

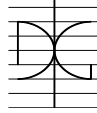

Trabajo de Investigación CST/MIH

VALORIZACIÓN DE CENIZAS DE BAGAZO PROCEDENTES DE HONDURAS: POSIBILIDADES DE USO EN MATRICES DE CEMENTO PÓRTLAND

Por:

DANIEL ERNESTO MA-TAY PINEL

ABRIL 2014.

Autor / Author: DANIEL ERNESTO MA-TAY PINEL		Fecha / Date: ABRIL 2014	
Título / Title VALORIZACIÓN DE CENIZAS DE BAGAZO PROCEDENTES DE HONDURAS: POSIBILIDADES DE USO EN MATRICES DE CEMENTO PÓRTLAND			
Directores del trabajo / Supervisores: Dra. M^a Victoria Borrachero Rosado Dr. José M^a Monzó Balbuena		Código / Code: CST/MIH	Nº páginas / Pages: 147
Departamento / Departament: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL.			
Universidad / University: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA			 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Palabras clave / Keywords: Ceniza de bagazo, puzolana, cemento pórtland, caracterización, reactividad, resistencia mecánica.			
Código Unesco: 330505, 331202, 331208, 331209, 331212			

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento y mi gratitud a todas aquellas personas que de algún modo u otro me han prestado su colaboración y me han animado a lo largo del desarrollo de este trabajo.

A mis directores de tesis María Victoria Borrachero y José Monzó Balbuena por su acertada orientación del trabajo, su constante interés, paciencia y dedicación en todo el desarrollo de la investigación. También a Jordi Payá Bernabeu por su inestimable colaboración y sugerencias.

A Lourdes Soriano y Noelia Bouzón por su colaboración en todos los trabajos experimentales desarrollados en el laboratorio, por su paciencia y dedicación para guiarme en cada paso de esta investigación.

A toda mi familia, que desde lejos siempre me ha apoyado y me ha animado a culminar esta etapa de mi vida. A mi hermano, por mostrarme siempre el camino a seguir en mi vida profesional y por tu inmenso cariño.

Por último, quiero agradecer a mis padres, por poner siempre mi crecimiento profesional e individual como una prioridad en sus vidas, porque todo lo que soy es gracias a ellos.

A la mejor y más bella de las madres,
y a ti, *Daniela*, por estar conmigo en los momentos
difíciles de este trabajo, por tus ánimos y tu cariño,
por ser mi compañera a lo largo de esta experiencia.

RESUMEN DE TESIS DE MASTER

La industria de la construcción es un sector muy dinámico, donde continuamente se consiguen avances y mejoras en los materiales utilizados con el fin de ofrecer mejores prestaciones y mayor seguridad. Dentro de dichos avances se encuentra la utilización de materiales puzolánicos que mejoran el comportamiento de los conglomerantes que los incorporan.

Es sabido y objeto de múltiples investigaciones que debido a su alto contenido en sílice amorfa, las cenizas procedentes de la combustión de residuos agrícolas, dependiendo del proceso de combustión, pueden tener carácter puzolánico; tal es el caso de materiales como la ceniza de cascarilla de arroz, la ceniza de hojas de bambú y el bagazo de caña de azúcar.

El presente trabajo de tesis desarrollará la caracterización físico-química y el análisis de la reactividad puzolánica de muestras de cenizas de bagazo de caña de azúcar provenientes de Honduras, así como la evolución de las propiedades mecánicas de probetas de mortero con adición de dichas cenizas.

Los resultados de la caracterización indican que las cenizas procedentes de San Pedro Sula y Choluteca presentan un alto potencial como puzolanas reactivas. Ambas muestras de ceniza poseen una composición química formada mayoritariamente por óxidos de silicio, aluminio y hierro y presentan valores de pérdida al fuego similares. En los resultados del ensayo de difracción de rayos X, se puede observar que las dos muestras presentan una desviación de la línea base entre $15-30^\circ$ de 2θ , lo que indica la presencia de material amorfo en ambas cenizas.

La muestra de ceniza procedente de 3 Valles se descartó para ser utilizada como adición puzolánica ya que resultó ser altamente cristalina, con un valor del residuo insoluble elevado y otros resultados obtenidos que indican que la muestra probablemente se haya visto significativamente contaminada con arena durante el proceso de recolección, lo que invalidaría su uso como puzolana.

Por otra parte los resultados de la reactividad puzolánica obtenida mediante la técnica de pH y conductividad en suspensiones acuosas cal/puzolana, igualmente, los ensayos de termogravimetría realizados sobre pastas cal/ceniza y cemento/ceniza demuestran que ambas cenizas fijan portlandita, formando silicatos cálcicos hidratados.

En cuanto a la fabricación de morteros con sustitución de ceniza por cemento Pórtland, se ha demostrado que la incorporación de estas cenizas de bagazo disminuyó la trabajabilidad de los morteros, debido a la demanda de agua de la ceniza, generada por su elevada superficie específica. Por último, la influencia de la ceniza de bagazo sobre la resistencia a compresión de morteros fue significativa. Obteniéndose, para probetas con un 25% de sustitución de cemento por ceniza resistencias superiores a las probetas con solo cemento, tanto las curadas a 40°C a 28 días como las curadas a temperatura ambiente a 90 días de curado.

De manera general se puede concluir que, en las condiciones estudiadas, las cenizas de bagazo de azúcar de San Pedro Sula y Choluteca de las centrales de Honduras, son materiales con una puzolanidad muy significativa y que por tanto, es factible utilizar dichas cenizas como sustitución parcial de cemento Pórtland en morteros.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	5
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
3. ESTADO DEL ARTE	9
3.1 EL HORMIGÓN Y EL CEMENTO PÓRTLAND	11
3.2 PUZOLANAS Y MATERIALES RESIDUALES	12
3.2.1 Puzolanas Naturales	13
3.2.2 Puzolanas Artificiales	13
3.2.3 Residuos Agrícolas como adición al Hormigón.....	16
3.3 INVESTIGACIONES PREVIAS DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA EN LA CONSTRUCCIÓN	18
3.3.1 Utilización como adición puzolánica en hormigones y morteros	18
3.3.2 Otras investigaciones relacionadas con el uso de los residuos de la caña de azúcar en la construcción.....	32
4. DESARROLLO DEL PLAN EXPERIMENTAL	33
4.1 MATERIAS PRIMAS A EMPLEAR.....	35
4.1.1 Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar.....	35
4.1.2 Cemento	35
4.1.3 Agua.....	35
4.1.4 Hidróxido Cálcico.....	35
4.1.5 Áridos.....	36
4.2 EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.....	36
4.2.1 Procedimientos para la obtención de las cenizas	36
4.2.2 Molienda	37
4.2.3 Granulometría por difracción láser	38
4.2.4 Fluorescencia de Rayos X.....	39
4.2.5 Difracción de Rayos X (DRX).....	39
4.2.6 Análisis Termogravimétrico	40
4.2.7 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	41
4.2.8 Pérdida al Fuego	42
4.2.9 Residuo Insoluble.....	43
4.2.10 pH y Conductividad	46
4.2.11 Contenido de iones Ca^{+2} en disoluciones acuosas.....	48

4.2.12 Procedimiento y equipo para elaboración de probetas de mortero.	49
4.2.12 Resistencia Mecánica.....	54
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
5.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA.....	59
5.1.1 Molienda y Granulometría.....	59
5.1.2 Pérdida al Fuego	61
5.1.3 Microscopía Electrónica	62
5.1.4 Residuo Insoluble.....	66
5.1.5 Fluorescencia de Rayos X.....	67
5.1.6 Difracción de Rayos X.....	68
5.2 REACTIVIDAD PUZOLÁNICA.....	70
5.2.1 pH y Conductividad	70
5.2.2 Contenido de iones Ca ⁺² en disoluciones acuosas.....	74
5.2.4 Pastas Cal/Ceniza y Cemento/Ceniza	75
5.3 UTILIZACIÓN DE CENIZA DE BAGAZO EN MORTEROS	85
5.3.1 Dosificación y Trabajabilidad.....	85
5.3.2 Resistencia Mecánica.....	86
5.3.3 Peso de Probetas	89
6. CONCLUSIONES.....	91
6.1 CONCLUSIONES DE CARACTERIZACIÓN FÍSICO - QUÍMICA.....	93
6.2 CONCLUSIONES DE REACTIVIDAD PUZOLÁNICA	93
6.3 CONCLUSIONES DE LA UTILIZACIÓN DE CENIZA DE BAGAZO EN MORTEROS	94
7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	95
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEJOS.....	107

1. INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Originalmente el término puzolana viene acuñado desde la época de los romanos; se denominó así a una fina ceniza volcánica que se extiende principalmente en la región del Lazio y la Campania, su nombre deriva de la localidad de *Pozzouli*, en las proximidades de Nápoles, en las faldas del Vesubio. Esta ceniza mezclada con cal y agua formaba compuestos con propiedades cementantes capaces de presentar propiedades similares a las del hormigón convencional.

Actualmente el término puzolana incluye a *"todos los materiales inorgánicos, tanto naturales como artificiales, capaces de combinarse directamente con la cal o con la procedente de la hidratación de los cementos, a temperatura ambiente y en presencia de agua, para formar compuestos similares a los originados en la hidratación de los componentes principales del cemento Pórtland"* ⁽¹⁾.

Es sabido y objeto de múltiples investigaciones que el contenido en sílice de las cenizas procedentes de la combustión de residuos agrícolas, dependiendo del proceso de combustión, puede tener carácter puzolánico; tal es el caso de materiales como la ceniza de cascarilla de arroz, la ceniza de hojas de bambú y el bagazo de caña de azúcar.

Gran parte de las investigaciones referentes al uso del bagazo de caña de azúcar como una adición puzolánica han sido desarrolladas en Brasil. La caña de azúcar, se utiliza como la principal materia prima para las industrias de azúcar y etanol. Brasil que cosecha más de 600 millones de toneladas de caña de azúcar es el mayor productor mundial de azúcar y etanol; el país produce actualmente cerca de 60% de alcohol etílico (etanol) que se consume en todo el mundo ^(2,3).

En general, el bagazo de caña de azúcar es utilizado por las plantas para la cogeneración de energía. La energía generada por la quema del bagazo de caña de azúcar supera la capacidad de la presa Itaipú, la planta hidroeléctrica más grande de Brasil que posee una potencia de generación instalada de 14000 MW ⁽²⁾.

Sin embargo, se siguen buscando soluciones para la eliminación de residuos generados en la producción de azúcar y etanol. La ceniza que queda después de que el bagazo se queme es el último residuo generado por la cadena de la caña de azúcar; 25 kg de ceniza son generados por tonelada de bagazo quemado. Para la cosecha de 2010/2011 en Brasil, la producción de la ceniza era más de 10,000 toneladas por día ^(2,3).

Honduras a pesar de ser un productor de caña de azúcar en mucha menor escala que Brasil, presenta los mismos problemas para la gestión de los residuos generados por la industria azucarera.

La producción de caña de azúcar en Honduras ha ido en aumento desde el año 2000 y alcanzó las 5,562,018.08 toneladas en el año 2013, según la Asociación de Productores de Azúcar de Honduras⁽⁴⁾ como se puede ver en la tabla 1-1.

<i>Año</i>	<i>Área Sembrada (Mnz)</i>	<i>Hectáreas Sembradas</i>	<i>Producción Caña de Azúcar (TM)</i>
2000	58,124.31	40,686.20	3743,808.17
2001	61,191.33	42,833.07	3806,577.56
2002	58,768.40	41,137.06	3613,315.86
2003	60,846.36	42,591.60	3458,847.61
2004	60,454.94	42,317.61	4005,123.81
2005	60,764.84	42,534.54	3949,747.23
2006	61,395.66	42,976.10	4036,255.55
2007	63,497.46	44,447.33	4280,762.84
2008	71,023.60	49,715.53	4450,142.76
2009	64,231.44	44,961.11	4146,607.00
2010	63,443.42	44,409.51	4521,606.42
2011	64,269.76	44,987.93	4206,677.49
2012	68,205.12	47,742.63	4842,452.49
2013	75,554.30	52,886.95	5562,018.08

Tabla 1-1 Producción Anual de Caña de Azúcar en Honduras

Actualmente la gran mayoría de la ceniza de bagazo es desechada en vertederos, solo una pequeña fracción es utilizada como abono para el cultivo de la misma caña. Una alternativa para gestionar este residuo es incorporarlo a la industria de la construcción, utilizar la ceniza de bagazo como una adición puzolánica a morteros y hormigones e inclusive fabricar materiales de construcción de bajo coste económicos y medioambientales.

El presente trabajo de tesis desarrollará la caracterización físico-química y el análisis de la reactividad puzolánica de tres muestras de cenizas de bagazo de caña de azúcar provenientes de Honduras, así como la evaluación de las propiedades mecánicas de probetas de mortero de cemento Pórtland con incorporación de ceniza de bagazo.

Las cenizas que son objeto de estudio son muestras de tres de los más grandes ingenios azucareros de Honduras. Una muestra es de la ceniza producida en el Ingenio Santa Matilde, ubicado en la ciudad de San Pedro Sula y con una capacidad de molienda diaria de 12,000 Ton. Otra muestra fue tomada en el Ingenio Los Mangos, ubicado en la ciudad de Choluteca y con una capacidad de molienda diaria de 4,000 Ton. La última muestra fue tomada del Ingenio Francisco Morazán, ubicado en la comunidad de Cantarranas y conocida como la Azucarera 3 Valles con una capacidad de molienda de 3,000 toneladas diarias. La suma de la producción anual de los tres ingenios es superior a los 2.5 millones de toneladas, quemándose más de 550,000 toneladas de bagazo.

2. OBJETIVOS

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo fundamental de esta investigación es estudiar la posible valorización de diferentes muestras de ceniza de bagazo de caña de azúcar procedente de Honduras. Para ello, se pretende realizar una caracterización físico-química, así como evaluar la reactividad puzolánica para su posible adición en morteros y hormigones.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una caracterización físico-química de tres muestras de cenizas de bagazo de caña de azúcar procedentes de ingenios azucareros de Honduras.
- Evaluar la posible reactividad puzolánica de las cenizas y su interacción con el cemento, para su uso como adición en morteros y hormigones.
- Evaluar las propiedades mecánicas, específicamente su resistencia a compresión, ensayando probetas de mortero con sustitución parcial de cemento por ceniza de bagazo.
- Evaluar los resultados de resistencia a compresión con diferentes temperaturas de curado.
- Ofrecer una alternativa al uso de residuos agrícolas como adición puzolánica, disminuyendo el uso de cemento Pórtland como conglomerante en las mezclas, con el consiguiente beneficio económico y medioambiental para un país en vías de desarrollo.

3. ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE

3.1 EL HORMIGÓN Y EL CEMENTO PÓRTLAND

El hormigón, tal como se conoce hoy en día, es un material de construcción constituido básicamente por áridos, de tamaño máximo limitado, que cumplen con ciertas condiciones en cuanto a sus características mecánicas, químicas y granulométricas, unidos por una pasta formada por un conglomerante (cemento) y agua. A este material básico y en el momento de su amasado, pueden añadirse otros productos o materiales, para mejorar algunas características determinadas.

Hoy en día, se considera al hormigón el rey universal de los materiales de construcción, debido a sus indiscutibles ventajas. En primer lugar, hay que decir a su favor, que es un material que permite conseguir piezas de cualquier forma, por complicada que ésta sea, con la única limitación de la menor o mayor complejidad del molde o sistema de encofrado, y esto es debido al carácter plástico que posee cuando se encuentra en estado fresco. En segundo lugar, el hormigón es un material con resistencias apreciables a compresión y que aunque posea resistencias débiles a tracción, permite aumentarlas apreciablemente, valiéndose del acero al que puede incorporar en su seno, y en los lugares adecuados, dando lugar al hormigón armado y pretensado. También es posible mejorar las prestaciones a flexión con la incorporación de fibras de diversa naturaleza. En tercer lugar, el hormigón presenta la ventaja sobre otros materiales resistentes, de proporcionar piezas con un gran monolitismo, incluso en los nudos, haciendo que pueda prescindirse de juntas o uniones que, a veces, son zonas débiles.

Una razón de gran importancia que justifica el que este material haya alcanzado el lugar de privilegio que tiene, es que está formado por materiales abundantes y relativamente baratos, si bien es cierto que la tecnología de fabricación del clínker de cemento Pórtland (el más extensamente utilizado), no está disponible a precios bajos o no es accesible para ciertas regiones o países, además en la actualidad se critica desde el punto de vista medioambiental el gran impacto que tiene la producción de clínker por las elevadas emisiones de CO₂ que son generadas. La gran demanda de hormigón ha generado que la producción de cemento pórtland se incremente año tras año hasta alcanzar en la actualidad una producción mundial superior a los 3,000 millones de toneladas; además las previsiones indican que la producción seguirá en aumento esencialmente para el área de África y Latinoamérica.

La energía asociada a la fabricación del cemento pórtland, se debe en una gran parte al proceso de clinkerización, que consume más del 90% de la energía total necesaria para dicha fabricación. La etapa que precisa de mayor energía dentro de las que se suceden en la cocción del clínker, es la reacción de descarbonatación de la caliza (CaCO₃):



En dicha reacción, por una parte, se pierde el 44% de materia prima caliza en forma de emisiones de CO₂ directamente a la atmósfera, acompañados de otros óxidos como SO_x y NO_x, que teniendo en cuenta la producción mundial de clínker, supone una contaminación generalizada a gran escala y un impacto medioambiental negativo innegable; y por otra parte, la cantidad de las emisiones de gases aumentan mucho más en dichas fábricas donde, el proceso de cocción del crudo depende de la utilización de energía no eléctrica, tal como carbón, fuel, etc.⁽⁵⁾

A raíz de estos hechos, en muchos países se ha dirigido la política tanto hacia la conservación del medio ambiente reduciendo el impacto que producen las emisiones de gases, como hacia el ahorro en el coste en la energía de la producción del cemento, buscando alternativas más adecuadas. Una de las alternativas más empleadas, es la introducción de materiales que tienen como característica común la actividad puzolánica (fijación de cal), conocidos como puzolanas.

3.2 PUZOLANAS Y MATERIALES RESIDUALES

El término puzolana incluye *”todos los materiales inorgánicos, tanto naturales como artificiales, capaces de combinarse directamente con la cal o con la procedente de la hidratación de los cementos, a temperatura ambiente y en presencia de agua, para formar compuestos similares a los originados en la hidratación de los componentes principales del cemento Pórtland”*⁽¹⁾.

El uso de puzolanas y materiales cementantes en la industria del cemento y del hormigón ha ido cobrando una importancia cada vez mayor en las últimas décadas. Son varios los beneficios conseguidos con el uso de puzolanas, entre ellos se puede destacar la mejora de resistencias mecánicas, el aumento de durabilidad y en muchos casos beneficios económicos y medioambientales.⁽¹⁾

Además, el uso de estos materiales residuales puzolánicos supone un beneficio medioambiental doble, por un lado el sustituir parte de cemento, cuya fabricación produce emisiones de dióxido de carbono, y por otro lado el consumo de los materiales residuales de otros procesos industriales, que de no utilizarse, tendrían que almacenarse en vertederos controlados⁽⁶⁾.

La clasificación de puzolanas más aceptada comúnmente, concierne al origen de éstas, produciéndose una primera subdivisión entre naturales y artificiales. Así, la norma UNE-EN 197-1:2000⁽⁷⁾, especifica que las puzolanas deben estar compuestas principalmente por SiO₂ y Al₂O₃ reactivos; así como pequeñas cantidades de Fe₂O₃ y otros óxidos.

3.2.1 Puzolanas Naturales

Las puzolanas naturales son mayoritariamente materiales de origen volcánico, producidos por acciones eruptivas. La proyección violenta del magma en la atmósfera produce un enfriamiento rápido y, por tanto, la formación de un material que posee un elevado carácter vítreo.

Dichas puzolanas están siendo utilizadas en la construcción desde hace más de dos mil años, ya que los romanos fueron los primeros que produjeron morteros hidráulicos usando este tipo de material. De hecho, no cabe duda de la eficacia de la introducción de las puzolanas naturales en la fabricación de morteros, puesto que muchas construcciones realizadas en aquella época perduran todavía, poniendo de manifiesto la durabilidad de los materiales empleados.

3.2.2 Puzolanas Artificiales

Las puzolanas artificiales se definen como residuos o subproductos industriales de diversos orígenes y características, que tienen como carácter principal y común la actividad puzolánica. El término actividad puzolánica incluirá dos parámetros, la cantidad de cal combinada por la puzolana y la velocidad a la cual se ha consumido dicha cal. Ambos factores dependerán de la naturaleza de las puzolanas y más concretamente de la calidad y cantidad de las fases activas⁽⁵⁾.

Los materiales puzolánicos artificiales de mayor uso en la industria de la construcción, y que se aceptan para su uso en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 ⁽⁸⁾ en estos momentos, son la ceniza volante y el humo de sílice, aunque existen otros materiales utilizados en otros países como la ceniza de cáscara de arroz y el metacaolín, entre otros.

Ceniza Volante

La ceniza volante es un material sólido inorgánico formado como subproducto de la combustión del carbón en las centrales térmicas. Los sistemas colectores retienen la ceniza como una fina partícula antes de que se descargue a la atmósfera. Las características físicas, mineralógicas así como físicas, dependen en gran parte de:

- El origen y composición del carbón de partida quemado.
- El grado de pulverización que depende de la instalación productora.
- El proceso de combustión

Son partículas típicamente esféricas, con un diámetro medio entre 1µm y 150 µm. Su composición química dependerá de la composición mineral del carbón. Suelen estar compuestas de pocas fases minerales, normalmente están presentes el cuarzo, la mullita, hematites y la magnetita. El tiempo de residencia en el horno causa variaciones en el contenido alcalino y el grado de vitrificación de la ceniza volante.

La densidad promedio está sobre $2,3 \text{ g/cm}^3$ y aumenta con el contenido en óxidos de hierro y disminuye con el carbón inquemado.

La Norma UNE-EN 197-1 indica que las cenizas volantes pueden ser de naturaleza silíceas (V) o calcáreas (W). La misma norma describe a las cenizas silíceas (V), como un polvo fino de partículas esféricas que tienen propiedades puzolánicas. Consta esencialmente de dióxido de silicio reactivo y óxido de aluminio. La proporción de óxido de calcio reactivo será menor del 10.0% en masa, y el contenido de óxido de calcio libre, determinado por el método descrito en la Norma Europea UNE EN 451-1:2006 ⁽⁹⁾, no excederá del 1.0% en masa. Las cenizas volantes que tienen un contenido de óxido de calcio libre superior al 1.0% en masa, pero inferior al 2.5% en masa son también aceptables, con la condición de que el requisito de la expansión (estabilidad) no sobrepase los 10 mm cuando se ensaye según la Norma Europea UNE EN 196-3:2005 ⁽¹⁰⁾, usando una mezcla de un 30% en masa de ceniza volante silícea y un 70% en masa de cemento tipo CEM I conforme a esta parte de la norma europea. Por último, el contenido de dióxido de silicio reactivo no será inferior al 25% en masa.

La norma UNE-EN 197-1 considera a las “cenizas volantes calcáreas (W)” como un polvo fino que tiene propiedades hidráulicas y/o puzolánicas. Consta esencialmente de CaO reactiva, SiO₂ reactivo y Al₂O₃. El resto es Fe₂O₃ y otros componentes, siendo la proporción de CaO reactivo mayor del 10.0 % en masa. Las cenizas volantes calcáreas conteniendo entre el 10.0 % y el 15.0 % en masa de óxido de calcio reactivo y tendrán un contenido no inferior al 25.0 % en masa de dióxido de silicio reactivo.

