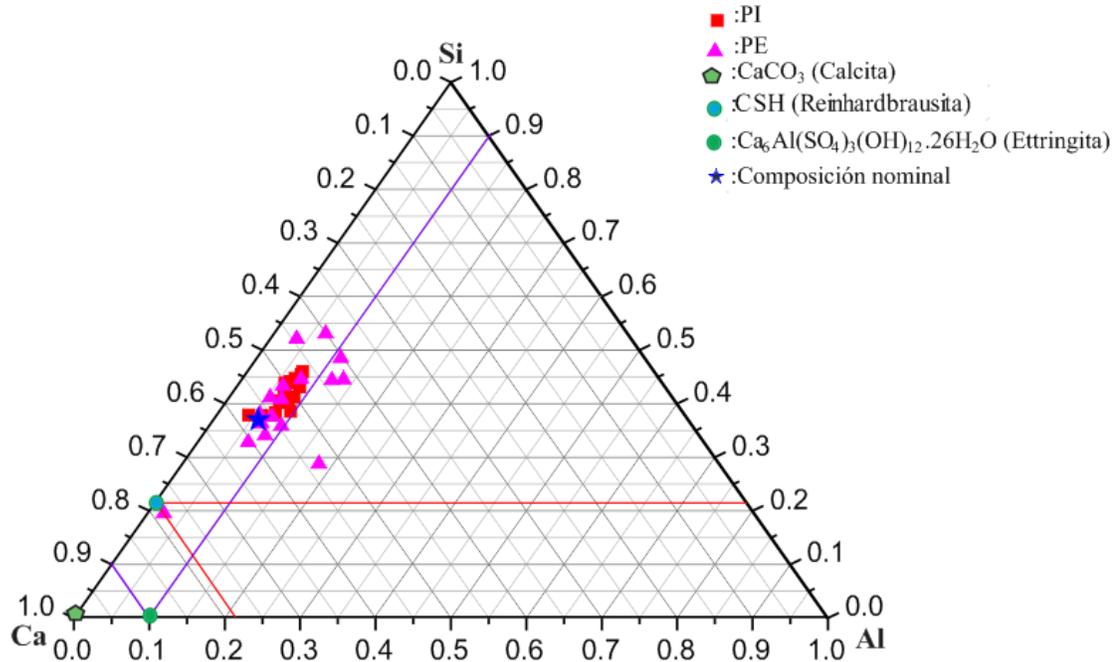


Figura 30. Diagrama ternario sistema 45% CBCA-55% CP

Puede observarse la cercanía que existe entre la composición nominal o teórica con los productos internos y externos, esto indica que su composición es muy similar a la composición nominal. Sin embargo por la lejanía del punto que indica la presencia de gel *CSH* (Reinhardbrausita) con los productos internos y externos se puede asumir que las zonas analizadas contenían poco de esta fase. Además puede notarse que no existe ninguna relación de la ettringita con la composición química de los productos internos y externos.

7.10 Resultados de DRX

En la Figura 31 se muestran los resultados de DRX de la CBCA, cemento Pórtland y de los sistemas con 15% y 45% de cenizas, respectivamente. De acuerdo a esta figura, la ceniza de caña muestra una estructura amorfa, donde se distingue la presencia de fases cristalinas tales como albita ($Na(AlSi_3O_8)$) y cristobalita (SiO_2), mientras que los picos del cemento Portland demuestran mayor cristalinidad con la presencia de Calcita ($CaCO_3$), Alita (Ca_3SiO_5), Yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), Belita (Ca_2SiO_4), Aluminato tricalcico ($Ca_3Al_2O_6$) y Ferrita (Ca_2AlFeO_5). En ambos sistemas hidratados, la calcita y ettringita se encuentran presentes en todas las muestras obtenidas a 7, 14 y 28 días. Puede observarse, la disminución de los picos de portlandita ($Ca(OH)_2$) en $2\theta=34.1, 18.06, 47.1, 50.82, 28.68$ y 54.5° indicando que reacciona con el agua (H_2O) y la sílice (SiO_2) produciendo

un silicato cálcico hidratado (CSH_I) distinto al generado durante el fraguado del cemento Portland (CP) (11), mientras ocurren reacciones puzolánicas (6). A diferencia del sistema con 45% CBCA, la cristalinidad no aumenta con el transcurso del tiempo de curado y la poca señal de difracción de la portlandita en $2\theta=18.08$ y 34.13° es muy notoria; de hecho, a los 28 días su presencia es prácticamente nula, probablemente esta se consumió para formar calcita ($CaCO_3$) al haber reaccionado con el CO_2 de la atmósfera, en cambio, muy poco participó en la formación del CSH esto puede verificarse por medio de los resultados de resistencia a compresión donde a edades entre 14 y 28 días no se reportó incrementos significativos en la resistencia mecánica de las pastas con 45% CBCA. Es importante mencionar que en las muestras no es de esperarse encontrar un solo tipo de CSH puesto que su composición química es muy variada y cambia con el tiempo. Por lo tanto, el tipo de CSH formado durante la reacción puzolánica es dependiente de la relación calcio/sílice (Ca/Si) que se encuentra en el material.

En el sistema con 15% CBCA, se encontraron las fases de tobermorita y nekoita cuyas reflexiones principales se encuentran en $2\theta=29.50, 49.92^\circ$ y $2\theta=9.72, 29.50, 49.70^\circ$, respectivamente. Otros tipos de CSH encontrados fueron afwillita cuyas reflexiones principales están entre $2\theta=28.07, 31.56$ para el sistema S1D7, clinotobermorita con reflexiones principales en $2\theta=29.08, 29.66$ para el S1D14.

La identificación del CSH en las muestras del sistema con 45% CBCA resultó más compleja pudiéndose encontrar la formación del gel CSH llamado reinhardbraunsita cuyas reflexiones principales se ubican en $2\theta=29.41, 32.25$ y 47.41° , la presencia de la portlandita es importante puesto que esta fase es responsable de reaccionar con la sílice presente para formar el compuesto neutro de CSH , el cual confiere las propiedades mecánicas de compresión adecuadas; por lo tanto, sin su presencia durante el curado, la resistencia a la compresión disminuirá paulatinamente con el incremento de la sílice en la relación Ca/Si .

Es importante mencionar que la detección del gel CSH por la técnica de difracción de rayos X resulta difícil dado que se trata de un compuesto pobremente cristalino. En el caso de la calcita y ettringita no encontraron cambios notorios en los picos de difracción durante los 28 días de curado para ambos sistemas.