La ceniza volante actúa tanto como filler entre los granos de cemento y el árido, así como una efectiva puzolana a períodos largos de curado. Una de las principales ventajas del uso de la ceniza volante es la mejora en la trabajabilidad del hormigón fresco. Dado que la densidad de las cenizas suele ser del orden de 2.3 g/cm^3 y la del cemento Pórtland de 3.15 g/cm^3 , el volumen absoluto de cenizas que se sustituye a la parte de cemento eliminada suele ser del orden de un 20-25% con lo cual el contenido en finos aumenta de una forma notable⁽¹⁾.

El uso de la ceniza volante, suele ser muy alto en países que producen relativamente poca cantidad de esta, como es el caso de Dinamarca, Suiza, Alemania y Holanda; así en estos países se reutiliza más del 95% de la ceniza producida e incluso a veces es importada de otros países. En cambio en países como China, Rusia, U.S donde su producción es mucho más alta, apenas se utiliza un 25% en la industria de la construcción^(11,12,13).

Humo de Sílice

El humo de sílice es un subproducto de las industrias de producción de las aleaciones de ferrosilicio. Este proceso de producción del silicio tiene lugar a temperaturas superiores a 2000°C, generando un humo que contiene micropartículas esféricas de dióxido de silicio amorfo. Esta es la razón por la que el producto se denomina humo de sílice o, también debido a su forma y composición química, “microsílice”, y “sílice volatilizada”.

Las principales características del humo del sílice son las siguientes ⁽⁵⁾:

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

El humo de sílice se presenta en el mercado de varias formas: seco densificado, en polvo y en suspensión con agua. Su color varía en la escala de los grises, dependiendo de su contenido en carbón.

El papel del humo de sílice en los hormigones es doble: uno físico al actuar como filler debido a su finura y, otro químico al reaccionar con el hidróxido cálcico procedente de los compuestos activos del cemento, dando lugar a silicatos cálcicos hidratados, de composición parecida a los procedentes de la hidratación del cemento y produciendo un aumento de resistencias mecánicas. No sólo son estos los efectos conseguidos, sino también un aumento de la adherencia de la pasta a los áridos, una disminución importante de la permeabilidad de los hormigones, al cerrar muchos de los conductos capilares que éste posee, y un aumento de la cohesión de la mezcla.

Como adición al hormigón las dosis empleadas suelen oscilar entre el 5-10% con respecto al peso de cemento. Un exceso del humo de sílice sólo sirve como filler, que actúa de forma física y que suele tener una demanda de agua elevada. Si la proporción de esta adición es mayor del 5% en masa, en la fabricación del hormigón, según la normativa sólo se podrá adicionar si cumple los siguientes requisitos ⁽¹⁴⁾:

- Sílice amorfa (SiO_2) $\geq 85\%$ en masa
- Pérdida por calcinación $\leq 4\%$ en masa
- Superficie específica (BET) $\geq 15 \text{ m}^2/\text{g}$

3.2.3 Residuos Agrícolas como adición al Hormigón

Los residuos agrícolas son los producidos en las actividades del llamado sector primario de la economía, (agricultura, ganadería, pesca, actividad forestal) y por industrias alimenticias. Estos residuos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Residuos de base orgánica
- Residuos de base inorgánica

Los residuos de base orgánica son ricos en productos orgánicos naturales, fundamentalmente celulosas, lignina, azúcares y materiales fibrosos. Algunas de sus características fundamentales son la ligereza, porosidad y la solubilidad de la fracción orgánica. Al ser utilizado como una adición al hormigón, éste sufre cambio en sus propiedades como ser el aligeramiento, el retraso de fraguado y endurecimiento, además de un incremento en la demanda de agua.

Las fibras naturales se pueden obtener de diversas partes de las plantas y árboles. Por ejemplo se obtienen fibras del tallo del yute, de las hojas del sisal ó el henequén, de la superficie del algodón ó el coco y de la madera del eucaliptus ó del bambú. Algunas especies se cultivan específicamente para la obtención de fibras para textiles y otras áreas industriales.

En muchos casos pueden fabricarse fibras para hormigón a partir de residuos vegetales como el bagazo de caña de azúcar y la fibra de coco verde. De igual manera se pueden fabricar partículas vegetales para ser usadas en hormigones ligeros, por ejemplo la cáscara de arroz.

Los residuos de base inorgánica son ricos en sustancias inorgánicas generalmente sílice y alúmina, con contenidos importantes de álcalis. Sus características fundamentales son granulometría fina, baja solubilidad y una fracción vítrea importante. Al ser utilizados como adición al hormigón presentan reactividad puzolánica, generalmente aumentan la durabilidad del hormigón, pero se incrementa la demanda de agua, disminuyéndose la trabajabilidad, que se debe compensar con el uso de plastificantes. Algunos ejemplos de residuos agrícolas de base inorgánica son:

- Ceniza de cáscara de arroz
- Ceniza de bagazo de caña de azúcar
- Ceniza de paja de caña
- Ceniza de cáscara de palma
- Ceniza de paja de trigo
- Ceniza de borra de café

Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar

La ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) es un residuo agrícola de base inorgánica generado por la industria de la azúcar y el etanol. El proceso para la generación de este residuo se muestra a continuación en la figura 3-1.

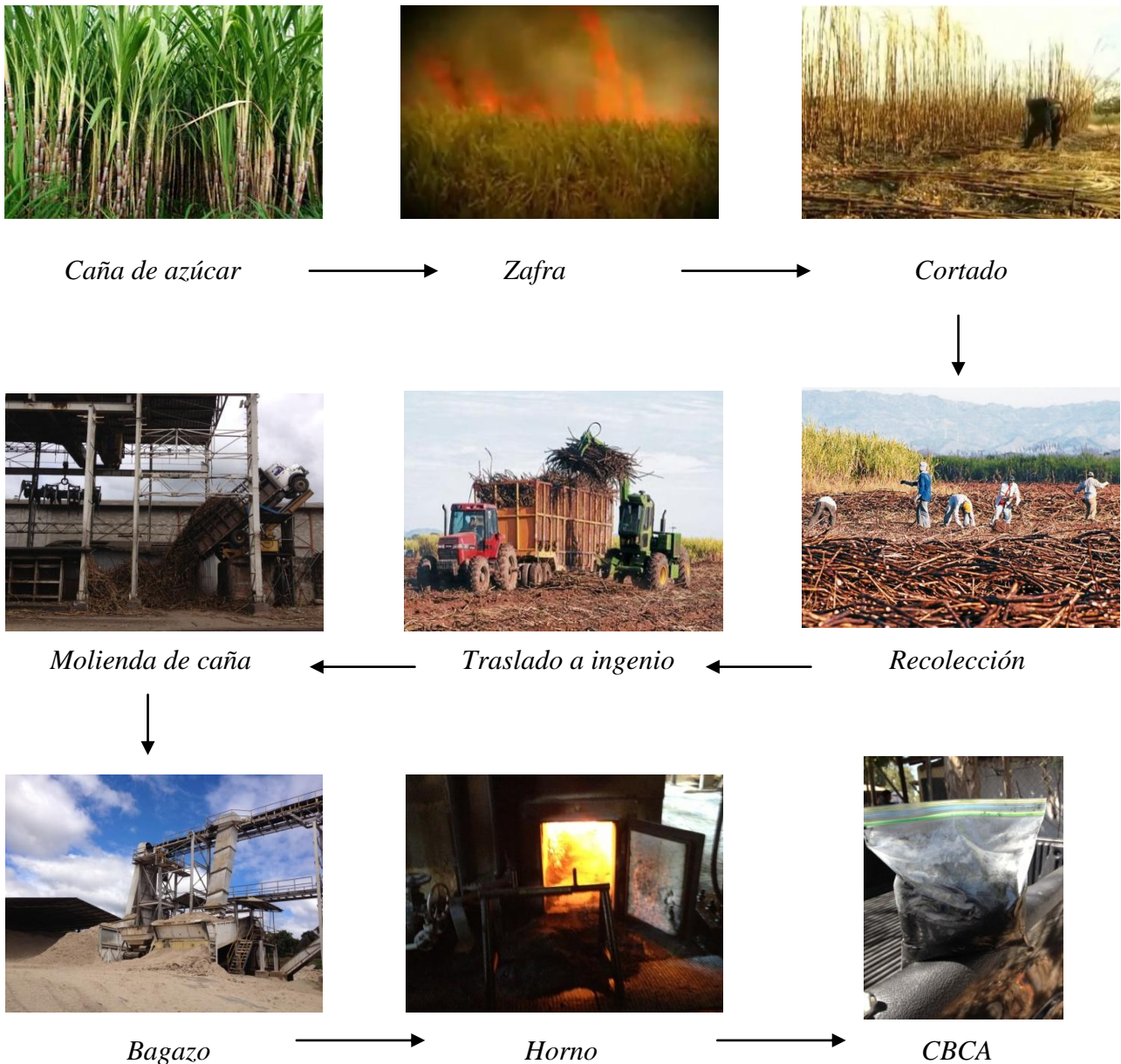


Figura 3-1 Proceso de generación de CBCA

Como se muestra en la figura 3-1, luego del proceso de la molienda de la caña y la extracción de su jugo se genera el bagazo de caña, este bagazo es almacenado generalmente bajo techo, a continuación, con la ayuda de cintas transportadoras se lleva hasta un horno donde es quemado para la generación de vapor y energía eléctrica. En el fondo del horno se deposita la ceniza de bagazo, éste se limpia periódicamente y la ceniza de bagazo es llevada a vertederos controlados.

La ceniza que queda después de que el bagazo se quemó, es el último residuo generado por la cadena de la caña de azúcar; 25 kg de ceniza son generados por cada tonelada de bagazo quemado. Para países como Brasil, máximo productor de caña en el mundo con una producción anual superior a los 600 millones de toneladas, se buscan alternativas para gestionar este residuo. Para la cosecha de 2010/2011 en Brasil, la producción de la ceniza era más de 10,000 toneladas por día ⁽²⁾.

Una alternativa para hacer uso de este residuo que se genera en grandes cantidades es incorporarlo a la matriz conglomerante de hormigones y morteros. Numerosos estudios se han realizado con respecto al uso de la CBCA como adición puzolánica, se han analizado aspectos como la reactividad, la resistencia mecánica de los hormigones, las propiedades reológicas y la durabilidad. De igual manera se han realizado investigaciones para su uso en hormigones auto-compactables así como hormigones de alta resistencia. ^(15-21,35,48-54)

3.3 INVESTIGACIONES PREVIAS DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA EN LA CONSTRUCCIÓN

3.3.1 Utilización como adición puzolánica en hormigones y morteros

A continuación, y a modo de resumen, se presentan algunos de los artículos encontrados sobre el uso de la ceniza de bagazo de caña como adición puzolánica.

Año 2007

Título del artículo: *"Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material"*

Autores: *K. Ganesan, K. Rajagopal, K. Thangavel* ⁽¹⁵⁾

Revista: *Cement & Concrete Composites, Vol. 29, pp 515-524*

Los autores de este artículo realizaron su investigación en la India; este país es uno de los máximos productores de caña de azúcar en el mundo, su producción anual es de 300 millones de toneladas así que gran cantidad de bagazo está disponible en los ingenios azucareros ^(15,16).

El objetivo de esta investigación fue evaluar la ceniza de bagazo como un material cementante suplementario, analizar las propiedades mecánicas y las propiedades de permeabilidad de hormigones con sustitución parcial de cemento por ceniza, además identificar el porcentaje de sustitución óptimo.

Los autores utilizaron cemento p^ortland convencional junto con ceniza de bagazo obtenida de la planta azucarera E.I.D. en TamilNadu, India. Se prepararon hormigones con un porcentaje de sustitución de 5, 10, 15, 20, 25 y 30% en peso de cemento por ceniza. La relación agua conglomerante fue fijada en 0.53 para todas las mezclas incluido el control. El diseño de la mezcla control se realizó para obtener 25 N/mm² a los 28 días de curado.

De igual manera se realizaron morteros con los mismos porcentajes de sustitución de ceniza y con una relación árido-conglomerante de 3:1. La composición química del cemento y de la ceniza utilizada se muestra en la tabla 3-1.

<i>Descripción</i>	<i>Cemento (%)</i>	<i>Ceniza (%)</i>
SiO ₂	19.25	64.15
Al ₂ O ₃	5.04	9.05
Fe ₂ O ₃	3.16	5.62
CaO	63.61	8.14
MgO	4.56	2.85
Na ₂ O	0.08	0.92
K ₂ O	0.51	1.35
P.F.	0.51	4.90

Tabla 3-1 Composición química del cemento y la ceniza, adaptada de la investigación de Ganesan, et al.

Los resultados de la resistencia a compresión de los morteros se muestran en la tabla 3-2. Se puede decir que el límite de sustitución máximo es de 20%. La resistencia aumenta para las sustituciones entre 5 y 15%, mientras que para la sustitución del 20% los autores consideran las resistencias equivalentes a las del control para ambas edades. Se indica que el aumento de la resistencia se puede deber a una reacción puzolánica y a la elevada superficie específica de la ceniza de bagazo. Para las sustituciones por encima del 20% la resistencia disminuye.

<i>Muestra</i>	<i>Resistencia a Compresión (N/mm²)</i>	
	<i>7 días</i>	<i>28 días</i>
Control	21.5	28.3
CBCA 5%	28.0	33.4
CBCA 10%	28.1	33.9
CBCA 15%	26.4	32.1
CBCA 20%	21.43	27.86
CBCA 25%	20.04	26.14
CBCA 30%	18.45	25.07

Tabla 3-2 Resistencia a compresión de morteros, adaptada de la investigación de Ganesan, et al.

La resistencia a compresión de las probetas de hormigón ensayadas se muestra en la figura 3-2. La figura muestra los resultados obtenidos para todos los hormigones a los 7, 14, 28 y 90 días de edad. Las sustituciones entre el 5 y 20% presentan una resistencia mayor que el control en todas las edades. Algo interesante para recalcar es que la resistencia del hormigón con 20% de ceniza a los 7 días es la misma que la del control a los 14 días, de igual manera, a los 14 días el hormigón con 20% de ceniza tiene la misma resistencia que el control a los 28 días. Las sustituciones de 25 y 30% presentan resistencias inferiores al control.

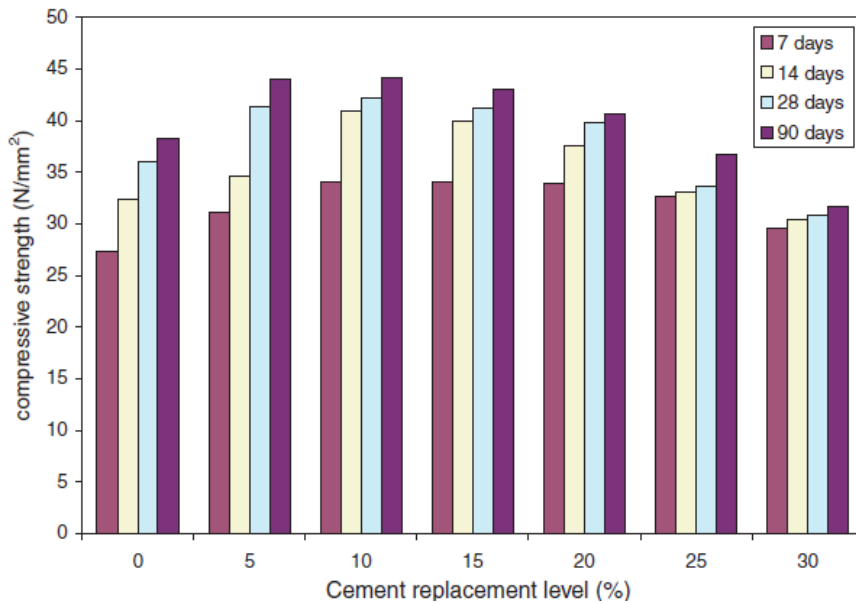


Figura 3-2 Resistencia a compresión de hormigones, extraída de la investigación de Ganesan, et al.

Los coeficientes de migración por difusión de cloruros se muestran en la figura 3-3. Las muestras con sustitución de ceniza presentan una difusión menor que el control, independiente del porcentaje de sustitución, tanto para los 28 como 90 días. Entre el 5 -25% de sustitución, la difusión disminuye a medida se aumenta el porcentaje de sustitución. Para el 30% de sustitución la difusión aumenta pero sigue siendo menor que el control.

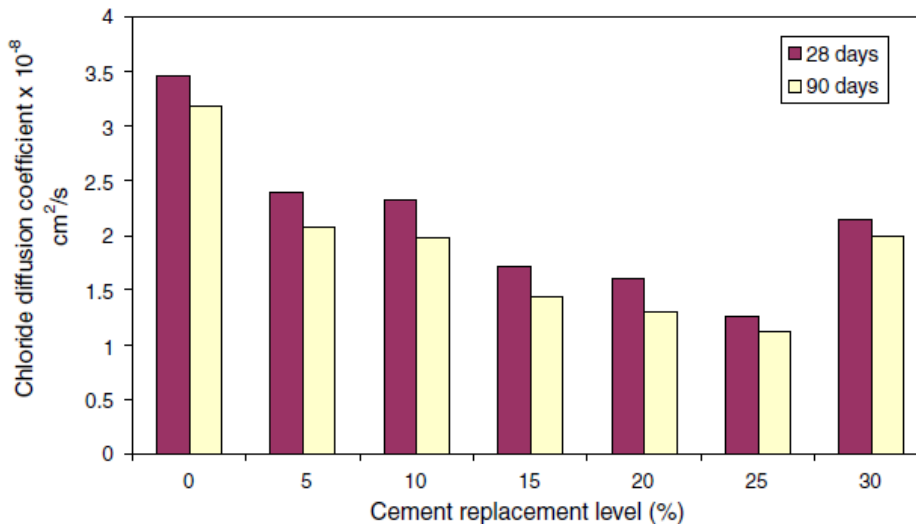


Figura 3-3 Difusión de cloruros, extraída de la investigación de Ganesan, et al.

Los autores concluyen que hasta un 20% de cemento Pórtland puede ser sustituido por ceniza de bagazo sin tener ningún efecto adverso en las propiedades del hormigón. Las ventajas de la adición de ceniza son mayor resistencia a compresión y una apreciable disminución en la penetración de cloruros.

Año 2008

Título del artículo: "*Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars*"

Autores: *G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, L.M. Tavares, E.M.R. Fairbairn* ⁽¹⁷⁾

Revista: *Cement & Concrete Composites, Vol. 30, pp 410-418*

El objetivo establecido por los autores para esta investigación fue evaluar los efectos físicos y químicos que produce la adición de ceniza de bagazo a morteros de cal y de cemento. Se analizó la influencia de la distribución granulométrica de la ceniza en la resistencia a compresión.

La ceniza de bagazo utilizada en esta investigación fue recolectada de una fábrica de azúcar y alcohol en Río de Janeiro, Brasil. En la fábrica el bagazo es quemado entre 700 y 900°C, dependiendo de la humedad contenida en el bagazo. El ensayo de difracción de Rayos-X, mostró que existe un predominio de cristobalita y cuarzo en la ceniza, esto es representativo de biomasa quemada a elevadas temperaturas. La composición química de la ceniza utilizada así como la del cemento se muestra en la tabla 3-3.

<i>Descripción</i>	<i>Cemento (%)</i>	<i>Ceniza (%)</i>
SiO ₂	20.85	78.34
Al ₂ O ₃	4.23	8.55
Fe ₂ O ₃	5.25	3.61
CaO	63.49	2.15
Na ₂ O	0.16	0.12
K ₂ O	0.40	3.46
P.F.	1.05	0.42

Tabla 3-3 Composición química del cemento y la ceniza, adaptada de la investigación de Cordeiro, et al.

La ceniza fue molida entre 8 y 240 minutos, posteriormente se realizaron ensayos de granulometría láser, la distribución granulométrica en función de los distintos tiempos de molienda se muestra en la figura 3-4.

Se prepararon morteros con una relación hidróxido cálcico-arena-ceniza de 1:9:2 y, el índice de actividad puzolánica fue determinado por el promedio de resistencia a compresión obtenida de estos morteros.

De igual manera los autores prepararon morteros con una sustitución parcial de ceniza de 35% en peso por cemento pòrtland. La relación conglomerante-árido utilizada fue de 1:3, y la relación agua/binder fue de 0.52.

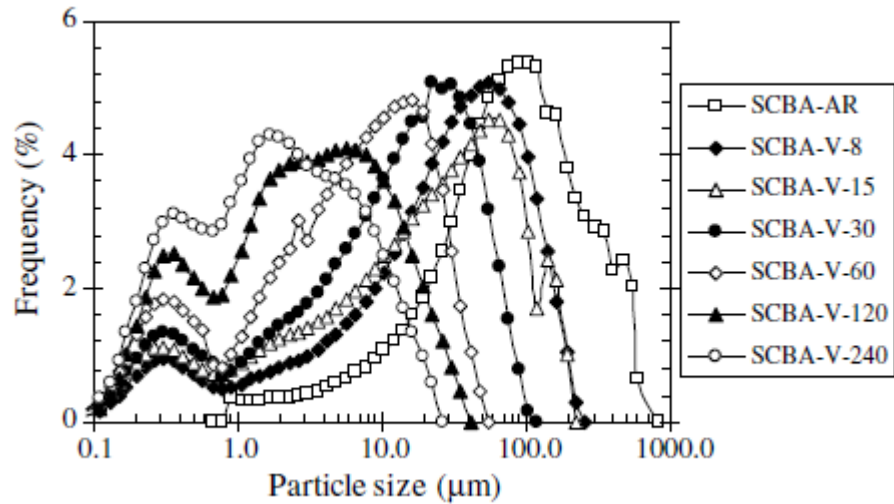


Figura 3-4 Granulometría de Ceniza, extraída de la investigación de Cordeiro, et al.

Se puede apreciar en la figura 3-4 que a medida aumenta el tiempo de molienda, el tamaño de partícula disminuye. En relación a la influencia del tamaño de partícula en la actividad puzolánica, los autores determinaron que a medida se disminuye el tamaño de partícula, el índice de actividad puzolánica aumenta, tanto para los morteros con cemento como para los morteros con cal. Los resultados del índice de actividad puzolánica se muestran en la tabla 3-4.

<i>Tiempo Molienda (min)</i>	<i>Diámetro Medio (µm)</i>	<i>Índice puzolánico de mortero con cemento (%)</i>	<i>Índice puzolánico de mortero con cal (MPa)</i>
0	76.3	49.0	3.9
8	27.5	71.0	5.1
15	19.8	77.0	5.3
30	12.0	79.0	6.2
60	5.6	89	6.7
120	2.7	100	8.5
240	1.7	103	8.6

Tabla 3-4 Índice puzolánico de morteros, adaptada de la investigación de Cordeiro, et al.

La tabla 3-4 muestra claramente como la ceniza de bagazo mejora el índice de actividad puzolánica. De acuerdo a los estándares de Estados Unidos, que en su norma ASTM C 618-05 establece que el valor mínimo de índice puzolánico necesario para clasificar un material como puzolana es el 75%. Los autores indican que los resultados de su investigación muestran que a los 15 minutos de molienda la ceniza ya ha superado ese valor límite.

Los autores concluyen que el tamaño de partícula es determinante en la actividad puzolánica que presenta la ceniza de bagazo; además concluyen que con la fracción más fina se obtienen mejores resultados para los valores de la resistencia a compresión.

Año 2009

Título del artículo: *"Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete"*

Autores: *Nuntachai Chusilp, Chai Jaturapitakkul, Kraiwood Kiattikomol* ⁽¹⁸⁾

Revista: *Construction and Building Materials, Vol. 23, pp 3352-3358*

Según los datos proporcionados por los autores, en Tailandia se generan más de 200,000 toneladas de ceniza de bagazo al año. Generalmente el bagazo es desechado en vertederos controlados, por tanto se está convirtiendo en una carga medioambiental difícil de controlar.