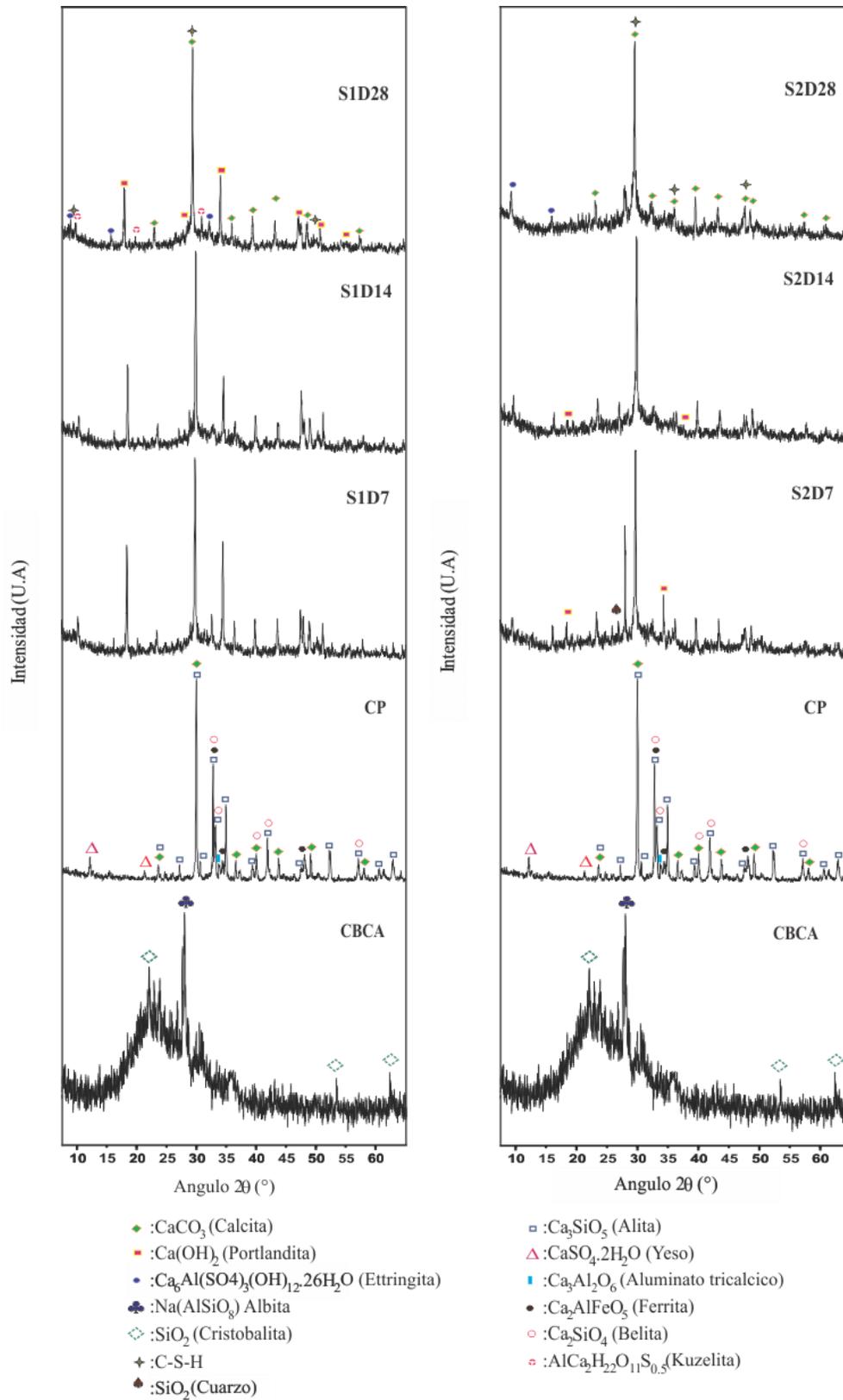


Figura 31. Patrones de DRX de pastas de CBCA-CP hidratadas, CP anhidro y CBCA

7.11 Resultados de análisis térmico

La Figura 32 muestra los Termogramas obtenidos para muestras de cemento Pórtland puzolánico curadas a 3 y 28 días, así como, el termograma obtenido de una muestra patrón con cemento Pórtland; las curvas de color rojo indican el análisis termogravimétrico (ATG) cuya información permite cuantificar y evaluar las pérdidas de peso que sufre la muestra con la temperatura (9). Las curvas de color azul indican el análisis térmico diferencial (ATD) que permite identificar los rangos de temperatura en los cuales ocurren las transformaciones de las fases presentes (9).

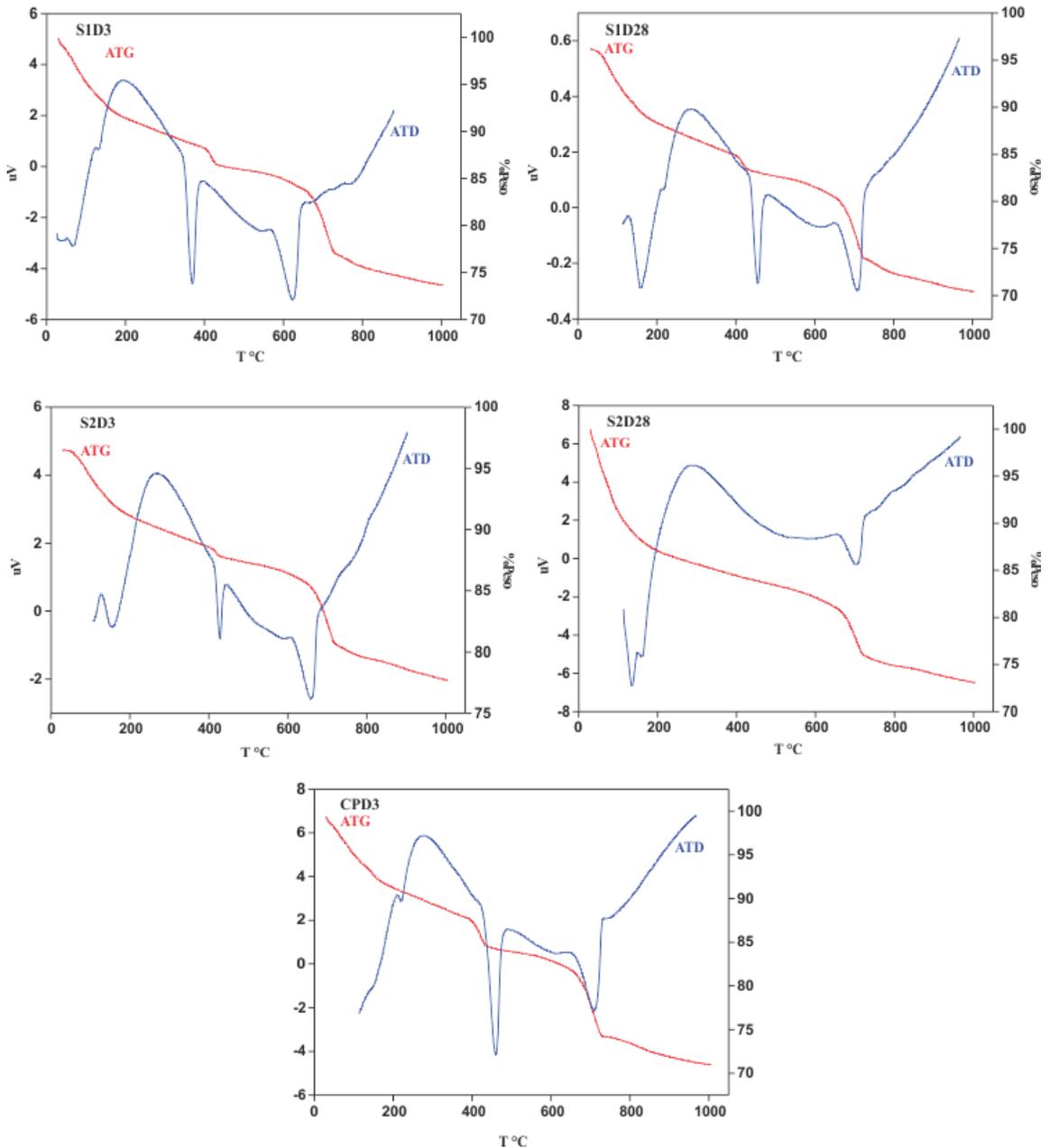
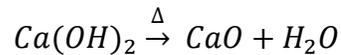


Figura 32. Termogramas de los sistemas S1D3, S1D28, S2D3, S2D28, CPD3

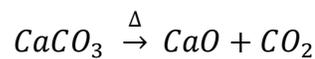
Para la interpretación de los resultados debe partirse de los siguientes aspectos:

Al calentar muestras de pasta de cemento Pórtland se producen dos descomposiciones identificables en las curvas del ATG.

La primera de ellas, entre los 450 y 600 °C, aproximadamente que corresponde a la descomposición del $Ca(OH)_2$ mediante la reacción:



La segunda transformación ocurre entre los 700 y 900 °C y corresponde a la descomposición del $CaCO_3$ a través de la siguiente reacción:



Además del agua perdida entre 20 y 110°C, perteneciente al gel *CSH*; y la pérdida de peso entre 150 y 350°C correspondiente a la descomposición de la Ettringita.

Las pérdidas de peso de la portlandita se atribuyen a la pérdida de agua por efecto de la temperatura. Conocida la cantidad de agua que se evapora también se puede conocer la cantidad de portlandita que la contenía y, del mismo modo, se puede obtener la cantidad de carbonato de calcio a partir de la pérdida de dióxido de carbono.

En los termogramas de la Figura 32 (S1D3) y Figura 32 (S1D28) se observó pendientes que indican pérdidas de peso entre los 400 y 450°C y entre 600 y 800°C por tanto puede asumirse que esas pendiente pertenece a la descomposición de la portlandita y calcita de acuerdo a lo mencionado anteriormente.

Según el análisis térmico diferencial los picos obtenidos en los rangos de 400 y 450 °C y 600 y 800 °C que corresponden a la descomposición de la portlandita y calcita indican que la descomposición se lleva a cabo mediante procesos endotérmicos en los cuales las muestras absorben calor, no se logra distinguir diferencia alguna en el escalón de la calcita pero si una disminución en el escalón de la portlandita lo que permite entender el consumo del hidróxido de calcio que participa en las reacciones puzolánicas con la sílice de la CBCA.

Es importante destacar que por medio del análisis de DRX y MEB se logró identificar los compuestos de portlandita, ettringita, gel *CSH*, y carbonato de calcio, este último formado por la reacción del hidróxido de calcio (portlandita) con el dióxido de carbono de la atmósfera, produciendo carbonato cálcico y agua, proceso conocido como carbonatación (10).

Además puede observarse en la Figura 32 (S1D3) y Figura 32 (S1D28) la formación de picos entre los 50 y 150°C y los 150 y 250 °C posiblemente pertenecientes a la pérdida de

peso del gel *CSH* y Ettringita, se identifica a los 28 días que el pico del gel *CSH* se hace más endotérmico lo que indica que a mayor edad, para descomponerse requiere absorber más energía, el pico de la ettringita no sufrió ningún cambio. Esto evidencia que la energía de enlace en el gel *CSH* aumenta al avanzar la edad de curado.

La Figura 32 (S2D3) y Figura 32 (S2D28) muestran las curvas obtenidas de los análisis de ATD y ATG para muestras con 45% cenizas. Igualmente se obtuvieron pendientes entre los 400 y 450°C y entre los 600 y 800°C pertenecientes a la portlandita y calcita, respectivamente. Al observar ambas figuras pudo notarse que el pico ubicado entre 400 y 450°C del ATD desaparece por completo a los 28 días esto indica que todo el contenido en $Ca(OH)_2$ se agotó. Así mismo se observa la desaparición del escalón que pertenecía a la portlandita en la curva de ATG esto concuerda con los resultados de difracción de rayos X en los cuales no se reportó la presencia de hidróxido de calcio en las muestras analizadas a 28 días, además puede notarse la influencia de la desaparición de la portlandita sobre el pico endotérmico de la calcita mostrándose a los 28 días más pequeño puede asumirse que el proceso de descomposición de esta fase absorbe menos energía.

Resulta interesante que el escalón del $Ca(OH)_2$ a los 3 días sea tan pequeño quiere decir que existe poca disponibilidad del $Ca(OH)_2$ para que ocurran las reacciones de hidratación del cemento Pórtland y las reacciones puzolánicas, esto concuerda con los resultados de difracción donde se encontraron pocos picos de difracción de $Ca(OH)_2$ con poca intensidad a edades de 7 y 14 días de curado

Como era de esperarse, el escalón para la portlandita ubicado entre 400 y 450°C en la Figura 32, (CPD3) es más grande comparado con las pastas adicionadas con CBCA, reacción que ocurre mediante un proceso endotérmico, igualmente así para el escalón de la calcita ubicado entre 600 y 800°C.

En la Tabla 22 se presentan los porcentajes de agua y dióxido de carbono evaporable, así como el contenido inicial de hidróxido de calcio y carbonato de calcio.

Tabla 22. Concentraciones iniciales en % peso del $Ca(OH)_2$ y $CaCO_3$

Sistema	%H ₂ O	%Ca(OH) ₂	%CO ₂	%CaCO ₃
S1D3	1.5	6.167	6.5	14.773
S1D28	1	4.111	6.5	14.773
S2D3	0.5	2.055	5	11.364
S2D28	0	0	6	13.636
CPD3	5.5	22.611	7.5	17.045

VIII. CONCLUSIONES

Con base en las pruebas realizadas y de acuerdo a los resultados obtenidos puede concluirse que:

De acuerdo al análisis mineralógico las CBCA sin reaccionar se consideran un material predominantemente amorfo con algunas fases cristalinas tales como albita y cristobalita como producto de las altas temperaturas de combustión en las calderas.

El mayor índice de actividad puzolánica de las CBCA para los morteros CP/CBCA es de 45%, muy inferior al 75% aceptable. Por lo tanto, según este resultado las CBCA no pueden considerarse como un material apto para la producción de morteros puzolánicos.

La sustitución de CP por CBCA en los niveles 15, 30 y 45% resultan en un detrimento de las propiedades físico-mecánicas de los morteros fabricados a medida que aumenta el % de sustitución.

Según la fórmula óptima, obtenida de acuerdo al análisis estadístico, se tiene que un 15% de sustitución de CBCA, relación a/c de 0.50 y are/c de 2/1, resulta en morteros de mayor resistencia mecánica. Esto pudo comprobarse al obtenerse una mayor resistencia a 28 días (14.20Mpa) en comparación con el mayor valor de resistencia de los morteros CP/CBCA a 28 días según diseño de experimentos (9.57Mpa).

La resistencia obtenida para la formulación óptima supera la establecida en la NTON 12 008-09 "Fabricación de bloques de concreto", sin embargo, la relación arena/cemento utilizada (2/1) hacen inviable económicamente esta formulación, pues en la práctica se utilizan mayores relaciones de arena/cemento.

La sustitución de arena tradicional por CBCA sin tamizar en los niveles 30, 60 y 90% no resultó benéfica para las propiedades mecánicas de los morteros fabricados. Por ello, no resultó conveniente la continuación de esta parte del estudio.

La dosificación óptima sometida a ataque por ión sulfato resultó en un incremento de resistencia a compresión. Esto puede explicarse debido a que la disminución del Ca(OH)_2 por el progreso de la reacción puzolánica disminuye y retarda la corrosión de carácter ácido que provocan los sulfatos.

Las altas temperaturas a las que fueron sometidos los morteros de la fórmula óptima, presentaron una reducción de resistencia a compresión de 89%. Posiblemente ocasionado por un efecto combinado de la contracción de la matriz asociada con la deshidratación de los productos de reacción, y las diferencias en expansión térmica entre el cementante y los agregados, induciendo el macrofisuramiento del material a temperaturas de exposición superiores a los 600 °C. Por lo tanto, estos morteros no resultan benéficos para aplicaciones donde la resistencia a altas temperaturas es importante.

Los tiempos de fraguado incrementan al aumentar el % CBCA, debido a que las reacciones de hidratación son mucho más lentas para cementos puzolánicos. Para pastas con un 45% de sustitución el tiempo de fraguado final es mucho mayor (6.6 h) comparado con 4.9 h para pastas con un 15% de CBCA y 5.1 h para pastas 100% CP.