El objetivo de esta investigación fue estudiar la resistencia a compresión, la permeabilidad y la evolución del calor de hidratación de hormigones que contienen ceniza de bagazo molida (CBCA).

Los autores utilizaron cemento Pórtland Tipo I, además CBCA de una fábrica de azúcar en el centro de Tailandia. Las cenizas se molieron utilizando un molino de bolas hasta que las partículas retenidas en un tamiz N ° 325 (con aberturas de 45 µm) eran menos de 5% en peso. La composición química del cemento y la ceniza se muestran en la tabla 3-5.

Se utilizó CBCA para reemplazar el cemento Portland Tipo I en 10, 20, y 30% en peso de cemento. El contenido de conglomerante así como la relación agua conglomerante (W / B) se ajustaron para ser constantes, en todos los hormigones: 350 kg/m³ y 0.50, respectivamente. La trabajabilidad de todos los hormigones se controló bajo un mismo rango, utilizando superplastificante para el caso de los que contenían CBCA.

<i>Descripción</i>	<i>Cemento (%)</i>	<i>Ceniza (%)</i>
SiO ₂	20.90	64.88
Al ₂ O ₃	4.76	6.40
Fe ₂ O ₃	3.41	2.63
CaO	65.41	10.69
MgO	1.25	1.55
SO ₃	2.71	1.56
P.F.	0.96	8.16

Tabla 3-5 Composición química del cemento y la ceniza, adaptada de la investigación de Nuntachai, et al.

Para analizar la resistencia a compresión se fabricaron probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Las probetas fueron desmoldadas a las 24 horas y curadas en agua hasta su edad de rotura. Las roturas se realizaron a los 28 y 90 días.

Para analizar la permeabilidad se utilizó el método del flujo a presión constante. Por otra parte, la evolución del calor en el hormigón se evaluó en probetas cúbicas de 450 mm. Las probetas fueron cubiertas con un aislante y mediante el uso de un termopar se registró la temperatura del hormigón por un período de 168 horas (7 días).

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión se muestran en la tabla 3-6. Los hormigones con 10%, 20% y 30% de CBCA tuvieron resistencias superiores a las del control; el índice de actividad resistente fue de 1.04, 1.10 y 1.07 respectivamente a los 28 días, mientras que a los 90 días fue de 1.06, 1.13 y 1.08. Los resultados obtenidos muestran que la ceniza utilizada es un buen material puzolánico.

<i>Muestra</i>	<i>Resistencia a Compresión (MPa)</i>	
	<i>28 días</i>	<i>90 días</i>
Control	36.9	41.8
CBCA 10%	38.2	44.4
CBCA 20%	40.5	47.4
CBCA 30%	39.3	45.0

Tabla 3-6 Resultados de resistencia a compresión, adaptada de la investigación de Nuntachai, et al.

Los resultados del ensayo de permeabilidad así como los de la relación de permeabilidad se muestran en la tabla 3-7. La relación de permeabilidad se definió como la permeabilidad del hormigón con CBCA con respecto a la permeabilidad del hormigón control a la misma edad. Se encontró que la permeabilidad de todos los hormigones disminuye al aumentar el tiempo de curado, además la adición de CBCA disminuye la permeabilidad considerablemente, a mayor porcentaje de sustitución, menor es la permeabilidad.

<i>Muestra</i>	<i>Permeabilidad $\times 10^{-12}$, k (m/s) - k/kct</i>	
	<i>28 días</i>	<i>90 días</i>
Control	1.32 - 1.00	1.26 - 1.00
CBCA 10%	1.22 - 0.92	0.73 - 0.58
CBCA 20%	1.08 - 0.82	0.48 - 0.38
CBCA 30%	0.66 - 0.50	0.39 - 0.31

Tabla 3-7 Resultados de permeabilidad, adaptada de la investigación de Nuntachai, et al.

Los resultados del ensayo de la evolución de temperatura se muestran en la tabla 3-8. Los resultados de este estudio demuestran que el incremento máximo de temperatura para hormigones con CBCA es menor que para el hormigón control, independientemente de cuál sea el porcentaje de sustitución. Porcentajes de sustitución más altos disminuyen el contenido de cemento en el hormigón y se logra disminuir la evolución del calor en el mismo.

<i>Muestra</i>	<i>Temp. Inicial (°C)</i>	<i>Temp. Max (°C)</i>	<i>Max aumento de Temp. (°C)</i>	<i>Reducción de Temp. (°C)</i>	<i>Reducción de Temp. (%)</i>
Control	27	57	30		0
CBCA 10%	28	54	26	4	13
CBCA 20%	30	53	23	7	23
CBCA 30%	30	50	20	10	33

Tabla 3-8 Resultados de evolución de temperatura, adaptada de la investigación de Nuntachai, et al.

Los autores llegan a la conclusión que la ceniza de bagazo es un material puzolánico apto para ser utilizado en el hormigón. La adición de ceniza mejora la resistencia, la permeabilidad y la evolución del calor en el hormigón. Además el porcentaje de sustitución óptimo a utilizarse es de 20%.

Año 2009

Título del artículo: *"Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash"*

Autores: *Cordeiro, R.D. Toledo Filho, E.M.R. Fairbairn* ⁽¹⁹⁾

Revista: *Construction and Building Materials, Vol. 23, pp 3301-3303*

El objetivo de los autores de esta investigación es caracterizar una CBCA altamente reactiva, analizando la influencia de distintas temperaturas de calcinación.

El bagazo utilizado procedía de una fábrica de azúcar y alcohol en el Estado de Río de Janeiro (Brasil). Se lavó en el laboratorio con agua destilada y se secó a 45 ° C en un horno ventilado para eliminar las impurezas. Posteriormente, las muestras de bagazo fueron quemadas en un horno eléctrico ventilado con un incremento de temperatura constante de 10°C / min, primero a 350 ° C durante 3 horas y, a continuación, a diferentes temperaturas que van desde 400 a 800 ° C, en incrementos de 100 ° C, durante 3 horas.

Luego de la calcinación las muestras fueron enfriadas dentro del horno, posteriormente se molieron con un molino de bolas. A cada muestra se le realizó un ensayo de pérdida al fuego, además de difracción de Rayos-X. Para determinar el índice de actividad puzolánica se fabricaron morteros con un 35% de sustitución de cemento por ceniza.

Los resultados del ensayo de pérdida al fuego así como del índice de actividad puzolánica se muestran en la tabla 3-9. Los valores de la pérdida al fuego disminuyen al aumentar la temperatura de calcinación. Los resultados indican que las condiciones de calcinación adoptadas son suficientes para eliminar el carbón y otros compuestos volátiles con temperaturas superiores a 600°C.

<i>Temperatura de Calcinación (°C)</i>	<i>Pérdida al Fuego (%)</i>	<i>Índice Puzolánico (%)</i>
400	84.5	28
500	14.0	73
600	5.7	77
700	3.0	63
800	1.3	69

Tabla 3-9 Influencia de la temperatura de calcinación, adaptada de la investigación de Cordeiro, et al.

El índice de actividad puzolánica de la ceniza de bagazo quemada a 400, 500 y 600°C aumenta con el aumento de la temperatura de calcinación debido a la menor cantidad de carbón inquemado. A temperaturas superiores a 600°C se forman compuestos cristalinos y el índice de actividad puzolánica disminuye. Los resultados demuestran que la temperatura adecuada para quemar el bagazo y poder obtener una ceniza que tenga alta reactividad puzolánica es 600°C.

Los autores concluyen que los resultados de esta investigación indican que la temperatura de calcinación es un parámetro importante para la producción de CBCA con actividad puzolánica. Y que la ceniza de bagazo producida por la calcinación en aire a 600 ° C durante 3 horas (3 horas después a 350 ° C) con una velocidad de calentamiento de 10 ° C / min, presenta sílice amorfa, un bajo contenido en carbono y una alta superficie específica. La muestra producida con estas características presenta por tanto una actividad puzolánica considerable.

Año 2012

Título del artículo: "*Utilization of bagasse ash in high-strength concrete*"

Autores: *Sumrerng Rukzon, Prinya Chindaprasirt* ⁽²⁰⁾

Revista: *Materials and Design, Vol. 34, pp 45-50*

Los autores definieron que el propósito de esta investigación era utilizar la ceniza del bagazo como material puzolánico para reemplazar una parte de cemento pórtland, para producir hormigón de alta resistencia, así como para reducir los efectos ambientales negativos y el volumen de ceniza que es llevada a vertederos. Indican que los parámetros determinantes son la resistencia a la compresión, la porosidad, la absorción de agua y la penetración de cloruros en hormigones, para entender las características de hormigones con cemento pórtland y adición de ceniza de bagazo en el futuro.

La ceniza utilizada para el estudio fue obtenida en una planta azucarera en Tailandia. La composición química de la ceniza así como del cemento pórtland utilizado se muestran en la tabla 3-10.

<i>Descripción</i>	<i>Cemento (%)</i>	<i>Ceniza (%)</i>
SiO ₂	25.1	65.0
Al ₂ O ₃	5.5	4.8
Fe ₂ O ₃	5.9	0.9
CaO	55.0	3.9
MgO	3.4	-
K ₂ O	0.5	2.0
SO ₃	2.7	0.9
P.F.	0.9	10.5

Tabla 3-10 Composición química de cemento y ceniza, adaptada de la investigación de Rukzon, et al.

Los autores fabricaron hormigones en los que sustituyó un 10, 20 y 30% en peso de cemento por ceniza de bagazo, la dosificación de los hormigones se diseñó para obtener un hormigón de alta resistencia a los 28 días, es decir con una resistencia a compresión de 65 MPa. Para todos los hormigones se mantuvo constante el material cementante en 560 kg/m³, además la relación agua-conglomerante fue de 0.3 para todos los hormigones. Se utilizó aditivo superplastificante para poder mantener una alta trabajabilidad.

Para analizar la resistencia a compresión se fabricaron probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Las probetas fueron curadas en agua a temperatura controlada de 23 ± 2 °C. Las probetas se ensayaron a los 7, 28 y 90 días de curado.

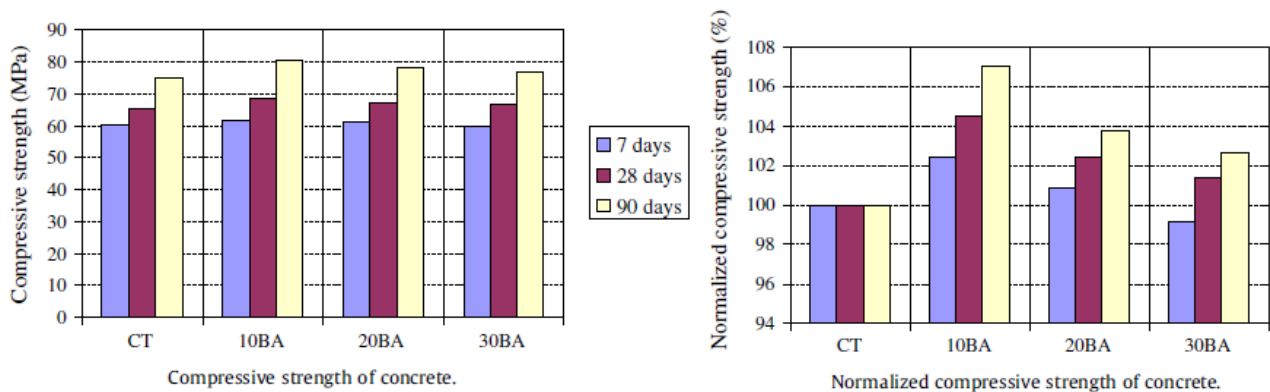


Figura 3-5 Resistencia a compresión, extraída de la investigación de Rukzon, et al.

Los resultados de los ensayos a compresión se muestran en la figura 3-5. Se observó una alta resistencia a los 90 días para los hormigones con CBCA, independientemente del porcentaje de sustitución. Los hormigones con 10 y 20% de sustitución presentaron una resistencia mayor que el control a todas las edades, mientras que el hormigón con 30% de sustitución tuvo una resistencia igual al 99% del control a los 7 días, posteriormente a los 28 y 90 días presenta una resistencia superior al control. Los hormigones con 10% de sustitución presentaron los valores más elevados de resistencia en todas las edades.

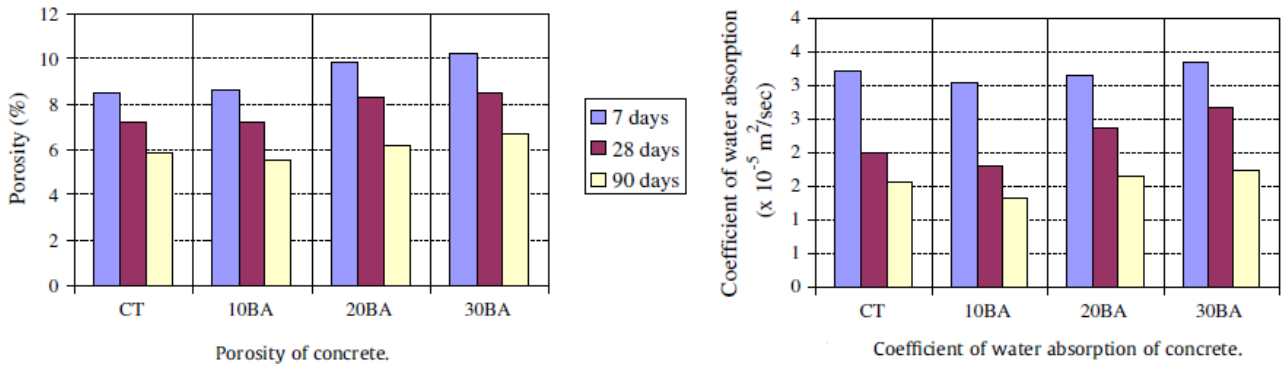


Figura 3-6 Porosidad y absorción de agua, extraída de la investigación de Rukzon, et al.

Los resultados de porosidad y absorción de agua se muestran en la figura 3-6. Los valores de porosidad indican que los hormigones con CBCA presentan una porosidad mayor que el control, independientemente del porcentaje de sustitución. La porosidad aumenta a medida se aumenta el porcentaje de sustitución.

En lo referente a la absorción de agua, el hormigón 10% de sustitución presenta una absorción menor que el control a todas las edades. Por otra parte los hormigones con 20 y 30% de sustitución presentan una absorción mayor que el control a todas las edades.

Los resultados del ensayo de penetración de cloruros así como del coeficiente de difusión se muestran en la figura 3-7.

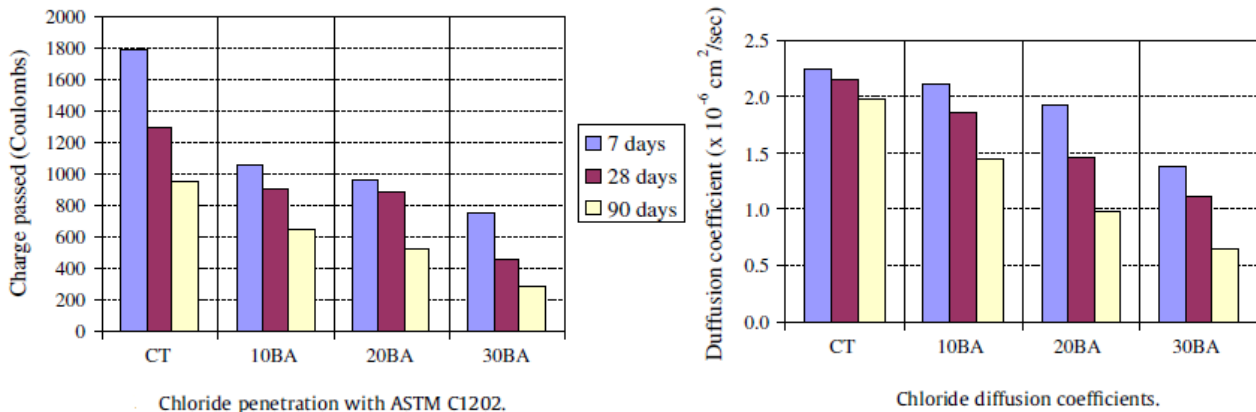


Figura 3-7 Penetración de Cloruros, extraída de la investigación de Rukzon, et al.

Los autores indican que a pesar de la mayor porosidad presentada por los hormigones con ceniza de bagazo, la penetración de cloruros disminuye sustancialmente con la adición de ceniza. La penetración de cloruros disminuye para todas las edades con respecto al control, independientemente del porcentaje de sustitución. A medida que aumenta el porcentaje de sustitución la penetración de cloruros disminuye.

Los autores concluyen que es posible producir hormigón de alta resistencia con la adición de la ceniza de bagazo finamente molida. La incorporación de 30% de CBCA disminuye las penetraciones de cloruro y mejora la resistencia a compresión del hormigón. Los resultados indican que los hormigones que contiene hasta 30% de sustitución de CBCA presentan una resistencia a compresión entre el rango de los 65.6 a 68.6 MPa (a 28 días), con una resistencia superior a la del hormigón control. Además, la incorporación de CBCA mejora significativamente la resistencia a la penetración de cloruros del hormigón debido a la reacción puzolánica, y, a la reducción de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente en el hormigón.

Año 2013

Título del artículo: *"Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste"*

Autores: *Gritsada Sua-iam, Natt Makul* ⁽²¹⁾

Revista: *Journal of Cleaner Production, Vol. 57, pp 308-319*

El objetivo establecido por los autores para esta investigación fue evaluar el efecto de añadir polvo de caliza a hormigones auto-compactables en los que se ha incorporado grandes cantidades de ceniza de bagazo de caña de azúcar en sustitución del árido fino. Se analizó la trabajabilidad y la resistencia a compresión del hormigón.

La composición química del cemento, la ceniza de bagazo y el polvo de caliza utilizado se muestran en la tabla 3-11.

<i>Descripción</i>	<i>Cemento (%)</i>	<i>Ceniza (%)</i>	<i>Polvo de Caliza</i>
SiO ₂	16.39	65.26	8.97
Al ₂ O ₃	3.85	6.91	1.02
Fe ₂ O ₃	3.48	3.65	0.37
MgO	0.64	1.10	2.38
CaO	68.48	4.01	46.77
Na ₂ O	0.06	0.33	0.02
K ₂ O	0.52	1.99	0.13
SO ₃	4.00	0.21	0.33
P.F.	1.70	15.34	39.54

Tabla 3-11 Composición química de cemento, ceniza y polvo de caliza, adaptada de la investigación de Sua-iam, et al.

La dosificación de los distintos hormigones preparados se muestra en la tabla 3-12. Las mezclas se prepararon con distintos porcentajes de árido fino. El cemento pórtland y el árido grueso se mantuvieron constantes en 550 kg/m³ y 708 kg/m³ respectivamente en todas las mezclas.

Se utilizó la CBCA y el polvo de caliza para sustituir la arena de río en un 10, 20, 40, 60, 80 y 100% en volumen.

No.	Mixture codes	Materials (kg/m ³)					HRWR (%by weight of cement)
		OPC	Fine aggregate			Coarse aggregate	
			Sand	BA	LS		
1	Control	550	813	0	0	708	2.0
2	BA10	550	731	72	0	708	2.0
3	BA20	550	650	144	0	708	2.0
4	BA40	550	488	288	0	708	2.0
5	BA60	550	325	432	0	708	2.0
6	BA80	550	163	577	0	708	2.0
7	BA100	550	—	721	0	708	2.0
8	LS10	550	731	0	85	708	2.0
9	LS20	550	650	0	169	708	2.0
10	LS40	550	488	0	339	708	2.0
11	LS60	550	325	0	508	708	2.0
12	LS80	550	163	0	677	708	2.0
13	LS100	550	0	0	846	708	2.0
14	BA5LS5	550	731	36	42	708	2.0
15	BA10LS10	550	650	72	85	708	2.0
16	BA20LS20	550	488	144	169	708	2.0
17	BA30LS30	550	325	216	254	708	2.0
18	BA40LS40	550	163	288	339	708	2.0
19	BA50LS50	550	—	360	423	708	2.0

Tabla 3-12 Dosificación de hormigón auto-compactable, extraída de la investigación de Sua-iam, et al.

La trabajabilidad se midió mediante el ensayo del cono de Abrams, el embudo en V y el anillo - J. El escurrimiento utilizando el cono de Abrams se mantuvo para todas las mezclas en promedio entre 70 ± 2.5 cm, lo que es un indicativo de una buena fluidez. El tiempo de escurrimiento aumenta con el aumento en la sustitución de árido fino por ceniza y polvo de caliza. Los resultados del escurrimiento mediante el cono de Abrams se muestra en la figura 3-8, los resultados mostrados indican el tiempo en alcanzar un escurrimiento de 50 cm de diámetro. El mayor tiempo se dio para una sustitución de 20% de ceniza y un 60% de polvo de caliza.

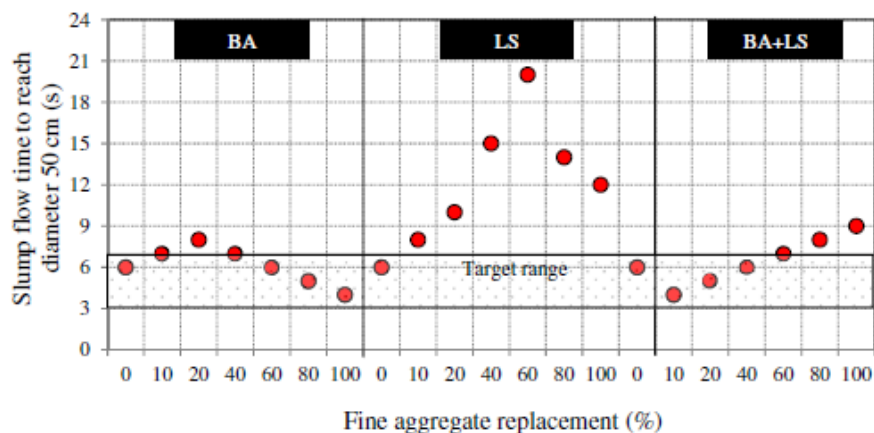


Figura 3-8 Tiempo requerido para escurrimiento de 50 cm, extraída de la investigación de Sua-iam, et al.

Los resultados del ensayo de consistencia mediante el embudo en V se muestran en la figura 3-9. El tiempo de escurrimiento aumenta con el porcentaje de sustitución de CBCA, ya que dichas partículas absorben agua. El tiempo de escurrimiento disminuye al aumentar el porcentaje de sustitución de polvo de caliza por encima del 60%. Las mezclas hasta el 40% de sustitución de ceniza y polvo de caliza presentan un escurrimiento dentro del rango aceptable.

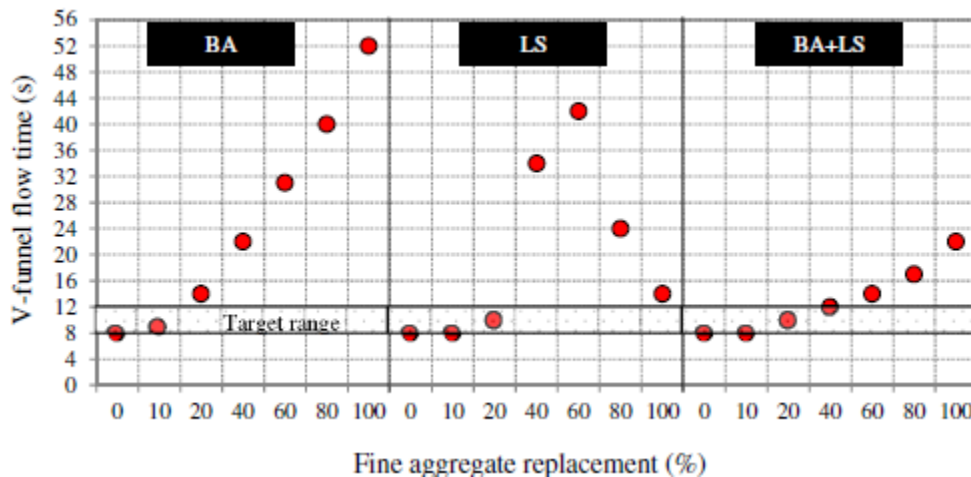


Figura 3-9 Tiempo requerido para escurrimiento en embudo en V, extraída de la investigación de Sua-iam, et al.