El tamaño de partícula de las CBCA influye negativamente en la trabajabilidad y demanda de agua de las mezclas tanto de morteros como de pastas, por ende, en la ganancia de resistencia mecánica.

Los análisis de DRX demuestran la formación de productos de gel *CSH*, ettringita y portlandita; verificado por medio de microanálisis puntual que mostró concentraciones mayoritarias de Ca, Si.

En las microestructuras se observó el mecanismo de reacción en estado sólido debido a la presencia de anillos de reacción alrededor de los granos de cemento. También pudo observarse la morfología de partículas de CBCA donde su gran porosidad representa la principal razón del alto requerimiento de agua para la elaboración de las pastas.

Las observaciones de las microestructuras del sistema con 45% CBCA mostraron mayor cantidad de partículas de CBCA sin reaccionar que el sistema con 15% CBCA.

A través de las curvas de análisis térmico de ATG y ATD se encontró que los productos de reacción en las pastas sufren procesos de deshidratación mediante reacciones endotérmicas; y que a medida que aumenta la edad de curado y el porcentaje de sustitución de CBCA ocurre una disminución del $Ca(OH)_2$ que refleja el progreso de la reacción puzolánica.

IX. RECOMENDACIONES

- Para estudios posteriores se recomienda pulverizar la CBCA a diferentes finuras, y evaluar el efecto de la finura sobre las propiedades físico-mecánicas de los cementos puzolánicos.
- Para elaboración de morteros CP/CBCA se sugiere utilizar % de sustitución de CBCA de un 15% o menor.
- Debido al carácter amorfo y alto contenido de sílice de la CBCA, se recomienda su evaluación como cementante sustituto al 100% del cemento Pórtland.
- La alta porosidad de las CBCA demanda grandes contenidos de humedad para lubricar las partículas y dar lugar a las reacciones de hidratación, por ello, se recomienda determinar la consistencia de las pastas en mesa de fluidez y utilizar esta consistencia para fabricar morteros.
- Se recomienda el uso de aditivos superplastificantes reductores de agua, ya que estos presentan muchas ventajas especialmente para cemento puzolánico. Entre ellas se pueden mencionar: aumento de la plasticidad de la mezcla, aumento de la resistencia inicial y final, al reducir la relación a/c produce morteros de alta resistencia y resistentes a sulfatos.

X. NOMENCLATURA

Abreviaturas

CBCA	: Cenizas de Bagazo de Caña de Azúcar
CBCAst	: Cenizas de Bagazo de Caña de Azúcar sin tamizar
CP	: Cemento Pórtland
CPC	: Cemento Pórtland Compuesto
CPP	: Cemento Portland Puzolánico
CPN	: Cemento Portland Ordinario
IAP	: Índice de Actividad Puzolánica MF Modulo de Finura
MEss	: Masa específica aparente saturada y superficialmente seca
MEs	: Masa específica seca
PM	: Peso molecular
a/c	: Relación agua/cemento
are/c	: Relación arena/cemento
C/S	: Relación calcio/sílice
RMC	: Resistencia mecánica a la compresión
S/N	: Señal/Ruido
PPI	: Perdidas Por Ignición

Técnicas de caracterización

ATG	: Análisis Termogravimétrico
ATD	: Análisis Térmico Diferencial
DRX	: Difracción de Rayos X
EDS	: Espectroscopia por Dispersión de Energía
FRX	: Fluorescencia de Rayos X
MEB	: Microscopia Electrónica de Barrido
ICP	: Plasma Acoplado Inductivamente

Unidades de medida

Å	: Angstrom
cm	: Centímetro
cm ²	: Centímetro cuadrado
cm ³	: Centímetro cubico
g	: Gramo
°C	: Grado Celsius
KgF	: Kilogramo Fuerza
Kg	: Kilogramo
L	: Litro
Mpa	: Mega pascal
mm	: Milímetro
µm	: Micrómetro
mm	: Milímetro

min : Minuto
mL : Mililitro
Pa : Pascal

Fases del CP

C_3S : C_3SiO_5 : Alita
 C_3A : $Ca_3Al_2O_6$: Aluminato tricalcico
 β - C_2S : Ca_2SiO_4 : Belita
 C_4AF : Ca_2AlFeO_5 : Ferrita
 CSH_2 : $CaSO_4 \cdot 2H_2O$: Yeso

Fases de la CBCA

$Na(AlSi_3O_8)$: Albita
 SiO_2 : Cristobalita

Productos de hidratación

CH: $Ca(OH)_2$: Hidróxido de calcio hidratado (Portlandita)
C-S-H $nCaO \cdot SiO_2 \cdot mH_2O$: Silicato de calcio hidratado (sin especificar estequiometría)
 $C_3A \cdot 3CS \cdot 32H$: Ettringita
 $C_3A \cdot CS \cdot 12H$: AFm- Monosulfato
 $C_3(AF) \cdot 3CS \cdot 32H$: Aft-Ettringita que contiene hierro
 $Ca_{0,07}Al_{0,1629}Si_{0,8375}O_2$: Modernita
 $AlCa_2H_{22}O_{11}S_{0,5}$: Kuzelita
 $CaCO_3$: Calcita

Otros compuestos químicos

H : H_2O Agua
 $MgSO_4$: Sulfato de Magnesio
Hg : Mercurio
 $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$: Sulfato de Magnesio heptahidratado
 CO_2 : Dióxido de carbono
CaO : Monóxido de Carbono

Otros

θ : Angulo theta
 ρ_c : Densidad del cemento
 ρ_{mezcla} : Densidad de la mezcla

XI. BIBLIOGRAFÍA

- ¹ Garrido, Dr. Miguel Andrade. *Hidratación temprana de cementos con mediano y alto contenido de adiciones minerales cristalinas*. Santiago de Chile : Construcción civil, 2005.
- ² Fernández, Oscar Rodrigo Godoy. DESARROLLO Y APLICACIONES DE LOS CEMENTOS. *Tesis de licenciatura*. San Carlos, Guatemala : s.n., Noviembre de 2006.
- ³ *Resistencia a los sulfatos del cemento Portland normal con ceniza volante*. Irassar, Edgardo y Batic, Oscar. 1989, Materiales de construcción, págs. 11-20.
- ⁴ J, Escalante D. *Cementos* . Saltillo : s.n., 2002.
- ⁵ Durán, Pablo Carmona. Evaluación mecánica de pastas de cemento modificadas con escoria de horno de arco eléctrico y ceniza de bagazo de caña de azúcar. Xalapa, Veracruz : UNIVERSIDAD VERACRUZANA, 2011.
- ⁶ *Nature*. Grutzeck, M.W. y Roy, D.M. 1969, págs. 223,492-494.
- ⁷ *Ceram.Soc.* Groves, G.W.:Sueur,P.J.L. y Sinclair, W.J.Am. 69, 1986, págs. 353-356.
- ⁸ *In Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete (Sp.Rpt. 90)*. Locher, F.W. Washintong, DC : Hioghrway Research Board, 1966, págs. 300-308.
- ⁹ Mindess, S. y Young, J.F. *Concrete*. Engle-wood Cliffs,NJ : Prentice-Hall, 1981.
- ¹⁰ Martínez, Néstor Meneses. Evaluación de la reacción de carbonatación en los estudios de las fases de conglomerados con cemento Pórtland. s.l. : Universidad Politecnica de Catalunya, 2012.
- ¹¹ García, Isabel Galán. Carbonatación del hormigon. Combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. 2011. págs. 24-25.
- ¹² *(Micro)-structural Comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and portland cement*. I.Lecomte, C.Henrist,M.Liégeois,F.Maseri, A.Rulmont, R.Cloots. 2005, ELSEVIER, pág. 1.
- ¹³ *(Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and portland cement* . I.Lecomte, C.Henrist,M.Liégeois,F.mASERI,A.Rulmont, R.Cloots. 2005, ELSEVIER , pág. 3.
- ¹⁴ Crespo, Enrique Quintana. Relación entre las propiedades geotécnicas y los componenetes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Córdoba : s.n., 2005. pág. 68.