La diferencia de escurrimiento entre el ensayo libre del cono de Abrams y el ensayo con el anillo-J se muestran en la figura 3-10. Menos de 50 mm de bloqueo se presentaron para los hormigones con menos de 40% de sustitución de CBCA ó de polvo de caliza, igualmente para hormigones con mendedos de 60% de sustitución de CBCA + polvo de caliza.

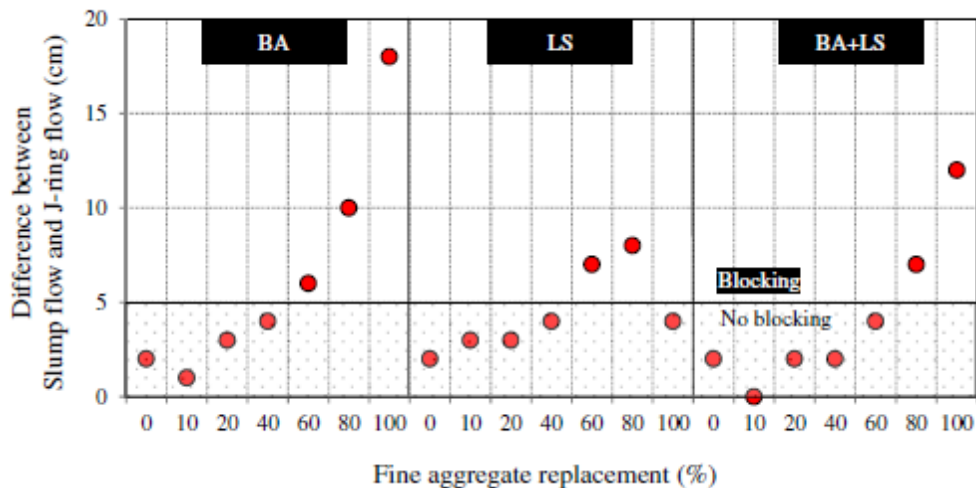


Figura 3-10 Bloqueo de escurrimiento con Anillo-J, extraída de la investigación de Sua-iam, et al.

Los resultados de los ensayos a compresión se muestran en la figura 3-11. La resistencia a compresión se ve disminuida notablemente al sustituir arena por CBCA, a mayor porcentaje de sustitución menor resistencia. La resistencia disminuye igualmente para sustituciones mayores al 10% de polvo de caliza.

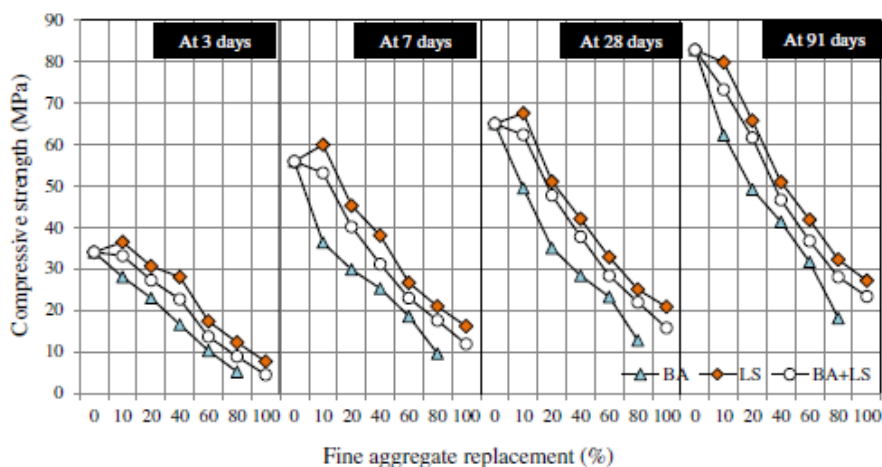


Figura 3-11 Resistencia a compresión, extraída de la investigación de Sua-iam, et al.

Los autores concluyen que la trabajabilidad es adecuada para hormigones con sustituciones hasta 40% de ceniza y polvo de caliza por árido fino, sin embargo por los resultados obtenidos en la resistencia a compresión, la sustitución óptima es otra vez de un 20%.

3.3.2 Otras investigaciones relacionadas con el uso de los residuos de la caña de azúcar en la construcción

Numerosas investigaciones se han desarrollado en Cuba por Ernesto Villar Cociña, con colaboración principalmente de Moisés Frías y Eduardo Valencia Morales. En sus investigaciones realizan la caracterización de ceniza de bagazo de caña así como de ceniza de paja de caña; además estudian la cinética de la reactividad puzolánica mediante análisis de conductividad eléctrica, tanto de la ceniza de bagazo como la ceniza de paja de caña de azúcar. Por otra parte, analizan la influencia de las condiciones de calcinación⁽²²⁻³¹⁾. Otras investigaciones relacionadas con el uso de la paja de caña y de la ceniza de paja de caña se han llevado a cabo en Cuba, Colombia y España⁽³²⁻³⁴⁾.

En España se realizó una investigación por Jordi Payá con colaboración de José Monzó y María Victoria Borrachero. Se realizó una caracterización química, física y mineralógica, para evaluar la posibilidad del uso de una ceniza de bagazo de caña procedente de Colombia como una adición puzolánica en matrices de cemento Pórtland⁽³⁵⁾.

La ceniza de bagazo de caña también ha sido estudiada para ser incorporada en la fabricación de materiales de bajo coste económico y medioambiental. Dichas investigaciones relacionadas con este tema se han realizado principalmente en Brasil^(2, 36-40).

4. DESARROLLO DEL PLAN EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL PLAN EXPERIMENTAL

4.1 MATERIAS PRIMAS A EMPLEAR

4.1.1 Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar

Se utilizaron 3 muestras de cenizas de bagazo de caña de azúcar como posibles puzolanas de procedencia agrícola de distintas partes de Honduras. Una muestra fue obtenida de un ingenio azucarero ubicado en la ciudad de San Pedro Sula (SPS), otro en la ciudad de Choluteca (CHOLU) y el último ubicado en la comunidad de Cantarranas en el ingenio "3 Valles" (3V). Como se explicará más adelante después de la caracterización de dichas cenizas se decidió utilizar solamente dos muestras para realizar las pastas y morteros de cemento Pórtland,

4.1.2 Cemento

Para la elaboración de pastas y morteros se utilizó cemento Pórtland gris tipo CEM I-52.5R suministrado por la empresa Cemex (Buñol-Valencia). La composición química del cemento se detalla en la tabla 4-1.

Óxido	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.F. ¹	R.I. ²
% en peso	19.9	5.38	3.62	63.69	2.14	3.66	1.17	0.1	2.02	0.95

¹Pérdida al fuego. ²Residuo Insoluble

Tabla 4-1. Composición química del Cemento tipo CEM I-52.5R

4.1.3 Agua

El agua utilizada en la preparación de pastas y morteros es el agua de la red potable que suministra a la Universidad Politécnica de Valencia, el análisis promedio es el indicado en la tabla 4-2.

Cloruros (mg/l)	Ca y Mg (mg/l de CaCO ₃)	Sulfatos (mg/l)	Conductividad a 20°C (μS/cm)	pH
93	480	298	939	7.88

Tabla 4-2. Análisis de agua de amasado

4.1.4 Hidróxido Cálcico.

Se utilizó el hidróxido cálcico en la preparación de pastas cal/puzolana, suministrado por la casa Panreac de una pureza del 95% en hidróxido cálcico.

4.1.5 Áridos

En la fabricación de morteros se utilizaron una mezcla de áridos de carácter silíceo, suministrado por la empresa Caolines Lapidra (Liria - Valencia). Se preparó una mezcla de arenas, una gruesa AFA 45 (39%), una media AFA 0.8 (14%) y una fina AFA 60 (47%). El módulo de finura fue de 4.3.

4.2 EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

4.2.1 Procedimientos para la obtención de las cenizas

Para la obtención de las muestras de ceniza se visitaron los tres ingenios azucareros, tanto para la ceniza de SPS como de Choluteca la muestra se tomó directamente del fondo del horno donde se quema el bagazo para la obtención de vapor y energía eléctrica, la ceniza se enfrió rápidamente con un chorro de agua directo al salir del fondo del horno.



Figura 4-1 Obtención de ceniza procedente de Choluteca

Para el caso de la ceniza de 3 Valles la muestra se tomó del canal de desagüe del horno que deriva en el vertedero de residuos, por el canal de desagüe circula una corriente de agua permanente que enfría la ceniza al salir del horno. Todas las muestras de ceniza fueron secadas al aire previo su traslado al laboratorio de la UPV.



Figura 4-2 Obtención de ceniza procedente de 3 Valles

4.2.2 Molienda

Para la utilización de muchas de las puzolanas es necesario realizar una molienda previa ya que esto mejora sustancialmente su reactividad, tal es el caso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar. La ceniza se molió hasta alcanzar un tamaño de partícula medio de 10 micras.

Para la molienda de las cenizas originales se utilizó un molino de bolas modelo NANNETTI-SPEEDY 1, que consiste en un recipiente de cerámica de un litro de capacidad, en el cual se introducen bolas de alúmina de 2 cm de diámetro, a continuación se introduce la cantidad de ceniza necesaria para cubrir las bolas dentro del recipiente; mediante un temporizador se programa el molino para el tiempo de molienda deseado y posteriormente se procede a la recogida de la ceniza molida. El molino de bolas y la molienda de la ceniza se pueden apreciar en la figura 4-3. La cantidad de bolas utilizadas, la cantidad de ceniza introducida y el tiempo de molienda para cada muestra se indican en la tabla 4-3.

<i>Muestra</i>	<i>Número de Bolas</i>	<i>Cantidad de Ceniza (g)</i>	<i>Tiempo Molienda (min)</i>
San Pedro Sula	80	145	15
Cholulteca	80	143	15
3 Valles	80	400	45

Tabla 4-3 Parámetros para molienda de cenizas



Figura 4-3 Molienda de cenizas

4.2.3 Granulometría por difracción láser

Para la determinación de la distribución de tamaños de partículas se utilizó el analizador de tamaños de partícula Mastersizer 2000 de Malvern Instruments que se muestra en la figura 4-4. Las principales características de este aparato son:

- Rango de medida en la franja de 0.02 a 2000 micras.
- Principio de medición: dispersión de Fraunhofer y Mie.
- Fuentes de luz
 - Luz roja: Láser de helio neón.
 - Luz azul: Fuente de luz de estado sólido.
- Sistema de detección
 - Luz roja: Dispersión frontal, dispersión lateral y retrodifracción.
 - Luz azul: Dispersión de ángulo frontal y retrodispersión



Figura 4-4 Equipo de Granulometría por difracción láser

4.2.4 Fluorescencia de Rayos X

Para la determinación de la composición química de las cenizas, se ha utilizado la técnica de fluorescencia de Rayos X. El equipo empleado es PHILIPS PW 1606 X Ray con espectrómetro simultáneo, perladora automática PerlX3 Philips y un programa de fusión. Los análisis han sido realizados en la Universidad de Alicante.

4.2.5 Difracción de Rayos X (DRX)

La espectroscopía de difracción de Rayos X estudia la estructura cristalina mediante la desviación que sufre un haz primario o monocromático de Rayos X cuando incide sobre una muestra. Los ángulos de desviación están íntimamente ligados con la distancia entre los planos de la red cristalina del material. La espectroscopía de Rayos X, al igual que la espectroscopía óptica, se basa en la medida de la emisión, absorción, dispersión, fluorescencia y difracción de la radiación electromagnética. Estas medidas dan una información muy útil sobre la composición y la estructura de la materia.

El método de rayos X de polvo se basa en el hecho que cada sustancia cristalina da una única figura de difracción. Así, si se puede encontrar un ajuste exacto entre la figura de difracción de una muestra desconocida y el patrón de difracción de una sustancia conocida, para poder asumir su identidad química y mineralógica.

Para el caso del presente trabajo fin de máster, el estudio por difracción de rayos X de las cenizas de bagazo nos mostrará si se trata de muestras cristalinas o por el contrario tienen una estructura amorfa, y cuál es su composición mineralógica cualitativa.

El difractómetro de rayos X utilizado es un modelo Brucker AXS D8 Advance, y se muestra en la figura 4-5. Se ha utilizado la radiación $K\alpha$ de Cu y monocromador secundario (filtro de Níquel) que elimina la radiación $K\beta$ de Cu. La intensidad y voltaje del tubo generador de rayos X se ha ajustado en todas las medidas a 20 mA y 40KV, respectivamente. Se registraron los difractogramas para el intervalo 2θ entre 5 y 70° , con un ángulo de paso de 0,02 y un tiempo de acumulación de 2 segundos.

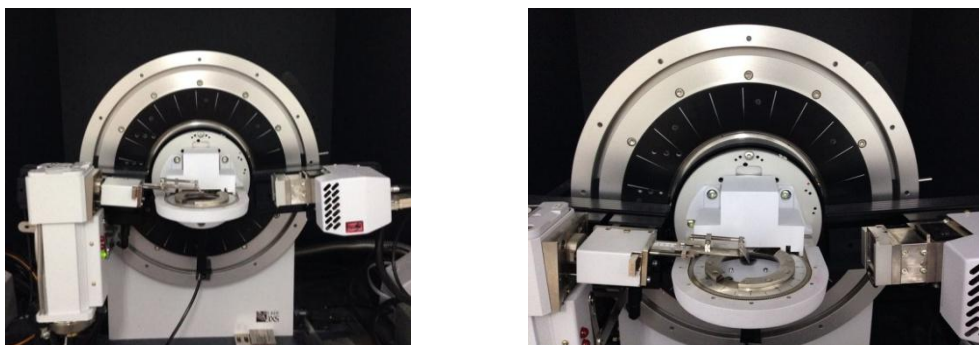


Figura 4-5 Difractómetro de Rayos X

4.2.6 Análisis Termogravimétrico

Los métodos de análisis termogravimétrico se basan en el estudio de la variación de masa de un material con la variación de la temperatura. El método usado en este trabajo es la termogravimetría (TG), donde se registra continuamente la variación de masa de una muestra colocada en una atmósfera controlada, en función de la temperatura, o del tiempo, al ir aumentando la temperatura de la muestra. La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo se denomina termograma o curva de descomposición térmica.

En el estudio de las pastas de cemento/puzolana y de cal/puzolana la utilización de esta técnica es muy útil, porque permite observar la pérdida de masa debida a reacciones de deshidratación. Las reacciones de deshidratación que normalmente se observan son las siguientes:

- $\text{Ca(OH)}_2 \longrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{SCH} \longrightarrow \text{SC} + \text{H}_2\text{O}$ * SCH: silicato cálcico hidratado
- $\text{ACH} \longrightarrow \text{AC} + \text{H}_2\text{O}$ * ACH: aluminato cálcico hidratado
- $\text{SACH} \longrightarrow \text{SAC} + \text{H}_2\text{O}$ * SACH: silicoaluminato cálcico hidratado

La curva TG registra la variación de masa de una muestra en función de la temperatura o el tiempo, de modo que se puede producir una ganancia o pérdida de peso en un cierto intervalo. Dicha curva se conoce también con el nombre de termograma. La medida de los saltos observados en el termograma nos permite determinar la variación en la masa de la muestra. Dichas variaciones de masa son características de las reacciones químicas que se producen en la experiencia.

La curva DTG es la representación gráfica de la derivada de la curva TG, y nos proporciona información sobre la velocidad de pérdida o ganancia de masa con la temperatura o con el tiempo. Esta representación nos permite identificar con mayor facilidad las alteraciones de masa, especialmente cuando las pérdidas son muy pequeñas o bien cuando existen varios procesos con temperaturas de activación muy cercanas. Adicionalmente, la curva DTG nos permite por medio de la integración, evaluar saltos pequeños que resultan complejos de medir sobre la curva TG.

El equipo que se utilizó es un módulo TGA 850 Mettler- Toledo, que permite medir simultáneamente la curva termogravimétrica y la curva de análisis térmico-diferencial (DTA). Se compone de una termobalanza analítica muy sensible de 0.1µg de resolución, un horno, un sistema de purga de gases y un ordenador para el control y visualización de los datos, se puede observar una imagen del equipo en la figura 4-6.

Las muestras fueron ensayadas con una temperatura inicial de 35°C aumentando 10°C por minuto hasta una temperatura máxima de 600°C. Los crisoles empleados fueron de aluminio y se usaron sellados con tapas con micro-agujeros, a fin de crear una atmósfera autogenerada.



Figura 4-6 Equipo de Termogravimetría

El procedimiento para la preparación de las pastas que se estudian por termogravimetría fue el siguiente:

1. Se mezcla perfectamente la cantidad de cemento o de cal con la puzolana en un recipiente cilíndrico de plástico con cierre hermético.
2. Se añade el agua indicada para la experiencia y se mezcla hasta obtener una pasta homogénea.
3. Se cierra el recipiente y se mantiene en la cámara húmeda hasta la edad de curado elegida para el ensayo.
4. A una determinada edad de curado se extrae una muestra y se muele en un mortero de ágata con acetona, para detener el proceso de hidratación.
5. La muestra se filtra y se seca durante una hora en una estufa a 60°C.

La edad de curado en la que se ensayaron las muestras así como las proporciones de agua conglomerante se explican detalladamente en el siguiente capítulo de resultados.

4.2.7 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Para obtener una imagen por microscopía electrónica, la superficie de una muestra sólida es barrida según un modelo raster con un haz de electrones muy fino. Un raster es un modelo de barrido similar al utilizado en un tubo de rayos catódicos, en el que un haz de electrones barre la superficie en línea recta, vuelve a la posición inicial y es desplazado hacia abajo una distancia establecida, este proceso se repite hasta que el área deseada de la superficie ha sido barrida.

Para realizar el ensayo se utilizó un equipo de microscopía con las siguientes características:

- Modelo utilizado: JEOL JSM6300
- Voltaje aplicado para la obtención de imágenes: 20 KV
- Distancia de trabajo: 15 mm

El equipo se puede apreciar en la figura 4-7.

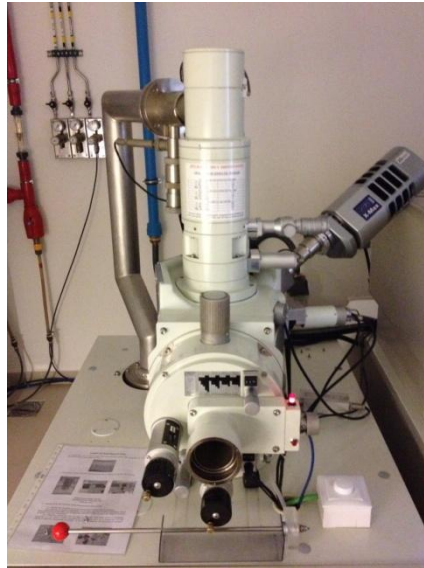


Figura 4-7 Equipo de Microscopía Electrónica

Se analizaron por microscopia las cenizas tanto en su estado original como una vez realizada la molienda. Asimismo se realizaron estudios sobre pastas de cemento y de cal con sustitución de puzolanas para analizar y caracterizar los productos de hidratación.

Las muestras deben ser metalizadas para facilitar la conductividad eléctrica de las mismas. El recubrimiento de dichas muestras se realizó con oro, porque se obtienen imágenes más nítidas que con carbono. El recubrimiento con oro se realizó utilizando el equipo BALTEC SCD 005. El tiempo de exposición de la muestra fue de 90 segundos, a una intensidad de 40 mA y una distancia de trabajo de 5mm. La presión a la que se realizó el proceso de recubrimiento fue de $2.4 \cdot 10^{-2}$ mbar. El microanálisis se realizó con un equipo OXFORD INSTRUMENTS modelo Link-Isis. El programa de adquisición de rayos X fue X-Ray analysis y el programa para cuantificar el SEM Quant que utiliza el método ZAF. Finalmente, la adquisición de imágenes se realizó mediante el programa Autobeam.

4.2.8 Pérdida al Fuego

Para determinar la pérdida al fuego de cada una de las muestras se siguió la norma UNE EN 196-2:2006 ⁽⁴¹⁾, se pesaron en un crisol de porcelana previamente calcinado y tarado (1 ± 0.05) g de ceniza, se colocaron los crisoles en el interior de una mufla automática programable de la marca Carbolite, durante 1 hora a 950°C. Una vez transcurrido este tiempo se deja enfriar la muestra de manera natural hasta llegar a temperatura ambiente en un desecador. Posteriormente se vuelve a pesar la muestra calcinada junto con el crisol correspondiente. Para pesar las muestras y crisoles se usó una balanza electrónica cuya imagen [figura 4-8 (b)] se puede observar junto a la de la mufla [figura 4-8 (a)].

La pérdida por calcinación, L , expresada en porcentaje, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100$$

donde

m_i es la masa de la muestra en gramos;

m_f es la masa de la muestra calcinada, en gramos.



Figura 4-8 Equipo para pérdida al fuego. (a) Mufla, (b) Balanza electrónica

4.2.9 Residuo Insoluble

Se realizó el ensayo de residuo insoluble a las tres distintas muestras de ceniza de SPS, CHOLU y 3V, siguiendo lo establecido en la norma UNE EN 196-2:2006. Éste es un método mediante el cual el residuo insoluble en las cenizas se obtiene inicialmente por ataque con una disolución de ácido clorhídrico; el residuo de este ataque se trata, a continuación con una disolución hirviente de hidróxido de potasio. Después de la calcinación el residuo se determina gravimétricamente.

El procedimiento seguido se describe a continuación:

1. Se pesaron $(1 \pm 0.05 \text{ g})$ de ceniza en un matraz Erlenmeyer de 500 ml, se añadieron 25 ml de agua destilada y se agitaron con un agitador de vidrio.
2. Se añadieron 40 ml de ácido clorhídrico concentrado.
3. Se calentó moderadamente la disolución colocándola en un baño de arena hasta que se evapore todo el líquido; se repitió otras dos veces esta misma operación utilizando 20 ml de ácido clorhídrico concentrado en cada ocasión.

4. Se trató el residuo procedente de la tercera evaporación con 100 ml de ácido clorhídrico 1:3, se volvió a calentar y se filtró a través de papel de filtro medio, se lavó con agua destilada a temperatura próxima a la de ebullición, hasta que el filtrado quedó exento de iones cloruro, lo cual se comprobó ensayando el filtrado con disolución de nitrato de plata.
5. Se transfirió el filtro y su contenido a otro matraz al que se le adapta un refrigerante; se añadieron 100 ml hidróxido de potasio 4 molar y se dejó en reposo a temperatura ambiente durante 16 horas y, a continuación, se hirvió la disolución a reflujo durante 4 horas.
6. Nuevamente se filtró a través de un papel medio, y se lavó con agua destilada caliente hasta que el filtrado quedó exento de cloruros.
7. El filtro junto con su residuo se colocó en un crisol de aluminio, luego se calcinó el papel junto con el residuo a 950°C hasta alcanzar constancia de masa.

El residuo insoluble, expresado en tanto por ciento en masa, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$R. I. = \frac{m_f}{m_i} * 100$$

donde, m_i es la masa de la muestra en gramos y, m_f es la masa del residuo insoluble calcinado, en gramos.

Se debe de mencionar que para cada muestra se realizaron los ensayos por duplicado para confirmar la veracidad de los resultados. En la figuras 4-9 y 4-10 se pueden apreciar imágenes del procedimiento seguido.