- ¹⁵ Becker, Edgardo. Cemento Pórtland Puzolánico. s.l. : LOMA NEGRA C.I.A.S.A. pág. 1.
- ¹⁶ NTON 12-008-09. *Fabricación de bloques de concreto*. s.l. : Comité Técnico de Transporte, Construcción e infraestructura, 2009.
- ¹⁷ NTON 12 006-03. . *Fabricación, uso y manejo del cemento*. s.l. : Comité Técnico de la Construcción, 2003.
- ¹⁸ NMX-C-414-ONNCCE. *"Industria de la Construcción-Cementos hidráulicos-Especificaciones y métodos de pruebas"*. México, D.F : Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la construcción y Edificación, 2004.
- ¹⁹ ASTM C187. *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*. USA : Annual Book of ASTM standards, 1998. Vol. 04.01.
- ²⁰ ASTM C150. *Standard Specification for Portland Cement*. USA : Annual Book of ASTM Standards, 2005.
- ²¹ *Cemento compuesto*. Pérez, Lester Javier Espinoza. s.l. : McGrawhill, 1999, sciencedirect, Vol. II, págs. 197-199.
- ²² ASTM C1157. *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*. USA : Annual Book of ASTM Standards, 1992.
- ²³ Sanchez, Francisco Javier Alejandro. HISTORIA. CARACTERIZACION Y RESTAURACION DE MORTEROS. Sevilla : Pedro Cid.S.A, 2002. 25, págs. 57-59.
- ²⁴ Laboratorio de Materiales de Construcción. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas". *Determinación del tiempo de fraguado inicial y final del cemento*. [En línea] Abril de 2007. <http://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoCemento/Fraguado%20inicial%20y%20final%20del%20cemento.pdf>.
- ²⁵ NMX-C-061-1976. *Determinación de la Resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos*. México, D.F : Dirección General de normas, 1976.
- ²⁶ NMX-C-077-ONNCCE. *Agregados para concreto- análisis granulométrico y métodos de prueba*. México, D.F : Dirección General de normas, 1997.
- ²⁷ NMX-C-111-ONNCCE-2004. *Agregados para concreto hidráulico. Especificaciones y métodos de prueba*. México, D.F : Dirección General de normas, 2004.
- ²⁸ NMX-C-165. *Agregados- Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino- Método de prueba*. México, D.F : Dirección General de normas, 1984.

- ²⁹ NMX-C-273-1978. *Determinación de la actividad puzolánica*. México, D.F : Dirección General de normas, 1978.
- ³⁰ NTE INEN 0158. *Cemento hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat*. Quito : Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009.
- ³¹ *Evaluación físico químico de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos*. Águila, Idalberto y Sosa, Milena. 2008, Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, págs. 55-66.
- ³² Martínez, Orlando González. *Caracterización electroquímica de concretos modificados con CBCA*. Xalapa, Veracruz : UNIVERSIDAD VERACRUZANA, 2009.
- ³³ Austin, G. T. (1990). *Manual de Procesos Químicos en la industria* (Vol. 1). México: McGraw-Hill.
- ³⁴ Neville, A. M. (1988). *Tecnología del concreto* (Vol. 3). Ciudad de México: Limusa.
- ³⁵ Guzmán, A., Gutierrez, C., Mejía de Gutiérrez, R., & Delvasto, S. (2011). Valoración puzolánica de la hoja de la caña de azúcar. *Materiales de Construcción*, 213-225.
- ³⁶ National Ready Mixed Concrete Association. (s.f.). *El Concreto en la práctica*. Obtenido de <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP35es.pdf>
- ³⁷ Oliveira de Paula, M., Ferreira Tinoco, I. d., Rodríguez, C. d., & Osorio Saraz, J. A. (Septiembre de 2010). *Ceniza de bagazo de caña de azúcar como material de sustitución parcial del cemento Pórtland*. Obtenido de <http://dyna.unalmed.edu.co/ediciones/163/articulos/a05v77n163/a05v77n163.pdf>
- ³⁸ Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de CYTED. (2006). *Acción de coordinación de proyectos de investigación Residuos Agro-Industriales: Fuente Sostenible de Materiales de Construcción (VALORES)*. . Obtenido de <http://www.upv.es/VALORES/Documentaci%F3n/CYTED/NOCMAT%20%20CYTED.pdf>
- ³⁹ Soto Rojo, R., Núñez Jaquez, R., Barrios Durstewitz, C., Almeraya Calderón, F., Baltazar Zamora, M., Nieves Mendoza, D., & Almaral Sánchez, J. (4 de Junio de 2010). *Velocidad de Corrosión en concreto reforzado adicionado con ceniza de bagazo de caña de azúcar*. Obtenido de Sociedad Mexicana de Electroquímica: http://materiales.azc.uam.mx/area/Ingenieria_Materiales/investigaci%C3%B3n/smeq2010CD/disco/CTS/CTS109R.pdf

⁴⁰ *Tipos y componentes del concreto.* (s.f.). Obtenido de Proyectos fin de carrera: <http://www.proyectosfindecarrera.com/tipos-cementos.htm>

⁴¹ Becker, E. A. *Cemento Pórtland. Caracterisitcas y recomendaciones de uso.* Obtenido de <http://www.lomanegra.com.ar/img/cp.pdf>

⁴² Montiel, J. L. (s.f.). *Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental .* Obtenido de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar05/HTML/articulo01.htm>

⁴³ Silgado, S. S. (Julio de 2010). Mezclas binarias y ternarias basadas en cenizas volantes. Influencia del activador sobre la formación de fases y resistencias mecánicas. (Tesis de Master). Universidad Politécnica de Catalunya.

⁴⁴ Castro, D. (Noviembre de 2010). Caracterización geológica de las rocas sedimentarias de un sector de la hacienda el marqués, municipio zamora, guatire, estado miranda.(Tesis de Grado). *Universidad Central de Venezuela .* Caracas.

XII. ANEXOS

Anexo 1. Análisis granulométrico

Muestra: 502.4 gramos

Malla	Gramos que retiene	Gramos que pasan
3/8	0	502.4
4	7.5	494.7
8	60.2	434.5
16	172.2	261.9
30	171	89.9
50	66.3	22.9
100	15.3	7

Anexo 2. Módulo de finura

% Retiene	% Acumulado	% Pasa
0	0	100
1.47	1.47	98.41
11.97	13.44	86.43
34.25	47.69	52.09
34	81.69	17.88
13.19	94.88	4.55
3.04	97.92	1.39

$$MF = \frac{(0 + 1.47 + 13.44 + 47.69 + 81.69 + 94.88 + 97.92)}{100} = 3.37$$

Anexo 3. Proporcionamiento de mezclas de morteros CP/CBCA

CPO/CBCA	are/c	a/c	Arena(Kg)	Ligante(Kg)	Total(Kg)	Ceniza(Kg)	Cemento(Kg)	Agua(mL)	Agua de absorción(mL)
15%	2/1	0.40	2.66	1.33	3.99	0.20	1.13	530	160
30%	3/1	0.40	3.00	1.00	4.00	0.30	0.70	400	180
45%	4/1	0.40	3.20	0.80	4.00	0.36	0.44	320	192
30%	2/1	0.45	2.66	1.33	3.99	0.40	0.93	600	160
45%	3/1	0.45	3.00	1.00	4.00	0.45	0.55	450	180
15%	4/1	0.45	3.20	0.80	4.00	0.12	0.68	360	192
45%	2/1	0.50	2.66	1.33	3.99	0.60	0.73	670	160
15%	3/1	0.50	3.00	1.00	4.00	0.15	0.85	500	180
30%	4/1	0.50	3.20	0.80	4.00	0.24	0.56	0.40	192.00

El agua de absorción se refiere al 6% de absorción de agua de la arena, la cual se agregó a la arena antes de mezclarse con el cemento como fue descrito en la elaboración de los especímenes.

Anexo 4. Preparación de solución de MgSO₄ al 5%

$$PMMgSO_4 \cdot 7H_2O = 246.36g / mol$$

$$PMMgSO_4 = 120.36g / mol$$

$$V_{cubo} = 0.000125 m^3$$

$$0.000125 m^3 * 3_{cubos} = 0.000375 m^3$$

$$3 \text{ veces el volumen} = 0.000375 m^3 * 3 = 0.001125 m^3 * 1000L / 1m^3 = 1.125 L$$

Tomando un volumen de 1.5 L de MgSO₄ al 5% P/P

$$\begin{array}{l} 5g \text{ de } MgSO_4 \longrightarrow 100 g \text{ solución} \\ X \longrightarrow 1500 g \text{ solución} \end{array}$$

$$X = 75 g \text{ de } MgSO_4$$

Composición % del sulfato de magnesio heptahidratado:

48.86% de sulfato de magnesio y 51.14% de agua

En 100 gramos de sulfato de magnesio heptahidratado hay 48.86 gramos de sulfato de magnesio

¿Cuántos gramos de sulfato de magnesio heptahidratado se requieren para 75 gramos de sulfato de magnesio?

$$X = 153.5 g \text{ de sulfato de magnesio heptahidratado}$$

Se pesaron 153.5 g de MgSO₄ · 7 H₂O y se aforó con agua del grifo hasta 1500 mL. Esta solución se cambió semanalmente.

Anexo 5. Serie de tamices utilizados para análisis granulométrico del agregado fino.



Anexo 6. Aparato de Vicat para determinación del tiempo de fraguado y consistencia normal.



Anexo 7. Moldes utilizados para la elaboración de las probetas cúbicas



Anexo 8. Mezcladora marca Hobart, modelo A200



Anexo 9. Máquina de ensayos mecánicos marca SOILTEST



Anexo 10. Mufla marca Barnstead Thermolyne



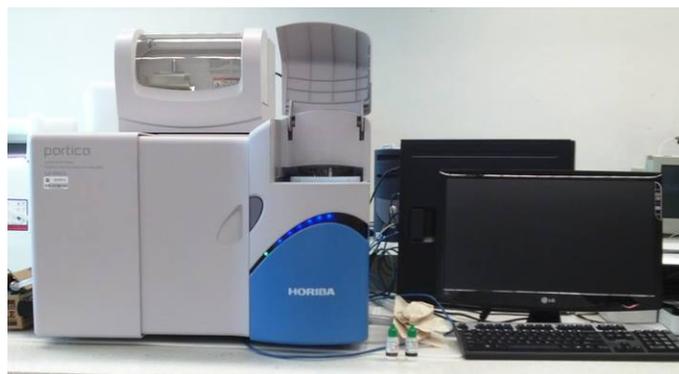
Anexo 11. Aparato Blaine para determinar la finura (cm^2/g) del CP y CBCA



Anexo 12. Molino planetario RetschPM 400



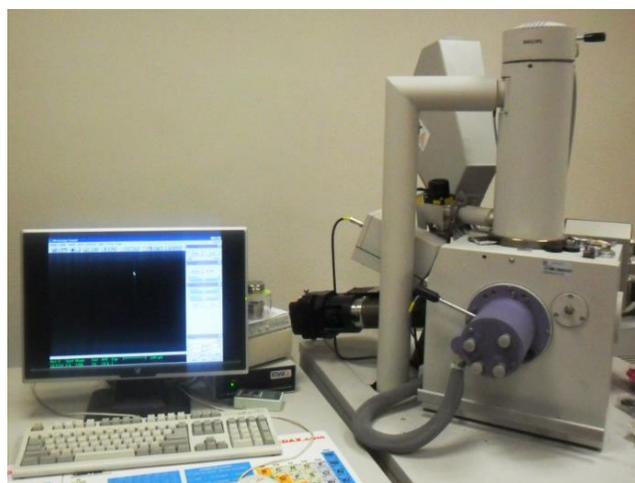
Anexo 13. Equipo para difracción laser para distribución de tamaño de partícula



Anexo 14. Horno de vacío VWR Model 1430-2



Anexo 15. Microscopio Electrónico de Barrido (Phillips, modelo XL-30 ESEM) para micrografías y análisis por EDS



Anexo 16. Prensa hidráulica marca D.A.V.I.S.A

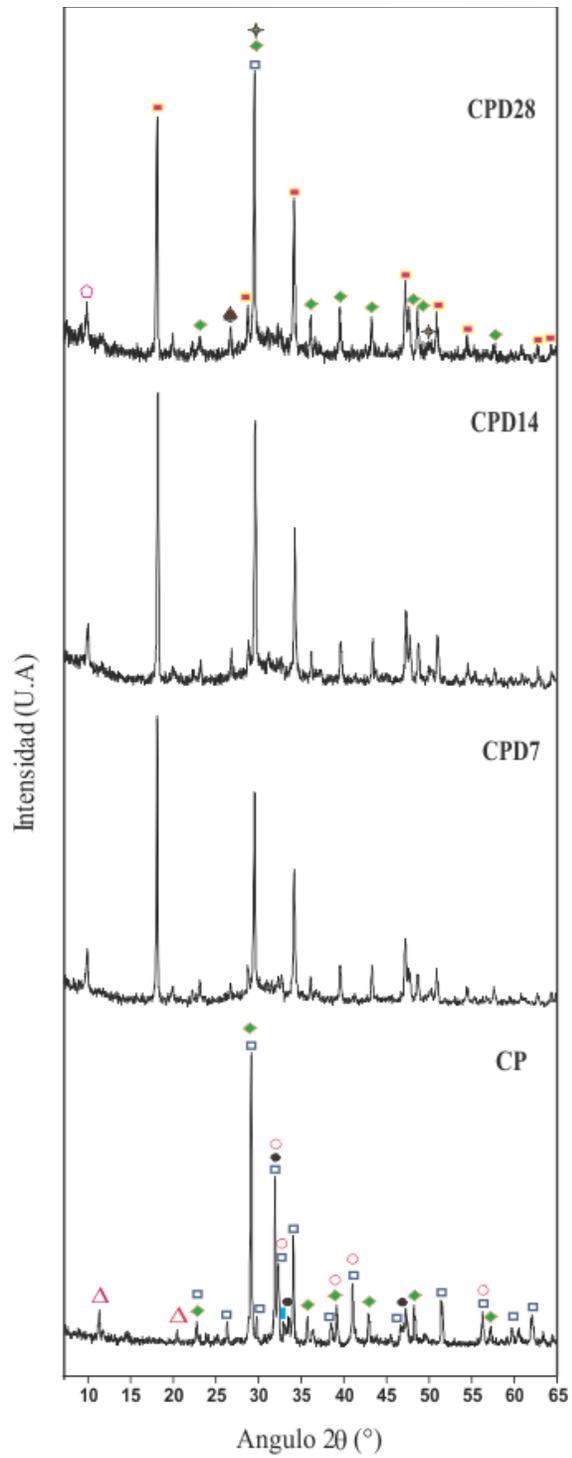


Anexo 17. Dosificaciones de pastas de cemento Pórtland puzolánico y patrón (CINVESTAV, Unidad Saltillo)