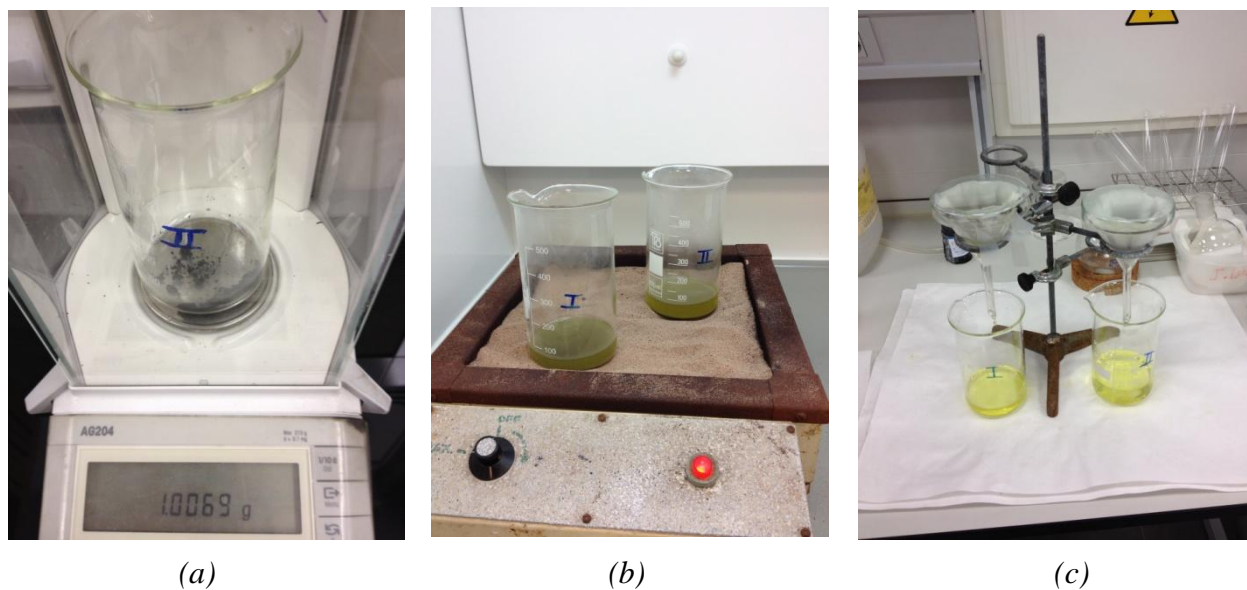


Figura 4-9 Ensayo de Residuo Insoluble.

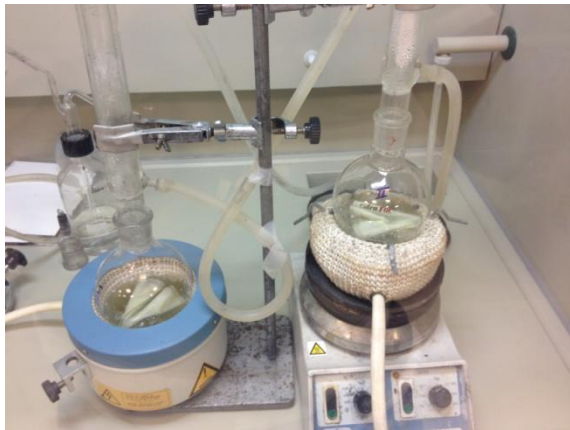
(a) Pesado inicial, (b) disolución de ácido clorhídrico en baño de arena, (c) filtrado



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 4-10 Ensayo de Residuo Insoluble.

(a) colocación de KOH, (b) sistema refrigerante, (c) disolución en reflujo, (d) filtrado, (e) calcinación inicial, (f) calcinación en mufla, (g) pesado final

4.2.10 pH y Conductividad

Se realizó el ensayo de pH - conductividad a las muestras de ceniza de SPS y Choluteca para evaluar su reactividad durante 7 días continuos. Para cada una de las muestras se utilizaron distintas proporciones de cal/ceniza para su estudio, se utilizaron las proporciones 0/10, 1/9, 2/8, 3/7, 4/6 y 5/5. El equipo utilizado se puede ver en la figura 4-11 y fue el siguiente:

- Conductímetro: CRISON micro CM 2201
- pH-metro: CRISON micro pH 2001
- Baño térmico: Julabo SW 22



(a)



(b)

Figura 4-11 Equipo pH - Conductividad. (a) baño térmico, (b) pH-metro y conductímetro

El procedimiento seguido para realizar el ensayo fue el siguiente:

1. Se calibraron los equipos necesarios, el pH-metro, el conductímetro y el baño térmico. El baño térmico se ajustó a una temperatura de 60°C y a 140 revoluciones por minuto.
2. Se pesaron las cantidades de hidróxido cálcico y ceniza necesarias en función a la proporción correspondiente en base a una mezcla total de 1 gramo, utilizando una balanza electrónica de precisión.
3. Se colocaron 50 ml de agua destilada en cada matraz Erlenmeyer. Seguidamente se colocaron dentro del baño térmico hasta que el agua alcanzara la temperatura deseada.
4. Rápidamente se retiraron uno por uno los matraces y se les añadió su correspondiente cantidad de hidróxido cálcico, mientras se agitaba de manera leve pero continua se tomó la lectura inicial de pH y conductividad, seguidamente se les agregó la proporción correspondiente de ceniza a cada matraz y se volvieron a colocar en el baño térmico.
5. Se realizaron lecturas de pH y conductividad a las 4 y 8 horas siguientes después de la lectura inicial, posteriormente se tomaron lecturas cada 24 horas durante 7 días consecutivos.

6. Al séptimo día se retiraron las muestras del baño térmico, se filtraron la parte líquida de la sólida y se guardaron separadamente. A la parte sólida se le agregó acetona para detener cualquier proceso de reacción, se secaron al horno, se pasaron por un tamiz de 125 μm y se almacenaron para realizar posteriormente un ensayo de termogravimetría. A la parte líquida se analizó la cantidad de iones Ca^{+2} según la norma UNE 77-013-89 ⁽⁴²⁾.

En la figura 4-12 se muestran imágenes del proceso seguido en el ensayo.

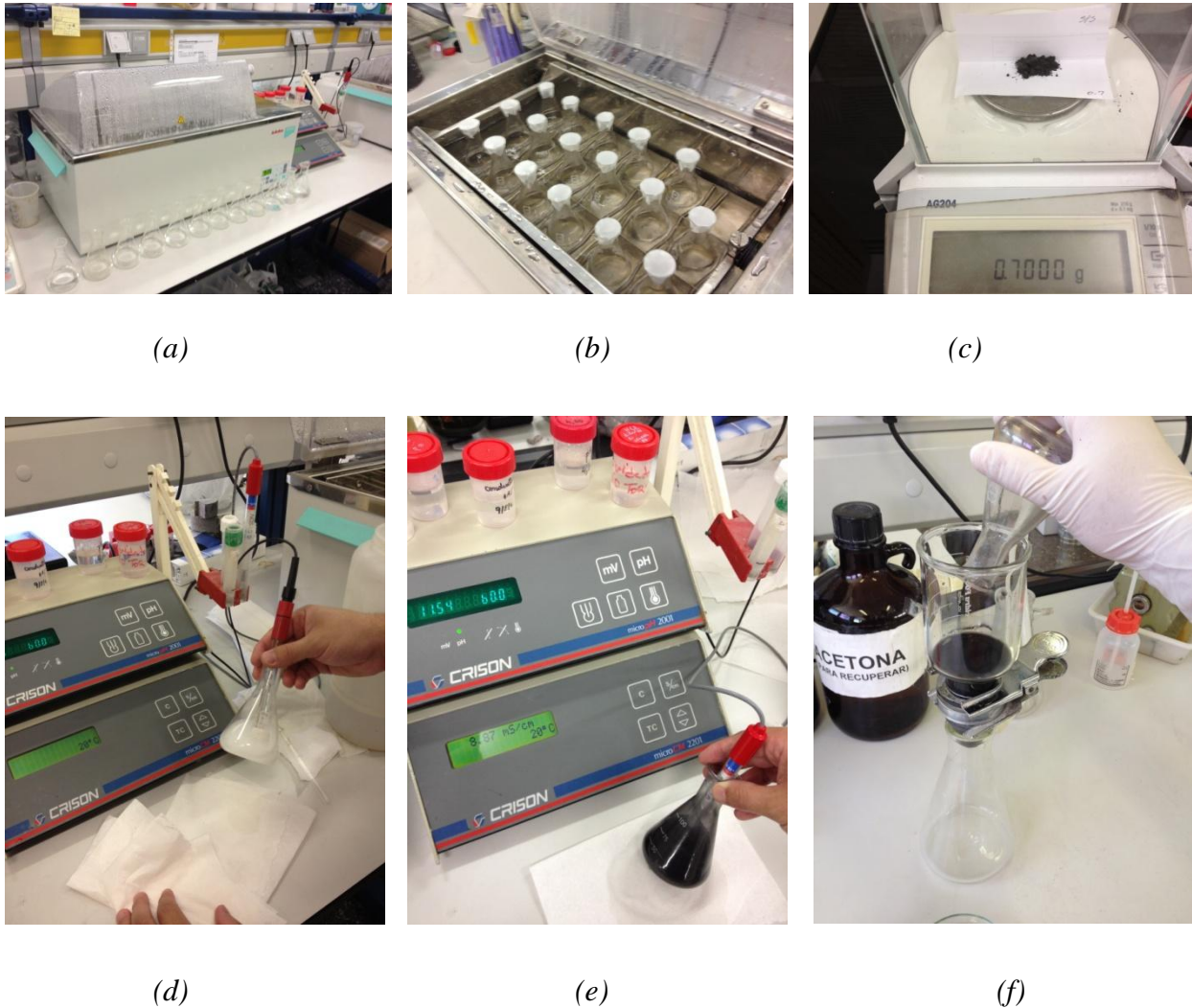


Figura 4-12 Ensayo de pH - Conductividad

- (a) llenado de matraces con agua destilada, (b) baño térmico, (c) pesado de ceniza, (d) lectura inicial, (e) lectura intermedia, (f) filtrado*

4.2.11 Contenido de iones Ca^{+2} en disoluciones acuosas

La técnica de análisis de la dureza total se conoce como complexometría y consiste en la formación de un complejo estable entre el reactivo EDTA (sal sódica del ácido etilendiaminotetracético) y los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} , disueltos en una muestra acuosa.

En el análisis de calcio la muestra es tratada con una cantidad suficiente de NaOH 1M para obtener un pH entre 12 y 13, lo que produce la precipitación del magnesio en forma de $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Agregando calcón como indicador, que forma un complejo de color rosa con el ión calcio, se procede a valorar con disolución de EDTA hasta la aparición de color azul.

Para cada muestra se realizaron dos valoraciones, el procedimiento seguido para realizar el ensayo fue el siguiente:

1. Se traspasaron 10 ml de muestra a un matraz Erlenmeyer.
2. Se añadieron 5 gotas de disolución NaOH 1 molar y se agitó levemente.
3. Seguidamente se espolvorearon una pequeña cantidad de calcón y se agitó levemente tornándose la muestra de color rosa pálido.
4. Agitando continuamente el matraz y con la ayuda de una bureta se adicionó lentamente disolución EDTA al matraz hasta que la muestra cambió de color de rosa a azul pálido.

La concentración de Ca^{2+} expresada en mg/litro se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_{\text{Ca}^{2+}} = \left(\frac{V_{\text{EDTA}} * M_{\text{EDTA}}}{V_{\text{muestra}}} \right) * M_a * 1000$$

donde

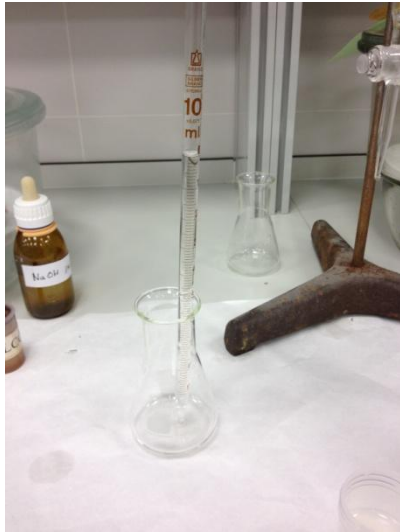
V_{EDTA} : media aritmética del volumen gastado de EDTA en las 2 valoraciones de cada muestra.

M_{EDTA} : 0.0005M

V_{muestra} : 10 ml

M_a : masa atómica del Ca

En la figura 4-13 se pueden apreciar imágenes del ensayo para la determinación de calcio en las muestras del líquido extraído previamente en los ensayos de pH y conductividad.



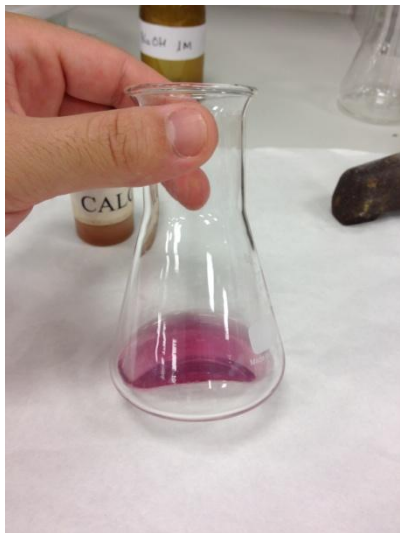
(1)



(2)



(3a)



(3b)



(4a)



(4b)

Figura 4-13 Procedimiento de determinación de calcio en el agua

4.2.12 Procedimiento y equipo para elaboración de probetas de mortero.

Todo el equipo así como el procedimiento utilizado para la elaboración de probetas de mortero cumplen con lo establecido en la norma UNE EN 196-1:2005 ⁽⁴³⁾.

Amasadora

La amasadora utilizada consta esencialmente de:

- Un recipiente de acero inoxidable de una cantidad aproximada de 5 litros, con forma y dimensiones como se muestra en la figura 4-14 (b) y equipado de manera que pueda ser fijado firmemente al bastidor de la amasadora durante el amasado y que la altura del recipiente con relación a la pala y, por consiguiente, la separación entre la pala y recipiente, pueda ser ajustada y mantenida con precisión.

- Una pala de acero inoxidable, de la forma como se muestra en la figura 4-14 (c), accionada por un motor eléctrico de velocidades controladas, con movimientos de rotación sobre su propio eje, y con un movimiento planetario alrededor del eje del recipiente. Los dos sentidos de rotación son opuestos, y la relación entre las dos velocidades no debe ser un número entero.



(a)



(b)



(c)

Figura 4-14 Equipo de Amasado. (a) amasadora, (b) recipiente, (c) pala de amasado

Moldes

Los moldes utilizados que se muestran en la figura 4-15 son de acero y con una dureza que cumple con lo especificado en la norma. Los moldes se utilizaron para generar probetas de mortero de 4*4*4 cm.

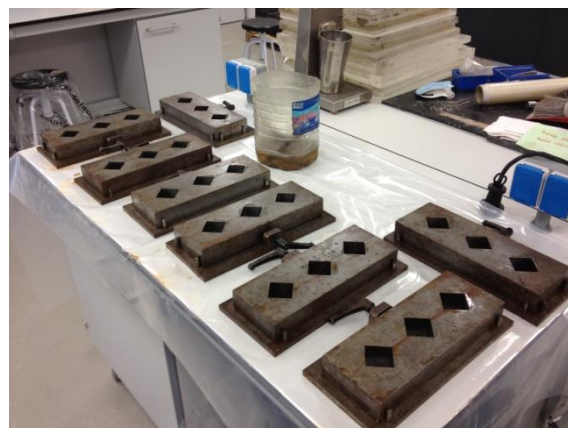


Figura 4-15 Moldes para probetas de mortero

Compactadora

La compactadora, se compone esencialmente de una mesa rectangular unida rígidamente por dos brazos ligeros a un eje de rotación. La mesa está provista en el centro de su cara inferior de un martinete de superficie redondeada, debajo del martinete existe un pequeño yunque, cuya cara superior es plana. La mesa tiene la cara superior mecanizada y las medidas serán iguales o mayores que las de la placa base del molde. El sistema de fijación debe proporcionar al molde una sujeción firme a la mesa. En la figura 4-16 se muestra la compactadora utilizada.



Figura 4-16 Compactadora

Elaboración de probetas

Para la realización de morteros de cemento, el método de amasado es el siguiente:

1. Se añade toda el agua a la amasadora, posteriormente se añade el cemento previamente homogeneizado con la puzolana y se mezcla durante 30 segundos a velocidad lenta.
2. En los 30 segundos siguientes se añade el árido a velocidad lenta.
3. Se continua con 30 segundos a velocidad rápida tras los cuales se deja reposar la mezcla por 90 segundos, durante este tiempo de reposo se rasca de las paredes del recipiente, el mortero adherido, con una espátula de goma.
4. Se finaliza el amasado con 60 segundos a velocidad rápida.

Una vez finalizado el amasado se procede a rellenar el molde y compactar la mezcla. Para ello, se utilizó una compactadora que cumple con las especificaciones anteriormente expuestas. El molde se rellenó en dos fases, en la primera se rellena homogéneamente hasta la mitad del molde y a continuación se compacta la primera capa de mortero con 60 golpes. Se introduce la segunda capa de mortero y se compacta la capa con otros 60 golpes.

Se retira con cuidado el molde de la compactadora y se procede a eliminar el exceso de mortero con una regla plana. Una vez amasado y compactado el mortero, el molde se limpia con un trapo eliminando el mortero que haya quedado como consecuencia del enrasado, se coloca sobre el molde una lámina de vidrio y se introducen en la cámara húmeda.

La cámara húmeda es una habitación que posee unos valores de temperatura y humedad constantes, esta temperatura deberá mantenerse alrededor de los $20 \pm 1^\circ\text{C}$ y una humedad relativa no inferior al 90%.

Las probetas se desmoldaron a las 24 horas después del enmoldado. Las probetas fueron debidamente marcadas y colocadas bajo agua, y se mantuvieron en la cámara húmeda hasta la edad de curado escogida.

En la figura 4-17 se pueden observar imágenes de todo el proceso de elaboración de probetas.

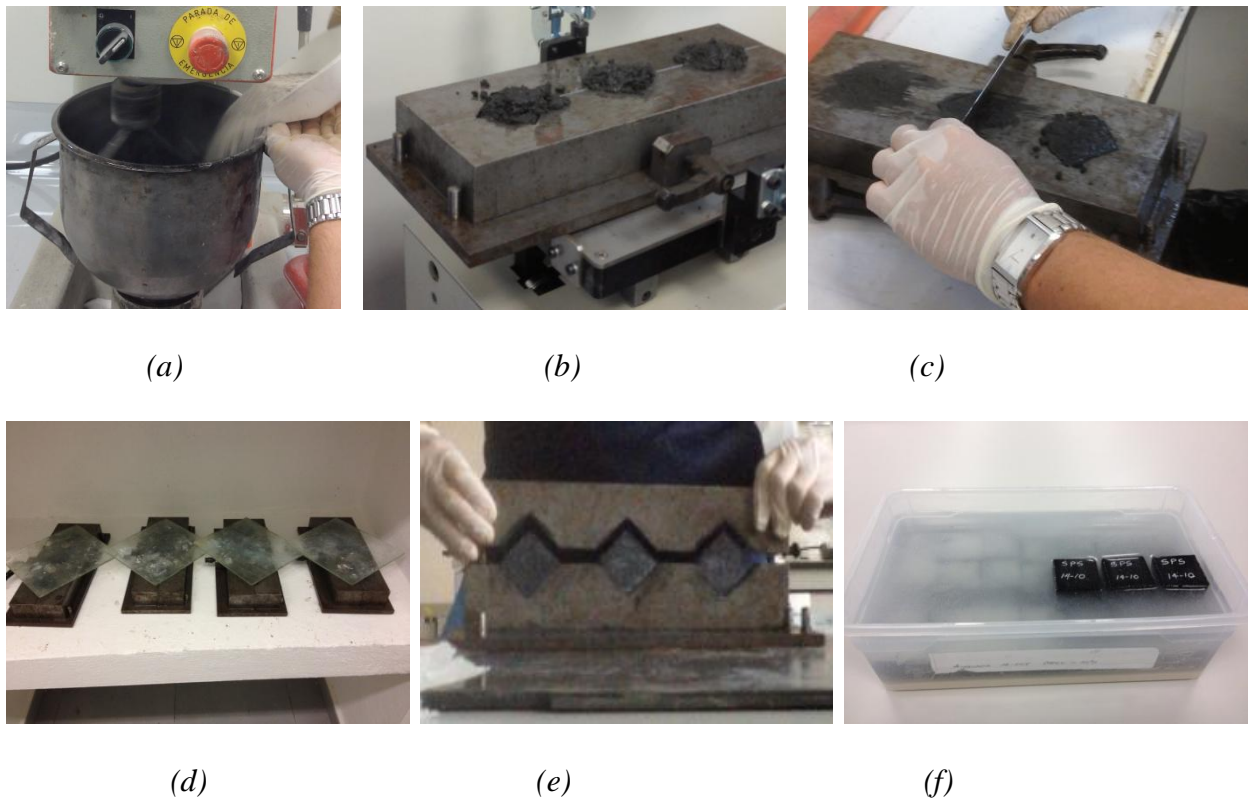


Figura 4-17 Elaboración de Probetas. (a) amasado, (b) compactado, (c) enrasado, (d) curado inicial, (e) desmoldado, (f) curado final

Trabajabilidad

La medida de la trabajabilidad en morteros se realizó utilizando una mesa de sacudidas, siguiendo el procedimiento expuesto en la norma UNE 83-811-92 ⁽⁴⁴⁾.

La mesa de sacudidas consta de (véase figura 4-18):

- Un armazón colocado sobre una base rígida horizontal.
- La propia mesa construida de acero sostenida por dicho armazón.
- Una placa de vidrio de 0.7 cm de espesor y 35 cm de diámetro, sujeta al tablero.
- Una leva para levantar la mesa a la altura indicada por la norma, y dejarla caer por su propio peso.



Figura 4-18 Mesa de Sacudidas

El molde usado es de cobre, de forma de tronco-cónico, de 6 cm de altura, con diámetros interiores de 10 cm en la base y 7 cm en la parte superior.

Cuenta con una tolva para facilitar la alimentación del material, la cual encaja en la parte superior. El pisón es un cilindro de madera de 4 cm de diámetro y 250 g de peso. Su función es la de compactar el mortero una vez introducido en el molde.

El proceso de las medidas de trabajabilidad fue el siguiente (véase figura 4-19):

- Se coloca el molde con su tolva en el centro de la mesa.
- Se rellena el molde en dos fases adicionando en cada una de ellas el mortero necesario para cubrir la mitad del volumen del molde.
- Se apisona manualmente el contenido de cada fase con diez golpes de pisón, con una frecuencia de un golpe cada segundo.
- Se retira la tolva enrasando a la vez la superficie.

- Se retira el molde y se deja caer el tablero de la mesa por su propio peso sobre la leva quince veces, con una frecuencia de una vez cada segundo.
- Se miden dos diámetros perpendiculares de la masa extendida y el valor de la trabajabilidad, expresado en mm, se obtiene como la media de los valores medidos.

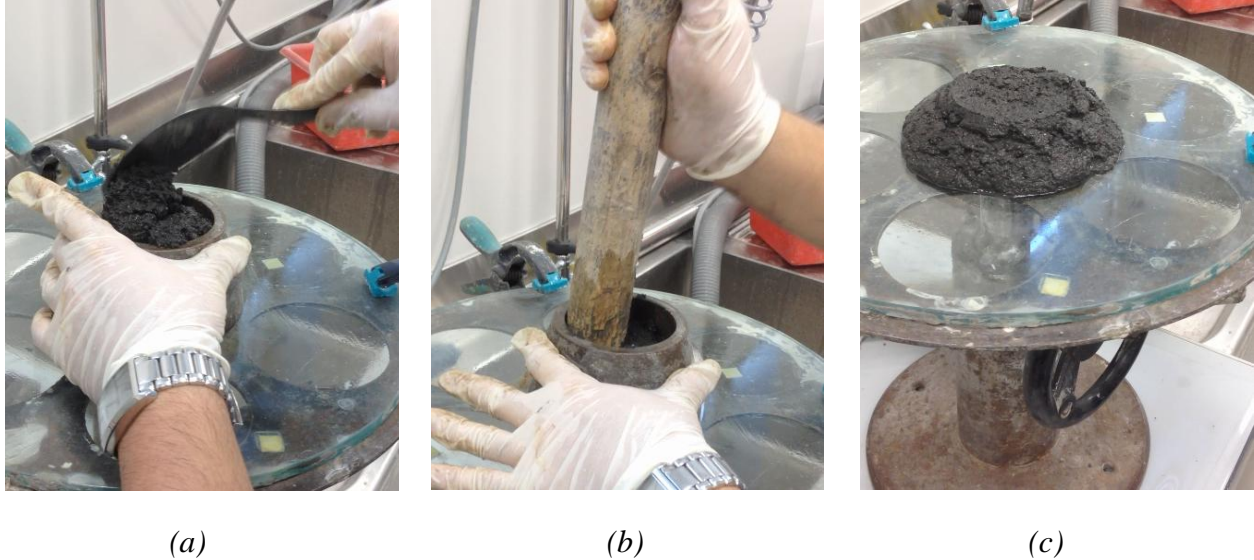


Figura 4-19 Ensayo de Trabajabilidad. (a) llenado, (b) apisonado, (c) sacudida

4.2.12 Resistencia Mecánica

Se realizaron ensayos para determinar la resistencia a compresión axial de las probetas de mortero fabricadas. Para las medidas de la resistencia a compresión se centra cada probeta lateral y longitudinalmente con relación a los platos de la máquina (véase figura 4-20 (b)).

Para cada edad de curado se ensayaron 6 probetas. El valor de la resistencia a compresión es la media de las seis probetas ensayadas. La expresión utilizada para calcular la resistencia es la siguiente:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

donde

R_c : es la resistencia a compresión en (N/mm^2).

F_c : es la carga máxima de rotura en (N).

1600 : 40*40 mm es la superficie de los platos o placas auxiliares.



(a)



(b)

Figura 4-20 Ensayo de compresión axial. (a) prensa hidráulica, (b) centrado de probeta

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA

5.1.1 Molienda y Granulometría

Se realizaron distintos ensayos de granulometría por difracción láser a las muestras originales de ceniza así como a las muestras molidas. Las muestras se molieron hasta que alcanzaran un diámetro medio de partícula de 10 micras, por lo que se realizaban ensayos de granulometría para cada 5 minutos de molienda.

Los resultados de las granulometrías para cada muestra de ceniza se muestran en la tabla 5-1, además entre las figuras 5-1, 5-4 se pueden apreciar la distribución granulométrica de algunas de las medidas realizadas.

<i>Tiempo</i>	<i>Diámetro Medio de Partículas</i>		
	<i>San Pedro Sula</i>	<i>Choluteca</i>	<i>3 Valles</i>
0 min (Original)	62.269	179.500	236.598
5 minutos	18.845	16.313	78.320
10 minutos	12.170	11.646	37.515
15 minutos	10.378	9.932	24.716
20 minutos	8.265	8.839	15.633
25 minutos	8.443	8.483	14.857
30 minutos	6.914	6.901	13.055
35 minutos	-----	-----	11.612
40 minutos	-----	-----	10.728
45 minutos	-----	-----	10.004
50 minutos	-----	-----	9.405
60 minutos	-----	-----	8.502

Tabla 5-1 Resumen Resultados de Granulometría

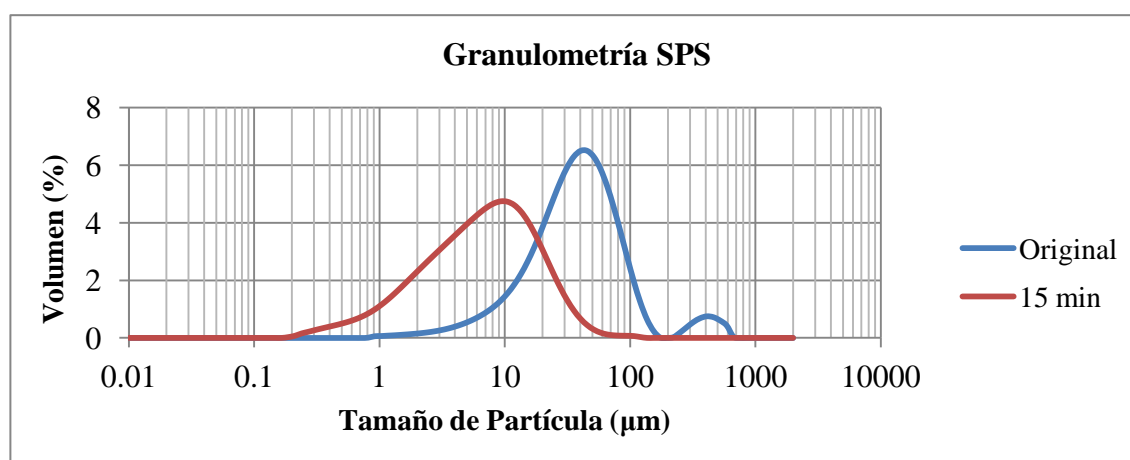


Figura 5-1 Granulometría SPS, Molida 15 min - Original

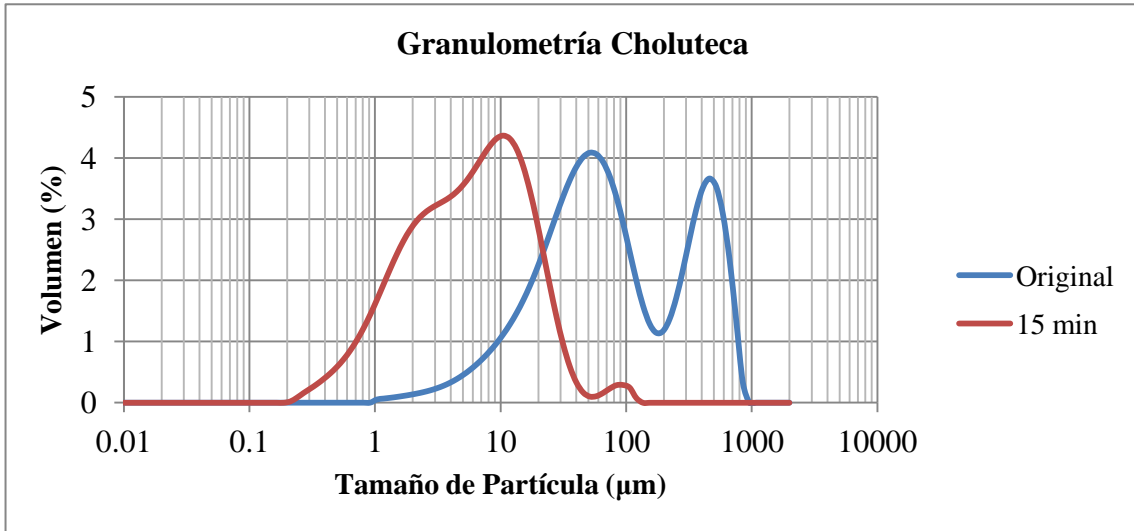


Figura 5-2 Granulometría Choluteca, Molida 15 min - Original

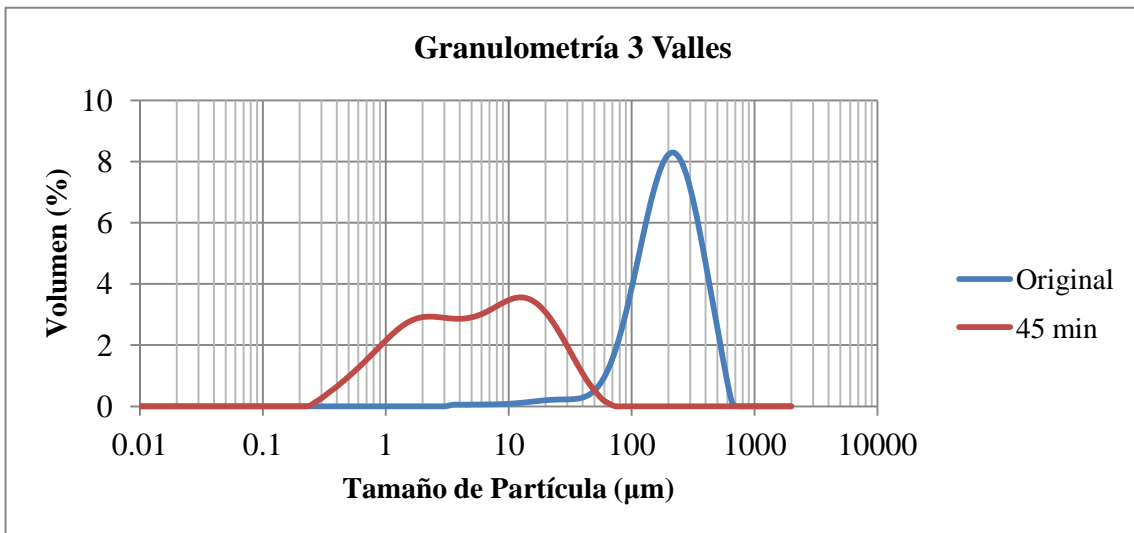


Figura 5-3 Granulometría 3 Valles, Molida 45 min - Original

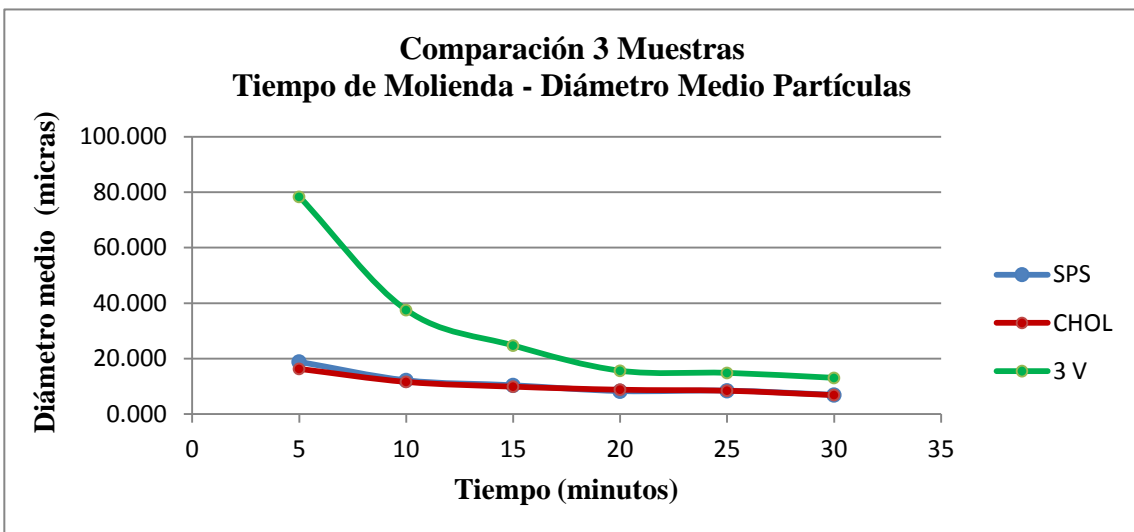


Figura 5-4 Comparación de muestras, diámetro medio de partícula según tiempo de molienda

Se puede apreciar claramente que a pesar que la ceniza de Choluteca tiene un tamaño de partícula original bastante más grande que la de SPS, al realizar la molienda los tamaños de partícula son muy similares para cada intervalo de tiempo, se determinó que el tiempo necesario de molienda para ambas cenizas es de 15 minutos alcanzado el diámetro medio deseado de 10 micras. Para el caso de la ceniza de 3 Valles que tiene el tamaño original más grande de las 3 muestras se necesitan 45 minutos de molienda para llegar a las 10 micras de diámetro medio de partícula. En el anejo 5.1.1 se presentan las gráficas completas de todos los ensayos de granulometría realizados. Sorprende la diferencia tan importante entre la ceniza 3V y las otras dos, que, como se explicará más adelante, este hecho es debido a una contaminación de la muestra.

5.1.2 Pérdida al Fuego

Como se mencionó anteriormente se realizaron ensayos de pérdida por calcinación de las muestras colocándolas en una mufla a 950°C durante 1 hora. Para cada tipo de ceniza se realizó el ensayo por duplicado para confirmar los resultados. Los cálculos intermedios así como los resultados de pérdida total se ven reflejados en la tabla 5-2.

<i>Descripción</i>	<i>Muestras SPS</i>		<i>Muestras Choluteca</i>		<i>Muestras 3 Valles</i>	
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
Crisol (g)	21.5499	20.8300	21.0536	21.5199	21.5202	21.0540
Ceniza (g)	1.0204	1.0213	1.0109	1.0110	1.0021	1.0106
Crisol + Ceniza (g)	22.5703	21.8513	22.0645	22.5309	22.5223	22.0646
Posterior Horno (g)	22.4249	21.7060	21.9337	22.4040	22.5158	22.0577
Pérdida (g)	0.1454	0.1453	0.1308	0.1269	0.0065	0.0069
Pérdida %	14.2493	14.2270	12.9390	12.5519	0.6486	0.6828

Tabla 5-2 Resultados Ensayo de Pérdida al Fuego

En promedio el porcentaje de pérdida de masa para la ceniza de San Pedro Sula fue de 14.24%, para la ceniza de Choluteca fue de 12.75%, mientras que para el caso de la ceniza de 3 Valles solamente fue de un 0.67%, dato anormal para ser ceniza de bagazo de origen agrícola, lo que indica que se debe tratar de un material completamente distinto a los dos anteriores. En la figura 5-5 se pueden observar imágenes de los ensayos realizados a las distintas cenizas.



Figura 5-5 Imágenes "antes - después" de calcinación

5.1.3 Microscopía Electrónica

Se realizó estudio de microscopía electrónica por barrido (SEM) a las muestras de los tres tipos de ceniza. Se tomaron imágenes de la muestra en su estado original así como una vez molido, éstas se muestran entre las figuras 5-6 y 5-9.

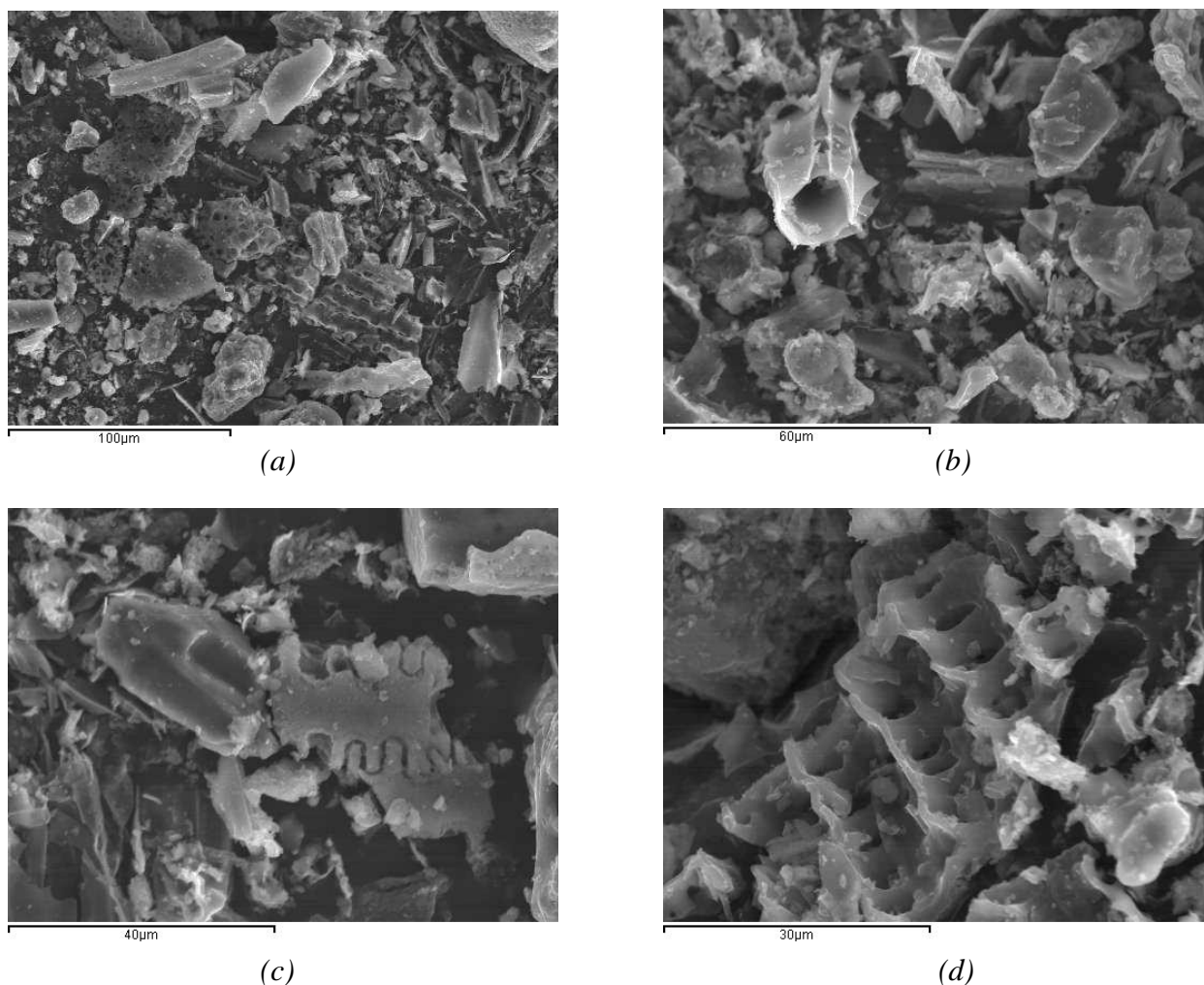


Figura 5-6 SEM Ceniza SPS Original. (a) 500 aumentos (b) 1000 (c) 1500 (d) 2000

Se puede apreciar en la imagen (a) como la muestra tiene partículas de distinto tamaño así como formas muy diversas, en las imágenes (b) y (c) se pueden observar partículas de la caña de azúcar y finalmente en la imagen (d) se puede apreciar que hay partículas que se han fundido debido a las altas temperaturas que alcanza el horno cuando se quema el bagazo.

Para el caso de la ceniza de Choluteca también se pueden observar partículas de muy distinta forma y tamaño como se observa en la imagen 5-7 (a). En las imágenes (b),(c) y (d) se pueden observar partículas de la caña sin quemar, mientras que las imágenes (e) y (f) nos muestran partículas que ponen de manifiesto que han sufrido una fusión parcial.

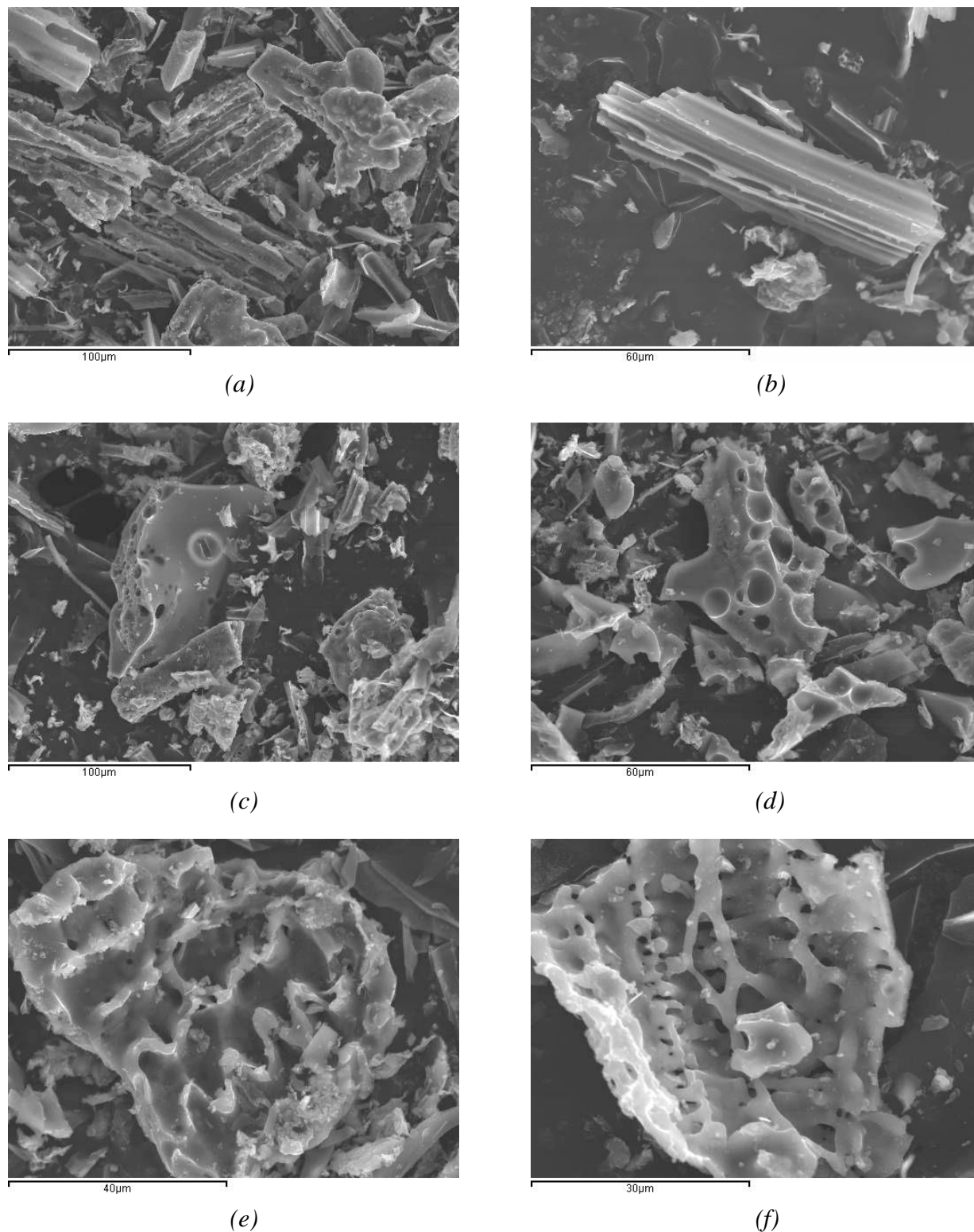


Figura 5-7 SEM Ceniza CHOLU Original. (a) 500 aumentos (b) 1000 (c) 500 (d) 1000 (e) 1500 (f) 2000

La ceniza de 3 Valles presentó resultados muy diferentes a las otras muestras de San Pedro Sula y Cholteca. Las imágenes muestran partículas más semejantes a las de una arena que a las de una ceniza. Con partículas bastante más grandes, algunas de forma redondeada y otras planas y alargadas como se muestran en la figura 5-8. Este hecho avalaría la hipótesis de que la muestra esté contaminada con arena, seguramente en el proceso de arrastre de la ceniza desde el horno en forma de suspensión acuosa. Los datos que se ponen de manifiesto en los estudios de SEM para 3V, concuerdan con los resultados de la pérdida al fuego (0.67%) y tiempo de molienda (45 min para obtener un diámetro medio de 10 μm , mientras que en las otras dos muestras se necesitaron solo 15 min). La muestra de 3V obviamente es mucho más dura, y por tanto, requiere de un mayor tiempo de molienda.