	%CP	%CBCA	a/c	Kg pasta	CP (Kg)	CBCA (Kg)	Agua (Kg)	Agua (mL)
Sistema 1	85	15	0.5	1	0.85	0.15	0.5	500
Sistema 2	55	45	0.84	1	0.55	0.45	0.84	840
Patron	100	0	0.5	1	1	0	0.5	500

Anexo 18. Resultados de DRX para patrón

En la Figura 33 se muestra el patrón de DRX obtenido para pastas hidratadas de cemento Pórtland las fases encontradas en todas las muestras fueron calcita ($CaCO_3$), portlandita ($Ca(OH)_2$), cuarzo (SiO_2), modernita ($Ca_{0.07}Al_{0.1629}Si_{0.8375}O_2$) y alita (Ca_3SiO_5). El gel CSH encontrado corresponde a la tobermorita cuyas reflexiones principales se ubican en $2\theta = 46.96$ y 29.54 otros estudios han reportado picos de tobermorita a $2\theta = 29.34^\circ$, 32.04° , 50.06° (12). Al parecer no existen cambios en la cristalinidad de las muestras. Se puede observar que existe alita sin reaccionar aun a los 28 días de curado lo que permite decir que aun después de los 28 días podrían seguirse obteniendo productos de reacción de $Ca(OH)_2$ y gel CSH y por tanto incrementos de resistencia mecánica.



- | | |
|--|---|
| ◆ : CaCO_3 (Calcita) | □ : Ca_3SiO_5 (Alita) |
| ■ : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Portlandita) | △ : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Yeso) |
| + : C-S-H | ■ : $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ (Aluminato tricalcico) |
| ◆ : SiO_2 (Cuarzo) | ● : $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$ (Ferrita) |
| ◇ : $\text{Ca}_{0.07}\text{Al}_{0.1629}\text{Si}_{0.8375}\text{O}_2$ (Modernita) | ○ : Ca_2SiO_4 (Belita) |

Figura 33. Patrón de DRX de pastas hidratadas de 100% CP y CP anhidro

Anexo 19. Cálculo de la composición del cemento compuesto con CP-CBCA de reactivos y productos

• **Sistema 15%CBCA-85%CP**

Cálculo de la composición química en % en peso de los reactivos SiO₂, CaO, Al₂O del cemento compuesto

Ecuación

$$\%X = (\%CBCA * CQ) + (\%CP * CQ)$$

$$\%SiO_2: (0.15 * 62.33) + (0.85 * 13.9) = 21.165$$

$$\%CaO: (0.15 * 3.556) + (0.85 * 61.49) = 52.799$$

$$\%Al_2O_3: (0.15 * 6.726) + (0.85 * 3.75) = 4.196$$

Cálculo por estequiometría del % en peso de Si, Ca y Al del cemento compuesto

$$\begin{array}{rcl} SiO_2 & \rightarrow & Si + O_2 \\ 60.08 & & 28.086 \\ 21.165 & & X \\ X=9.894\% \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} 2CaO & \rightarrow & 2Ca + O_2 \\ 112.16 & & 80.16 \\ 52.799 & & X \\ X=37.735\% \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} 2Al_2O_3 & \rightarrow & 4Al + 3O_2 \\ 203.92 & & 107.92 \\ 4.196 & & X \\ X=2.221\% \end{array}$$

Tabla 23. Composición en % en peso de Si, Al y Ca en base al 100% (Sistema 1)

Composición química de CBCA (CQ)			Σ Si, Al, Ca	% en peso de Si=(CQSi*100/ΣSi,Al,Ca)	% en peso de Al=(CQAl*100)/ΣSi,Al,Ca	% en peso de Ca=(CQCa*100)/ΣSi,Al,Ca
Si	Al	Ca				
9.894	2.221	37.735	49.85	19.8	4.455	75.697

Calculo de los % en peso de los productos de reacción

Calcita: $CaCO_3$ Ca:100%

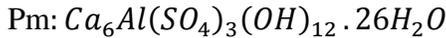
Portlandita: $Ca(OH)_2$ Ca: 100%

Ettringita: $Ca_6Al(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$

Tobermorita: $Ca_3HO_9Si_3$

Kuzelita: $AlCa_2H_{22}O_{11}S_{0.5}$

Determinación del peso molecular de la ettringita



$$\text{Pm: } (6 * 40.08) + (1 * 26.98) + (32.064 * 3) + (16 * 12) + (16 * 12) + (1 * 12) + (26 * 2) + (26 * 16) = 1227.652 \text{ g/mol}$$

Determinación de los % en peso de los elementos de la ettringita

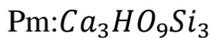
$$\begin{aligned} Pm \text{ Ca} &= 6 * 40.08 = 240.48 \text{ g/mol} \\ Pm \text{ Al} &= 1 * 26.98 = 26.98 \text{ g/mol} \\ X_{Ca} &= \frac{240.48}{1227.65} = 0.196 * 100 = 19.6\% \\ X_{Al} &= \frac{26.98}{1227.65} = 0.022 * 100 = 2.2\% \end{aligned}$$

Determinación de los % en peso de los elementos de la ettringita en base al 100%

$$\Sigma Ca, Al = 19.6 + 2.2 = 21.8\%$$

$$\begin{aligned} X_{Ca} &= \frac{19.6}{21.8} = 0.899 * 100 = 89.90\% \\ X_{Al} &= \frac{2.2}{21.8} = 0.1009 * 100 = 10.09\% \end{aligned}$$

Determinación del peso molecular del CSH (tobermorita)



$$\text{Pm: } (3 * 40.08) + (1 * 1) + (9 * 16) + (3 * 28.036)$$

$$\text{Pm: } 349.348 \text{ g/mol}$$

Determinación de los % en peso de los elementos de la tobermorita

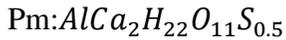
$$\begin{aligned} Pm \text{ Ca} &= 3 * 40.08 = 120.24 \text{ g/mol} \\ Pm \text{ Si} &= 3 * 28.036 = 84.108 \text{ g/mol} \\ X_{Ca} &= \frac{120.24}{349.348} = 0.344 * 100 = 34.42\% \\ X_{Si} &= \frac{84.108}{349.348} = 0.241 * 100 = 24.08\% \end{aligned}$$

Determinación de los % en peso de los elementos de tobermorita en base al 100%

$$\Sigma Ca, Si = 34.42 + 24.08 = 58.5\%$$

$$\begin{aligned} X_{Ca} &= \frac{34.42}{58.5} = 0.588 * 100 = 58.8\% \\ X_{Si} &= \frac{24.08}{58.5} = 0.412 * 100 = 41.2\% \end{aligned}$$

Determinación del peso molecular de la Kuzelita



$$\text{Pm: } (1 * 26.9815) + (2 * 40.08) + (1 * 22) + (11 * 16) + (0.5 * 32.064)$$

$$\text{Pm: } 321.174 \text{ g/mol}$$

Determinación de los % en peso de los elementos de la Kuzelita

$$\text{Pm Ca} = 2 * 40.08 = 80.16 \text{ g/mol}$$

$$\text{Pm Al} = 1 * 26.98 = 26.98 \text{ g/mol}$$

$$X_{Ca} = \frac{80.16}{321.174} = 0.249 * 100 = 24.9\%$$

$$X_{Al} = \frac{26.98}{321.174} = 0.084 * 100 = 8.4\%$$

Determinación de los % en peso de los elementos de Kuzelita en base al 100%

$$\Sigma \text{Ca, Al} = 24.9 + 8.4 = 33.3\%$$

$$X_{Ca} = \frac{24.9}{33.3} = 0.747 * 100 = 74.7\%$$

$$X_{Al} = \frac{8.4}{33.3} = 0.252 * 100 = 25.2\%$$

- **Sistema 45%CBCA-55%CP**

Cálculo de la composición química en % en peso de los reactivos SiO₂, CaO, Al₂O del cemento compuesto