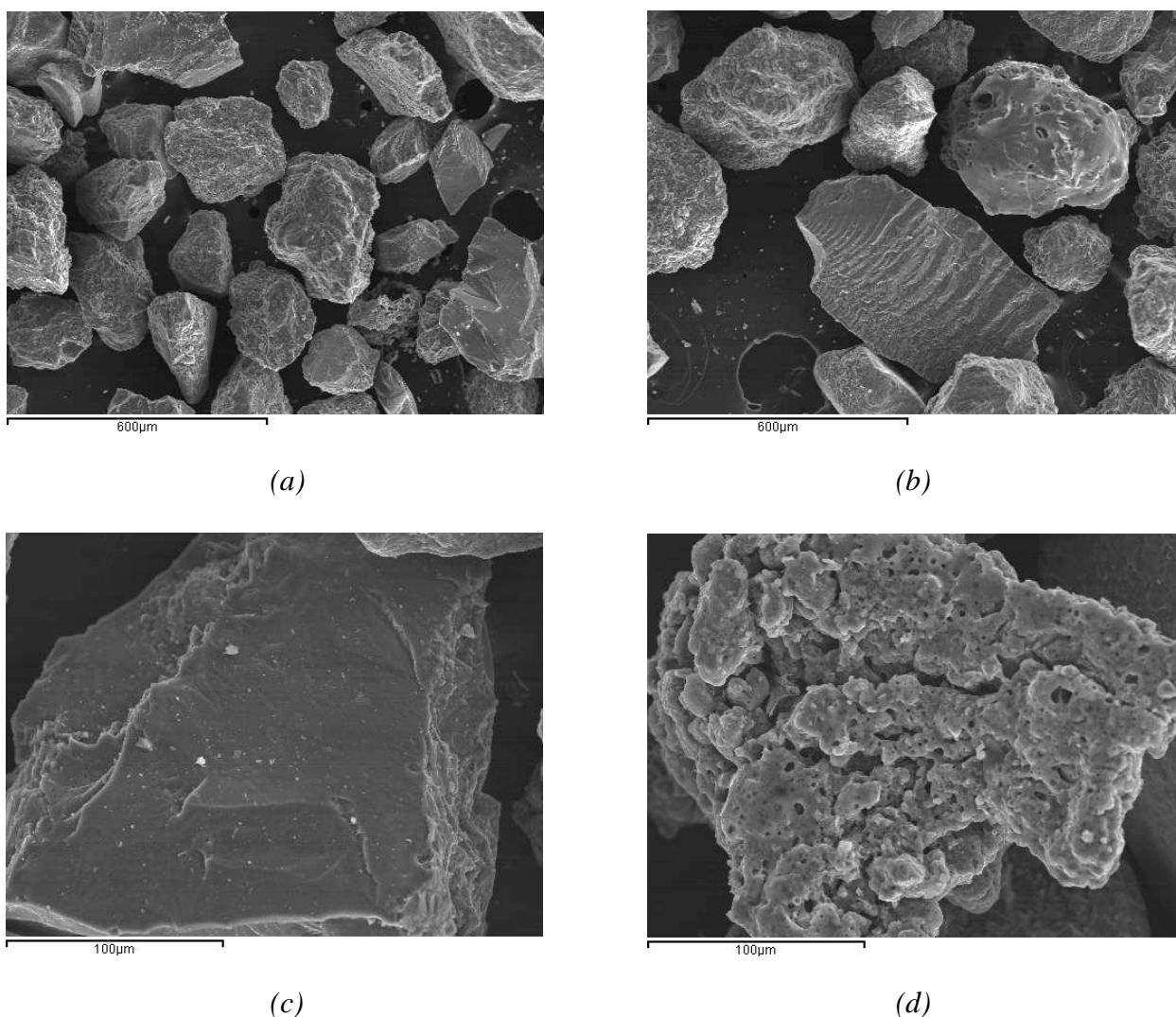


Figura 5-8 SEM Ceniza 3 Valles Original. (a) 100 aumentos (b) 100 (c) 500 (d) 500

En las imágenes (a) y (b) se puede observar como la muestra está formada por una serie de partículas de tamaño considerable, en la figura (c) se puede apreciar que hay partículas planas, achatadas y un poco alargadas, mientras que en la figura (d) se muestra una partícula mas rugosa y de forma más redondeada.

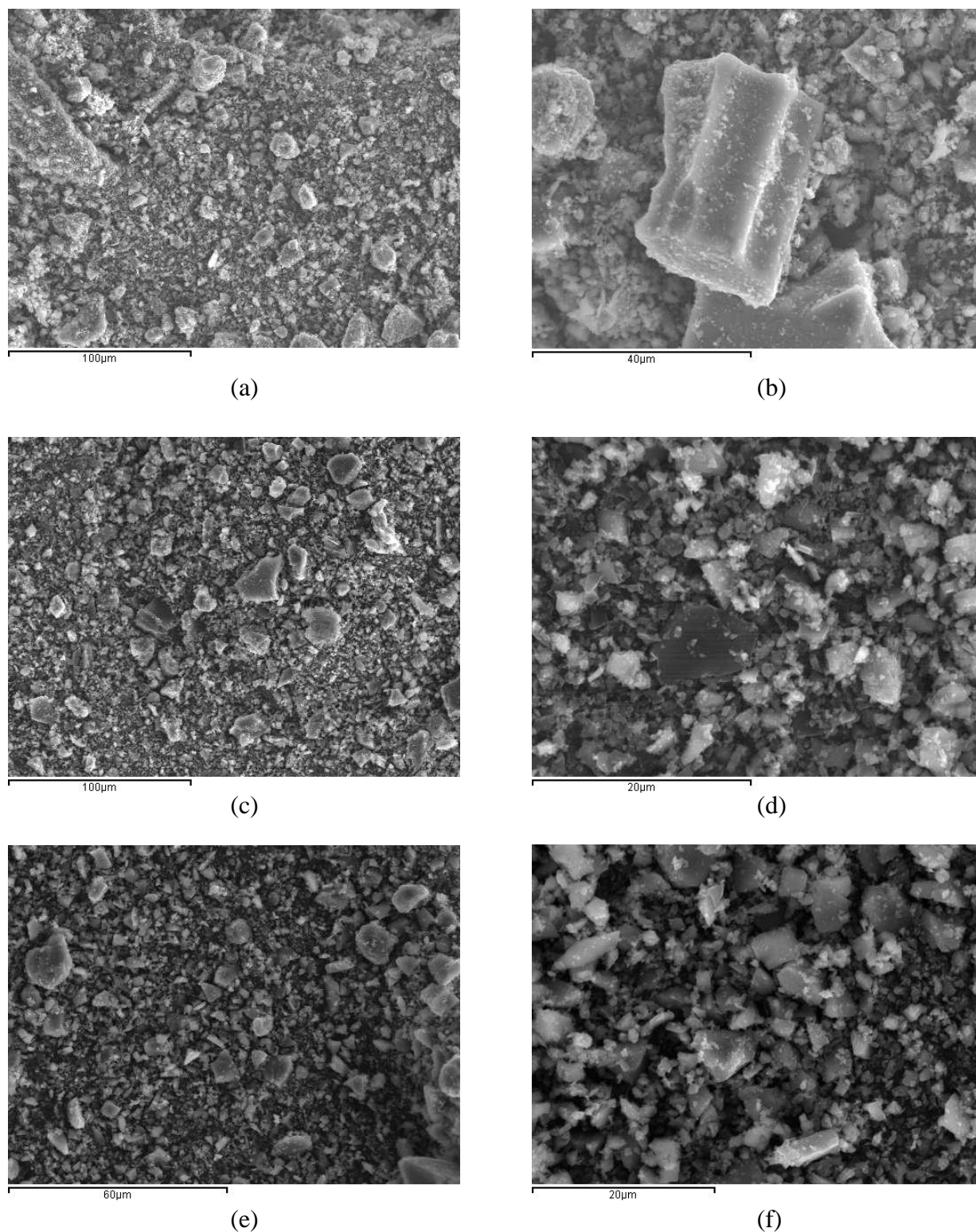


Figura 5-9 SEM Cenizas Molidas (a) SPS 500 aumentos (b) SPS 1500

(c) CHOLU 500 aumentos (d) CHOLU 3000 (e) 3V 1000 aumentos (f) 3V 2500

En la figura 5-9 se recogen las micrografías de las muestras de las cenizas molidas. Para todas las muestras de ceniza, una vez molidas, prácticamente se deshacen la gran mayoría de las partículas y solo quedan pocas partículas con la forma original.

5.1.4 Residuo Insoluble

Se realizaron ensayos de residuo insoluble a las 3 muestras de cenizas, para cada una de ellas se realizaron dos repeticiones para una mayor precisión en el análisis. Los resultados de dichos ensayos se muestran en la tabla 5-3.

<i>Descripción</i>	<i>Muestras SPS</i>		<i>Muestras Cholteca</i>		<i>Muestras 3 Valles</i>	
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
Peso Inicial (g)	1.0092	1.0073	1.0069	1.0043	1.0088	1.0065
Peso Final (g)	16.4569	18.1778	18.3138	16.5872	16.9613	18.7110
Peso Crisol (g)	16.2679	18.0025	18.0034	16.2679	16.2679	17.9982
Peso Neto Final (g)	0.1890	0.1753	0.3104	0.3193	0.6934	0.7128
Residuo Insoluble %	18.7277	17.4030	30.8273	31.7933	68.7351	70.8197
Promedio Residuo Insoluble %	18.0653		31.3103		69.7774	

Tabla 5-3 Resultados de Residuo Insoluble

Los resultados indican que las muestras de ceniza de San Pedro Sula son las más solubles al ser atacadas con ácido clorhídrico y con hidróxido de potasio, las muestras de Cholteca presentaron un valor de residuo insoluble de 31.31%, este resultado es mayor que el de las muestras de SPS con un valor promedio de 18.06%, mientras que las muestras de ceniza de 3 Valles son las menos solubles, presentando un resultado de residuo insoluble prácticamente del 70%, este resultado confirma la contaminación de la muestra con arena, como se indicó anteriormente.

A la vista de los resultados anteriores, se decidió descartar la ceniza de 3 Valles para los siguientes ensayos de caracterización, así como para los ensayos de reactividad puzolánica. Todos los resultados realizados a esta ceniza indican que la muestra procedente de 3 Valles tendrá una baja reactividad, por estar contaminada con arena y que no se debe de utilizar de esta manera, como una adición puzolánica en la elaboración de morteros y hormigones.

5.1.5 Fluorescencia de Rayos X

Se realizaron ensayos de fluorescencia a las muestras de ceniza de San Pedro Sula y de Choluteca para determinar su composición química, los resultados se ven reflejados en la tabla 5-4 que se presenta a continuación.

Óxido	SPS (%)	CHOLU (%)
Na ₂ O	0.80	1.22
MgO	0.91	1.21
Al ₂ O ₃	6.26	8.92
SiO ₂	50.62	64.18
P ₂ O ₅	0.72	1.19
SO ₃	0.22	0.08
K ₂ O	2.23	5.06
CaO	1.94	3.00
TiO ₂	0.38	0.34
MnO	0.18	0.12
Fe ₂ O ₃	23.26	3.35
P.F.	12.48	11.33

Tabla 5-4 Resultados Composición Química de Cenizas

Se puede observar que para ambas muestras la suma de los óxidos de aluminio, silicio y hierro son superiores a 75%, para el caso de la ceniza de San Pedro Sula la suma es de un 80.14%, mientras que para la ceniza de Choluteca la suma es de 76.45% siendo esto un indicativo que ambas muestras podrían tener propiedades puzolánicas.

La muestra de San Pedro Sula muestra de manera muy peculiar un alto contenido óxido de hierro 23.26% y esto se ve reflejado en la fuerte coloración naranja que tiene la muestra una vez que ha sido calcinada como se muestra en la figura 5-10.

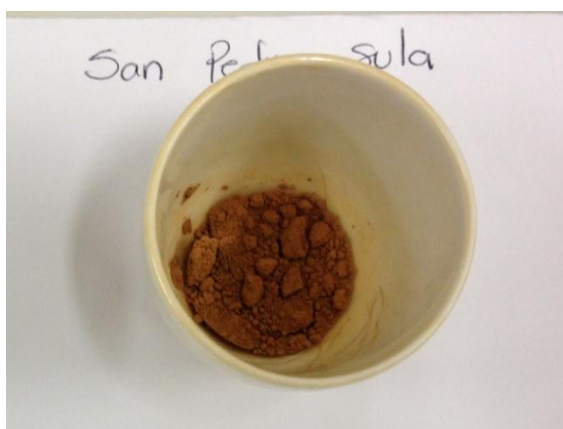


Figura 5-10 Muestra Calcinada de Ceniza de SPS

5.1.6 Difracción de Rayos X

A fin de determinar la composición mineralógica de las muestras de ceniza de bagazo utilizadas, se han analizado dichas muestras mediante la técnica de Difracción de Rayos X, según las condiciones que se especifican en el apartado experimental.

En la figura 5-11 se recogen los difractogramas de ambas muestras SPS y CHOLU. En primer lugar se puede observar que las dos muestras presentan una desviación de la línea base entre 15-30° de 2θ, lo que indica la presencia de material amorfo en ambas cenizas. El compuesto mayoritario en ambas muestras es cuarzo (SiO₂) (PDFcard 331161). En la ceniza de bagazo de caña SPS se determina como compuestos secundarios feldespatos como la albita (NaAl₃SiO₈) (PDFcard 090466), y también óxidos de hierro como magnetita (Fe₃O₄) (PDFcard 190629), lo que corrobora los datos obtenidos por fluorescencia de rayos X. Por último, en la muestra SPS se detectan trazas de calcita (CaCO₃) (PDFcard 050586), posiblemente por impurezas de suelo en la planta original.

En el caso de la muestra de ceniza de bagazo CHOLU, también se presenta como compuesto mayoritario el cuarzo, pero en este caso, los compuestos secundarios que se detectan son feldespatos, como la albita (NaAl₃SiO₈) (PDFcard 090466), y microclina (KAl₃SiO₈) (PDFcard 190926). Por otra parte, existe también como compuesto minoritario sílice en forma de cristobalita (SiO₂) (PDFcard 391425). Por último se identifican trazas de un aluminosilicato en forma de mullita (Al₆Si₂O₁₃) (PDFcard 150776). En la tabla 5-5 se resume los datos obtenidos.

MUESTRA	MINERAL	PDF CARD	ABUNDANCIA
Choluteca (CHOLU)	Cuarzo (SiO ₂)	331161	xxx
	Cristobalita (SiO ₂)	391425	xx
	Microclina (KAl ₃ SiO ₈)	190926	xx
	Albita (NaAl ₃ SiO ₈)	090466	xx
	Mullita (Al ₆ Si ₂ O ₁₃)	150776	x
San Pedro Sula (SPS)	Cuarzo (SiO ₂)	331161	xxx
	Albita (NaAl ₃ SiO ₈)	090466	xx
	Magnetita (Fe ₃ O ₄)	190629	xx
	Calcita (CaCO ₃)	050586	x

xxx Comp. Mayoritarios xx Comp. Secundarios x Comp. trazas

Tabla 5-5 Composición mineralógica de las muestras de CBCA por difracción de rayos X

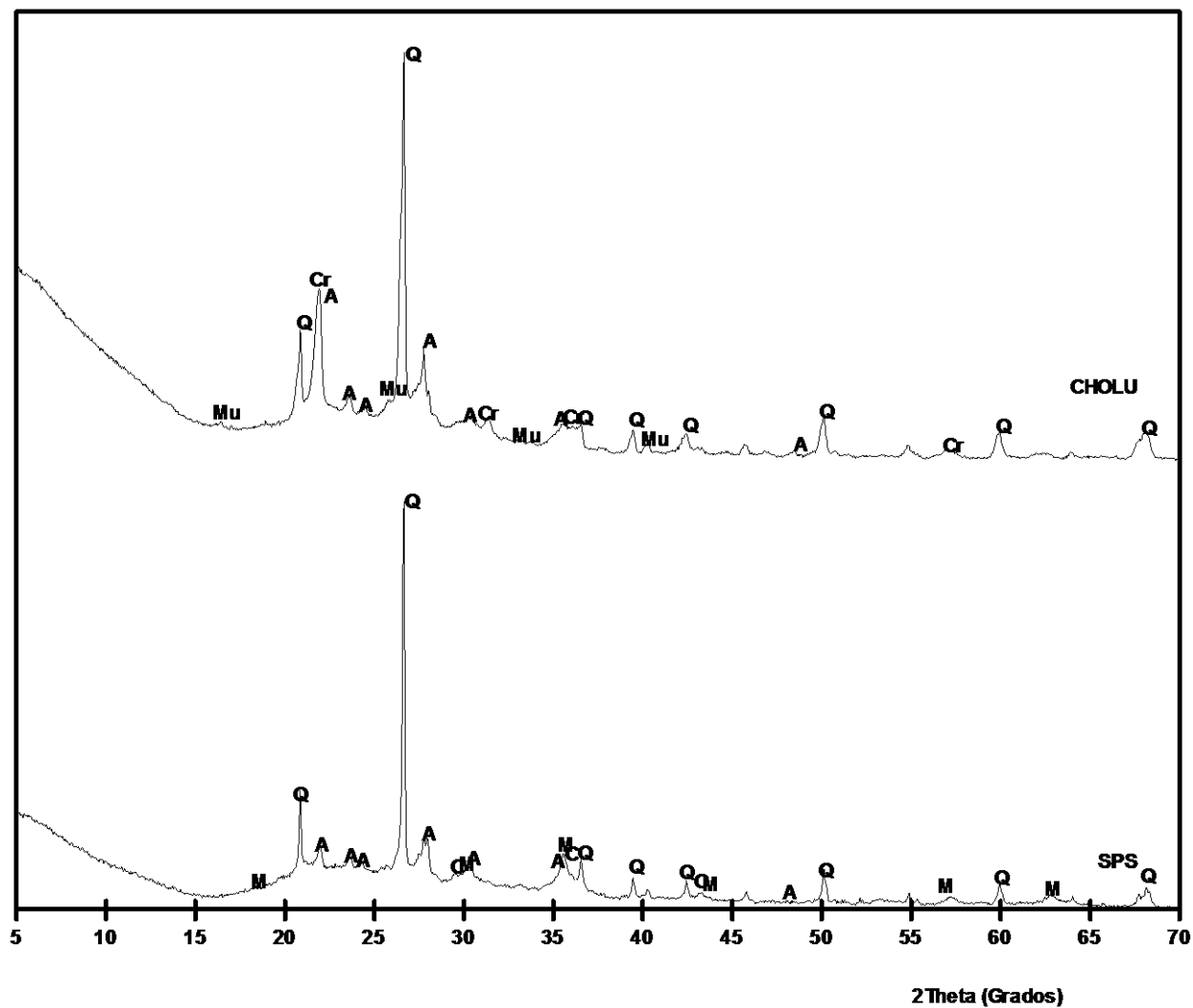


Figura 5-11 Difractogramas de las muestras de ceniza de bagazo

5.2 REACTIVIDAD PUZOLÁNICA

5.2.1 pH y Conductividad

Como se mencionó en el capítulo anterior se realizaron pruebas de pH y conductividad en suspensión acuosa cal/puzolana, usando las muestras de ceniza de San Pedro Sula y de Choluteca durante 7 días. A continuación se muestran los resultados obtenidos para ambas cenizas.

Resultados de pH

Los resultados de las lecturas de pH para las muestras de SPS y CHOLU se presentan en el anejo 5.2.1. Los resultados del ensayo se expresan mediante el contenido de iones $[OH^-]$ en las distintas disoluciones acuosas, la figura 5-12 muestra los resultados para la ceniza de SPS, mientras que la figura 5-13 muestra los resultados de la ceniza de Choluteca.

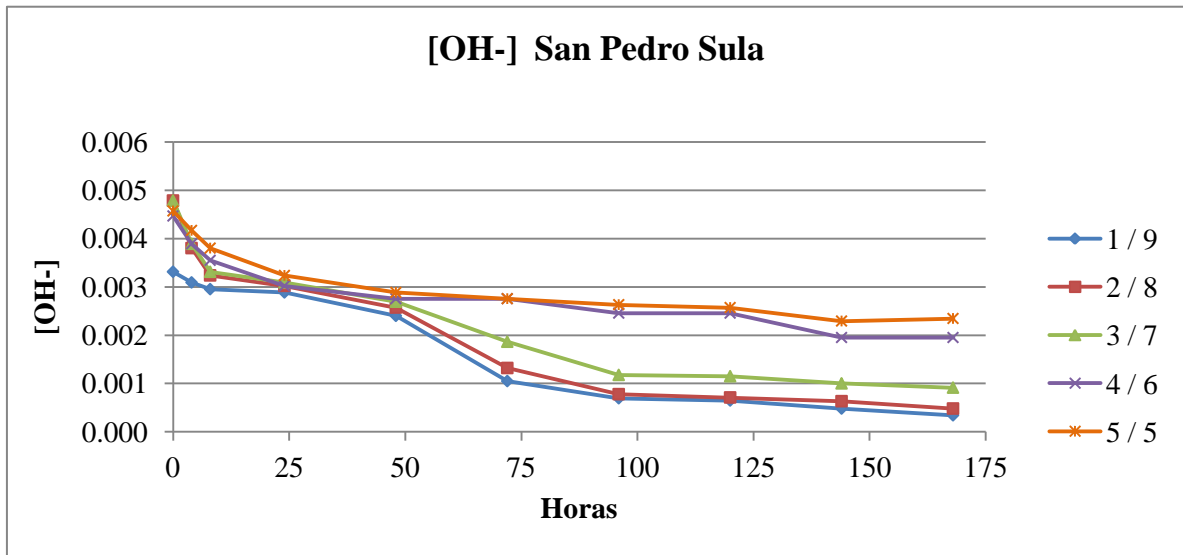


Figura 5-12 Resultados de pH SPS

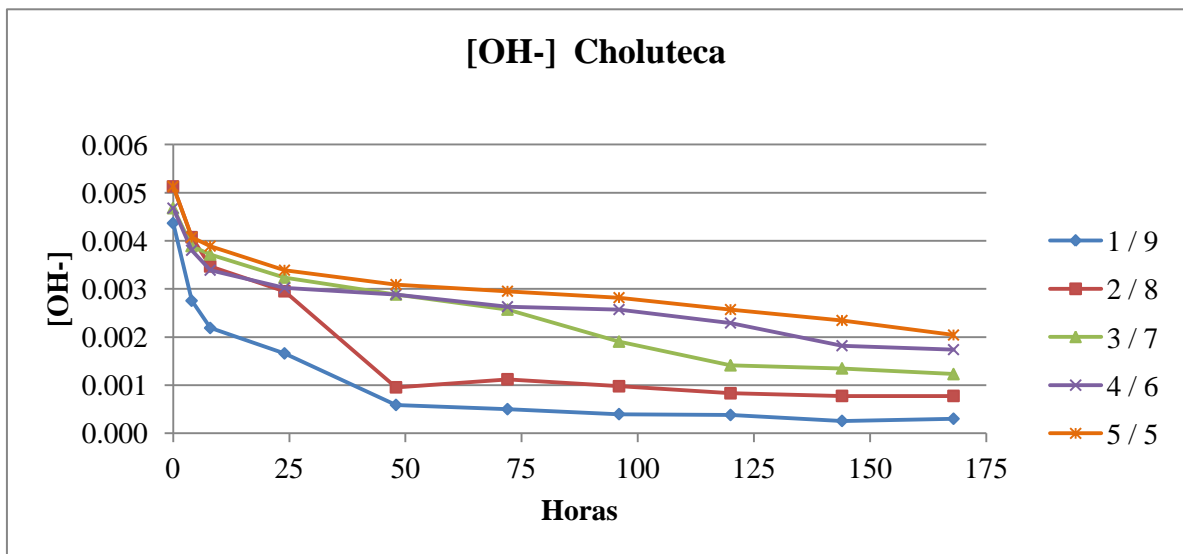


Figura 5-13 Resultados de pH Choluteca

En general podemos observar que tanto para la mezcla con la ceniza SPS, como la muestra CHOLU, se produce una bajada de concentración de iones hidróxido, de manera más o menos continua para las relaciones 1/9, 2/8 y 3/7, durante los primeros 3 días, debido a que la sílice y alúmina amorfa presente en la ceniza, reacciona con la cal, produciendo productos cementantes y por tanto una disminución de iones hidróxido en el medio. Esta disminución no se observa para las relaciones con mayor cantidad de hidróxido cálcico (4/6 y 5/5), debido a que la reactividad de la ceniza no es suficiente para insaturar las disoluciones en hidróxido cálcico

Resultados de Conductividad

Los resultados de las lecturas de conductividad para las muestras de SPS se presentan en la figura 5-14, mientras que los resultados de la ceniza de Cholteca se presentan en la figura 5-15. Los datos de los ensayos se presentan en el anejo 5.2.1.