Ecuación

$$\%X = (\%CBCA * CQ) + (\%CP * CQ)$$

$$\%SiO_2: (0.45 * 62.33) + (0.55 * 13.900) = 35.694$$

$$\%CaO: (0.45 * 3.556) + (0.55 * 61.490) = 35.419$$

$$\%Al_2O_3: (0.45 * 6.726) + (0.55 * 3.750) = 5.089$$

Cálculo por estequiometria del %peso Si, Ca y Al



$$60.036 \quad 28.036$$

$$35.694 \quad X$$

$$X = 16.669\%$$



$$112.16 \quad 80.16$$

$$35.419 \quad X$$

$$X = 25.314\%$$

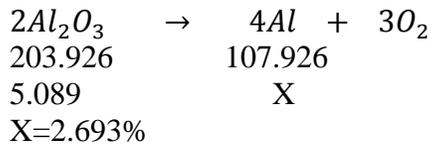
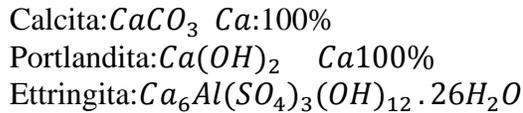


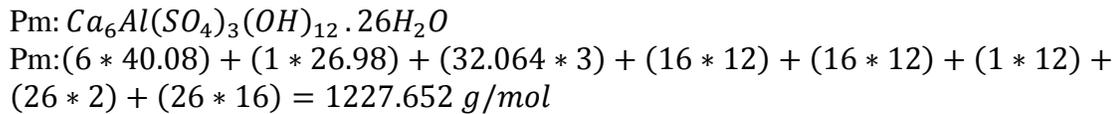
Tabla 24. Composición en % en peso de Si, Al y Ca en base al 100% (Sistema 2)

Composición química de CBCA (CQ)			Σ Si, Al, Ca	% en peso de Si=(CQSi*100)/ Σ Si,Al,Ca	% en peso de Al=(CQAl*100)/ Σ Si,Al,Ca	% en peso de Ca=(CQCa*100)/ Σ Si,Al,Ca
Si	Al	Ca	44.675	37.309	6.028	57.334
16.668	2.693	25.314				

Calculo de los % en peso de los productos de reacción



Determinación del peso molecular de la ettringita



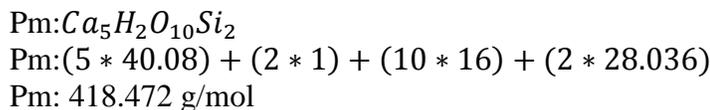
Determinación de los % en peso de los elementos de la ettringita

$$\begin{aligned}
 Pm \text{ Ca} &= 6 * 40.08 = 240.48 \text{ g/mol} \\
 Pm \text{ Al} &= 1 * 26.98 = 26.98 \text{ g/mol} \\
 X_{Ca} &= \frac{240.48}{1227.65} = 0.196 * 100 = 19.6\% \\
 X_{Al} &= \frac{26.98}{1227.65} = 0.022 * 100 = 2.2\%
 \end{aligned}$$

Determinación de los % en peso de los elementos de la ettringita en base al 100%

$$\begin{aligned}
 \Sigma \text{Ca, Al} &= 19.6 + 2.2 + 0 = 21.8\% \\
 X_{Ca} &= \frac{19.6}{21.8} = 0.899 * 100 = 89.90\% \\
 X_{Al} &= \frac{2.2}{21.8} = 0.1009 * 100 = 10.09\%
 \end{aligned}$$

Determinación del peso molecular del CSH (Reinhardbrausita)



Determinación de los % peso de los elementos

$$Pm Ca = 5 * 40.08 = 200.4 \text{ g/mol}$$

$$Pm Si = 2 * 28.036 = 56.072 \text{ g/mol}$$

$$X_{Ca} = \frac{200.4}{418.472} = 0.479 * 100 = 47.9\%$$

$$X_{Si} = \frac{56.072}{418.472} = 0.134 * 100 = 13.4\%$$

Determinación de los % en peso de los elementos de la Reinhardbrausita en base 100%

$$\Sigma Ca, Si = 47.9 + 13.4 = 61.3\%$$

$$X_{Ca} = \frac{47.9}{61.3} = 0.781 * 100 = 78.14\%$$

$$X_{Si} = \frac{13.4}{61.3} = 0.219 * 100 = 21.9\%$$

Anexo 20. Cálculo de la concentración de portlandita y calcita en pastas de CP-CBCA y 100%CP por medio de análisis térmico de ATG

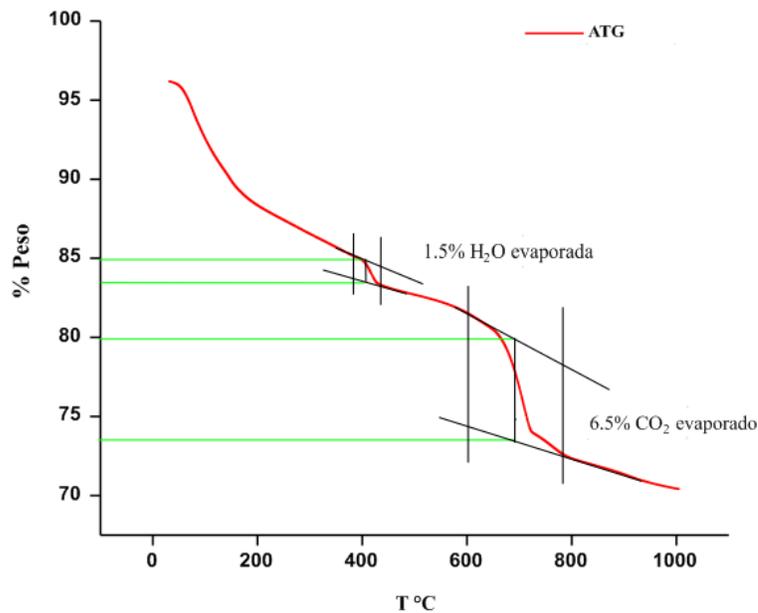
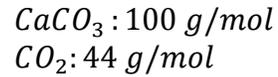
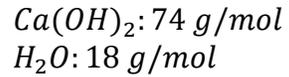


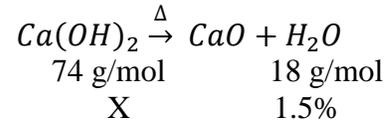
Figura 34. Termograma del sistema S1D3 para la determinación de portlandita y calcita

- De la Figura 34 se determina el % H₂O y %CO₂ evaporable
 % H₂O: 1.5 %CO₂: 6.5
- Determinación de los pesos moleculares de los compuestos presentes en la siguiente reacción:

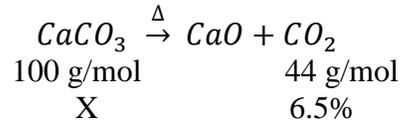




3. Utilizando los pesos moleculares y los valores obtenidos en la Figura 34 calcular los porcentajes de portlandita y calcita



$$X = 6.167\% \text{ de } Ca(OH)_2$$



$$X = 14.773\% \text{ de } CaCO_3$$

4. Siguiendo el mismo procedimiento se calcularon los porcentajes de portlandita y calcita para los sistemas S1D28, S2D3, S2D28 y CPD3 de análisis térmicos los resultados se presentan en la Tabla 22.