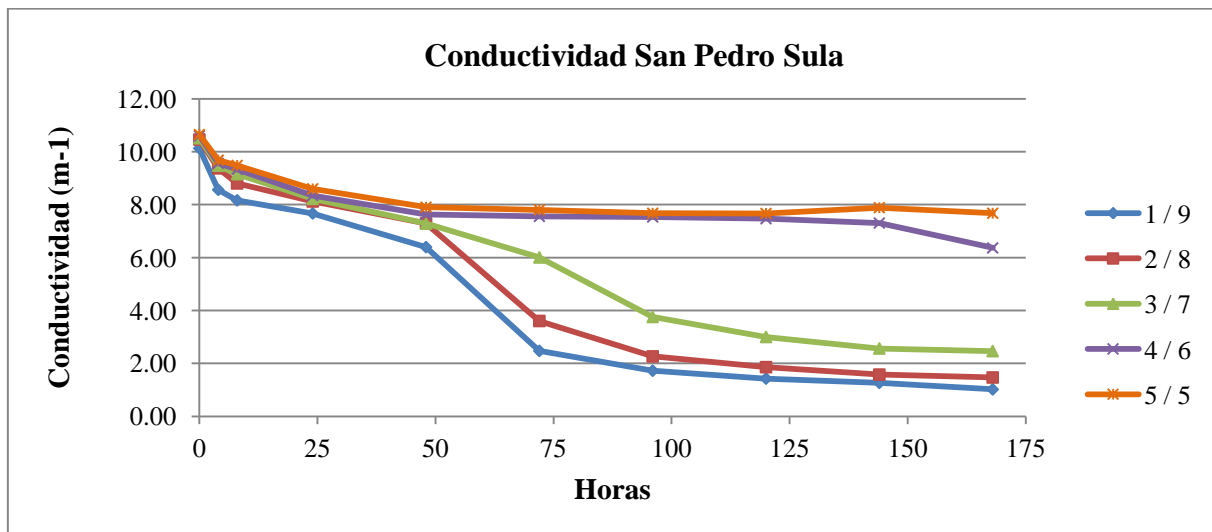


Figura 5-14 Resultados de Conductividad SPS (m^{-1})

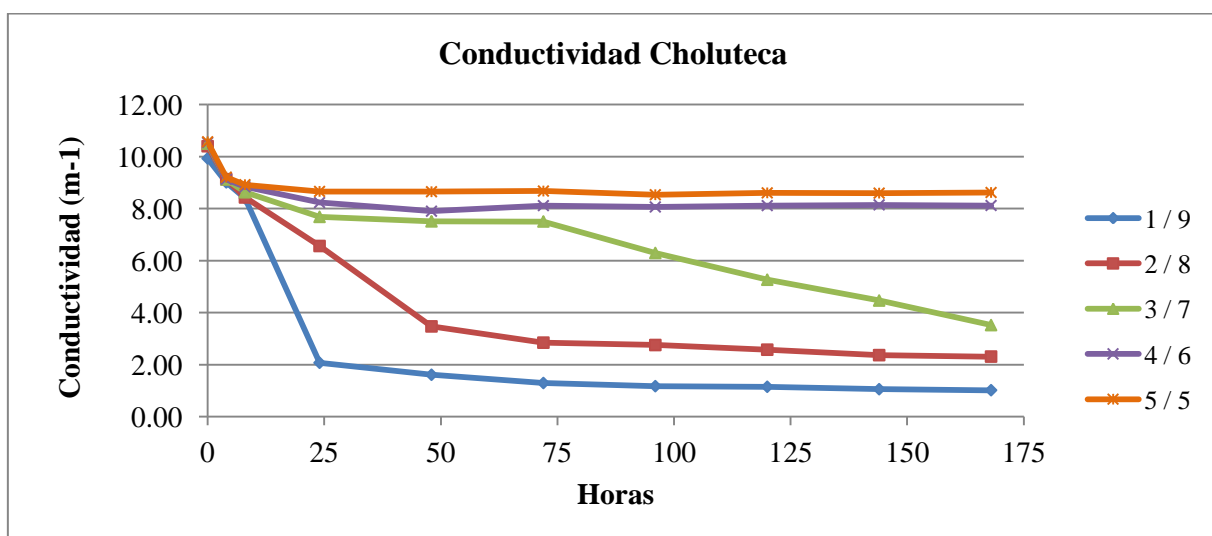


Figura 5-15 Resultados de Conductividad Cholteca (m^{-1})

Para el caso de la ceniza de SPS se puede apreciar que la conductividad disminuye considerablemente para las proporciones 1/9, 2/8 y 3/7, además que para dichas proporciones la disminución se produce mayoritariamente entre el segundo y tercer día. Las proporciones 4/6 y 5/5 sufren una variación muy leve.

La muestra de ceniza de Choluteca presenta un comportamiento similar, las proporciones que reaccionan y disminuyen la conductividad son las 1/9, 2/8 y 3/7, sin embargo para las primeras dos proporciones el cambio drástico se producen en los primeros dos días, mientras que para la tercera la disminución se presenta de manera uniforme a lo largo del tiempo. Las proporciones 4/6 y 5/5 presentan una variación muy leve. La razón del comportamiento de estas cenizas es la explicada anteriormente en la variación de pH.

Una manera de poder visualizar de mejor manera la disminución de conductividad es mediante el porcentaje de pérdida de cada muestra. Para poder calcular el porcentaje de pérdida se utiliza la siguiente expresión:

$$\% \text{ pérdida} = \frac{\Delta_{cal} - \Delta_{real}}{\Delta_{cal}} * 100$$

donde

- Δ_{cal} : es la lectura inicial en tiempo 0, cuando solo está presente la cal en la muestra.
- Δ_{real} : es el valor de cada proporción corregido por el valor de la muestra de solo ceniza.

Los resultados de los porcentajes de pérdida conductividad en función del tiempo para las muestras de SPS se presentan en la figura 5-16, mientras que los resultados de la ceniza de Choluteca se presentan en la figura 5-17. En el anejo 5.2.1 se muestran las tablas con los datos utilizados para representar la pérdida de conductividad.

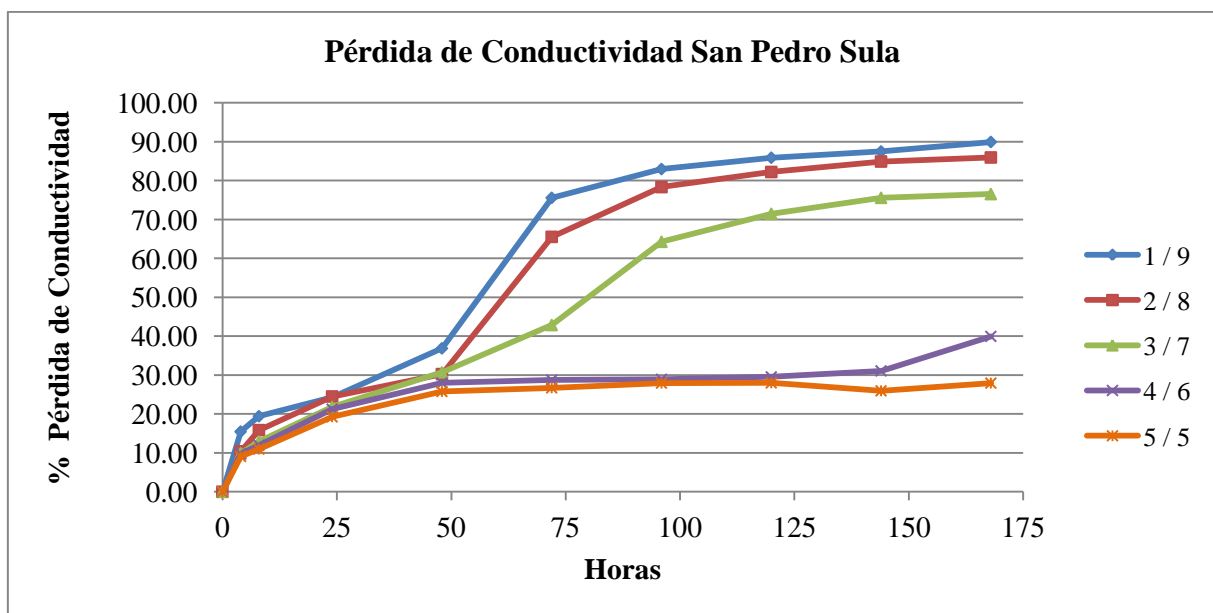


Figura 5-16 Pérdida de Conductividad SPS (%)

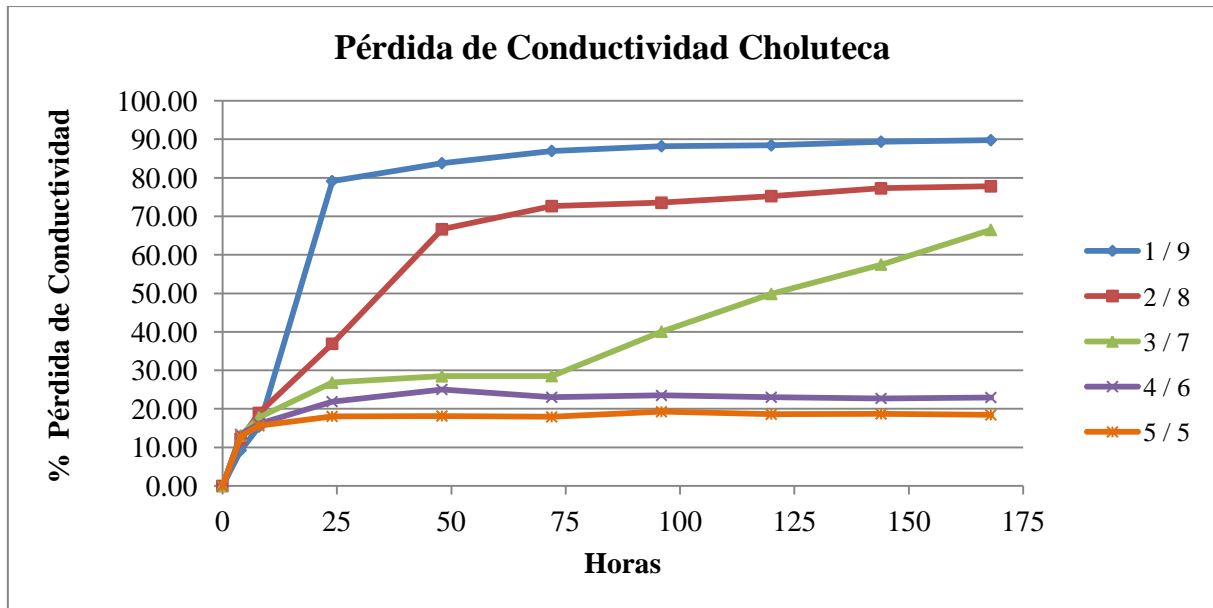


Figura 5-17 Pérdida de Conductividad Choluteca (%)

La pérdida de conductividad se presenta claramente para las primeras tres proporciones en el ensayo realizado a la muestra de SPS. La proporción 1/9 que acaba teniendo un porcentaje de pérdida del 89.94% a los 7 días.

La muestra de Choluteca presenta un comportamiento más acorde a lo que teóricamente se espera, la proporción 1/9 fue la que mayor pérdida presentó en todo momento del ensayo teniendo una pérdida total de 89.76%. A medida que se aumenta la cal y se disminuye la ceniza en las proporciones siguientes, el porcentaje de pérdida disminuye. Las proporciones 2/8 y 3/7 presentaron de igual forma una pérdida considerable al final del ensayo con 77.79% y un 66.48% respectivamente.

5.2.2 Contenido de iones Ca^{+2} en disoluciones acuosas

Como se mencionó en el capítulo anterior, una vez concluido el ensayo de pH - conductividad, las muestras fueron filtradas separando la parte sólida de la líquida. A la parte líquida de la muestra se le realizaron ensayos de contenido de iones calcio, como se explicó de manera detallada en el apartado anterior. Los resultados de dichos ensayos se muestran en las tablas 5-6 y 5-7.

<i>Muestra</i>	<i>Consumo EDTA (ml)</i>				<i>Concentración [Ca²⁺] (moles/litro) (mg / l)</i>	
	<i>Lectura Inicial</i>	<i>Lectura Final</i>	<i>Consumo</i>	<i>Promedio</i>		
<i>5 / 5</i>	0.0	27.0	27.0	27.2	0.01360	544
	0.1	27.5	27.4			
<i>4 / 6</i>	0.3	14.2	13.9	14.0	0.00700	280
	5.0	19.1	14.1			
<i>3 / 7</i>	19.1	21.2	2.1	2.1	0.00105	42
	21.2	23.3	2.1			
<i>2 / 8</i>	0.1	1.4	1.3	1.4	0.00068	27
	1.4	2.8	1.4			
<i>1 / 9</i>	2.8	4.0	1.2	1.3	0.00065	26
	4.0	5.4	1.4			

Tabla 5-6 Contenido de Calcio San Pedro Sula

<i>Muestra</i>	<i>Consumo EDTA (ml)</i>				<i>Concentración [Ca²⁺] (moles/litro) (mg / l)</i>	
	<i>Lectura Inicial</i>	<i>Lectura Final</i>	<i>Consumo</i>	<i>Promedio</i>		
<i>5 / 5</i>	0.0	26.3	26.3	26.4	0.01320	528
	0.0	26.5	26.5			
<i>4 / 6</i>	0.0	23.1	23.1	23.1	0.01155	462
	0.0	23.1	23.1			
<i>3 / 7</i>	0.0	2.8	2.8	2.8	0.00138	55
	2.8	5.5	2.7			
<i>2 / 8</i>	5.5	6.3	0.8	0.8	0.00040	16
	6.3	7.1	0.8			
<i>1 / 9</i>	7.1	7.9	0.8	0.8	0.00038	15
	7.9	8.6	0.7			

Tabla 5-7 Contenido de Calcio Choluteca

Tanto la muestra de San Pedro Sula como la de Choluteca presentan valores muy parecidos, los resultados de este ensayo confirman que para las proporciones 1/9, 2/8 y 3/7 la ceniza reacciona con el hidróxido cálcico quedando muy poca presencia de calcio en el residuo líquido del ensayo de pH- conductividad. Las proporciones 4/6 y 5/5 presentan un elevado contenido en iones calcio, lo que indica que la disolución se encuentra saturada y claramente que la cantidad de ceniza es insuficiente para reaccionar y consumir la mayoría del hidróxido cálcico.

5.2.4 Pastas Cal/Ceniza y Cemento/Ceniza

Para evaluar la reactividad puzolánica se realizaron pastas de cal y ceniza así como pastas de cemento y ceniza utilizando las muestras de ceniza de San Pedro Sula y Choluteca. Para las pastas se utilizó cemento tipo CEM I 52.5 R, además de hidróxido cálcico con un 95% de pureza. Las proporciones de las pastas así como la cantidad de agua utilizada en la mezcla se muestran en la tabla 5-8.

<i>Descripción</i>	<i>Cemento (g)</i>	<i>Cal (g)</i>	<i>Ceniza (g)</i>	<i>Agua (g)</i>	<i>Relación Agua/Conglomerante</i>
Control	10	0	0	5	0.5
Cal / Ceniza	0	3	7	8	0.8
Cem / Ceniza	7.5	0	2.5	5	0.5

Tabla 5-8 Dosificación de Pastas Cal/Ceniza y Cem/Ceniza

Una vez elaboradas las pastas, se colocaron en una cámara húmeda a 20°C para su curado. Se tomaron muestras de las pastas a los 3, 7, 28 y 45 días de curado para realizar análisis termogravimétricos sobre las mismas. De igual manera a los 28 y 45 días se analizaron las muestras mediante microscopía electrónica.

5.2.4.1 Pastas de Cal / Ceniza

Análisis Termogravimétrico

El objetivo de utilizar esta técnica de ensayo es poder determinar la reactividad de la ceniza mediante la cantidad de cal que es fijada, es decir la cantidad de cal que es consumida por la reacción puzolánica.

Al mezclar cal con una puzolana en presencia de agua se pueden dar las siguientes reacciones:

- $S + CH + H \rightarrow SCH$
- $A + CH + H \rightarrow ACH$
- $S + A + CH + H \rightarrow SACH$

donde S, CH, A, , H representan sílice, cal, alúmina, y agua respectivamente, y SCH, ACH y SACH representan silicato cálcico hidratado, aluminato cálcico hidratado y silicoaluminato cálcico hidratado, respectivamente.

Las pastas fueron analizadas mediante termogravimetría en un intervalo de calentamiento de 35-600°C. Se eligió dicho intervalo de temperaturas, debido a que los procesos de deshidratación de los hidratos formados, así como de deshidroxilación de la cal que queda disponible se encuentran en este intervalo.

Los termogramas utilizados para determinar la cal fijada en las pastas se presentan en el anejo 5.2.4. A modo de ejemplo, en la figura 5-18 se presenta la curva DTG de una pasta cal/ceniza (SPS) curada 28 días.

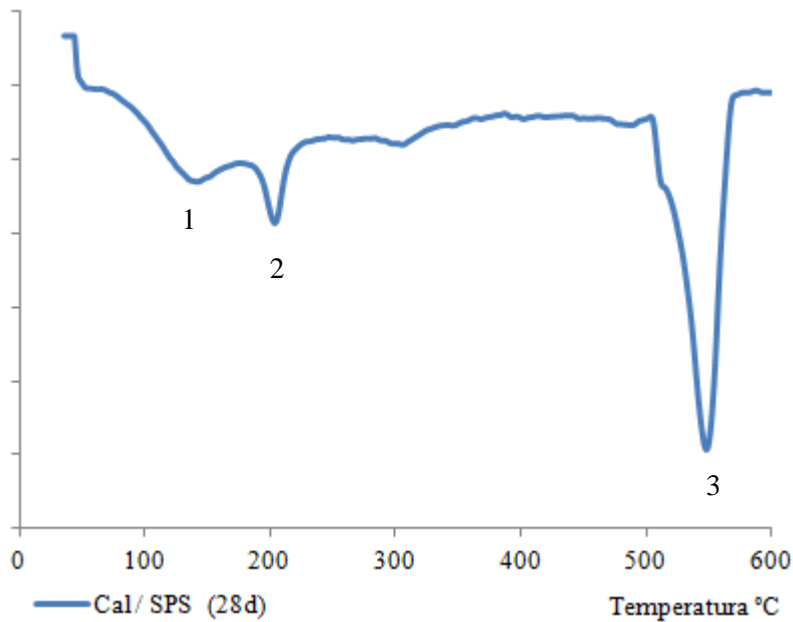


Figura 5-18 Curva DTG Pasta Cal/Ceniza SPS 28 días

En la curva DTG se observan 3 picos; el pico 1 corresponde para la deshidratación del SCH (100-180°C); pico 2 para las deshidrataciones de SACH-ACH (180-240°C) y el pico 3 para la deshidroxilación del CH (520-600°C). Integrando el pico 3 podemos conocer la cantidad de cal que queda en la pasta estudiada, es decir, la que no ha reaccionado con la puzolana. A partir de dicho dato, se puede determinar la cantidad de cal fijada por la ceniza en dicha pasta.

La ecuación de deshidroxilación del CH es la siguiente: $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$

Teniendo en cuenta la ecuación anterior, el porcentaje de cal fijada se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$\% \text{ Cal fijada} = \frac{CH_0 - CH_p}{CH_0} * 100$$

donde CH_0 es la cantidad inicial de hidróxido cálcico que contenía la pasta y CH_p es la cantidad de hidróxido que todavía queda en la pasta para un tiempo de curado determinado.

El valor de CH_p se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$CH_p = \frac{H}{PM_H} * PM_{CH}$$

donde H es la pérdida de agua evaluada en el intervalo anteriormente señalado, PM_{CH} es el peso molecular de Ca(OH)_2 y PM_H es el peso molecular del H_2O .

Cuando se realiza la evaluación de las curvas termogravimétricas se calcula un porcentaje total de pérdida de masa (PT) de la muestra desde los 35°C hasta los 600°C y un porcentaje de pérdida de masa debido a la deshidroxilación de la cal (PCH) en el intervalo de temperatura de 520-600°C; si restamos al porcentaje de pérdida de masa total, el porcentaje de pérdida debido a la cal, obtendremos el porcentaje de agua asociado a los hidratos (PH).

El porcentaje de cal fijada, la pérdida de masa total, la pérdida de masa debido a la deshidroxilación de la cal así como la pérdida de masa debido a los hidratos, se presentan en la tabla 5-9. En dicha tabla se resume los resultados para las pastas tanto con ceniza de San Pedro Sula como de Choluteca, para las distintas edades de curado.

<i>Edad Curado</i>	<i>San Pedro Sula</i>				<i>Choluteca</i>			
	<i>PT (%)</i>	<i>PCH (%)</i>	<i>PH (%)</i>	<i>Cal Fijada (%)</i>	<i>PT (%)</i>	<i>PCH (%)</i>	<i>PH (%)</i>	<i>Cal Fijada (%)</i>
3 días	8.6983	4.3850	4.3133	36.7466	7.9426	3.5001	4.4425	49.5112
7 días	8.8783	4.0884	4.7899	42.1790	8.2855	2.1150	6.1705	69.4912
28 días	9.3268	2.8131	6.5137	59.4212	9.6289	0.7730	8.8559	88.8495
45 días	10.0220	1.3378	8.6842	80.7023	11.4269	0.4200	11.0069	93.9415

Tabla 5-9 Cal Fijada Pastas Cal/Ceniza

Los resultados indican que ambas cenizas actúan como puzolanas activas, y son capaces de fijar elevadas cantidades de cal. A los 45 días de curado la pasta con ceniza de SPS ha fijado el 80.7% de la cal, mientras que la pasta con ceniza de CHOLU ha fijado el 93.9% de cal.

Se puede observar que la ceniza de CHOLU presenta porcentajes de fijación superiores a los de SPS para todas las edades de curado. Además que la ceniza de CHOLU es capaz de fijar prácticamente la mitad de la cal con tan solo 3 días de curado.

Como era de esperar, la cantidad de cal fijada aumenta con el tiempo de curado para ambas cenizas. Además también se produce una mayor pérdida asociada a los hidratos (PH%) y dicha pérdida es mayor para la ceniza de Choluteca, lo que indica que se producen una mayor proporción de compuestos hidratados con esta ceniza, lo que corrobora los datos de mayor porcentaje de cal fijada.

Microscopía Electrónica

La figura 5-19 muestra las imágenes captadas del ensayo realizado a la pasta de cal/ceniza procedente de San Pedro Sula a los 45 días de curado.

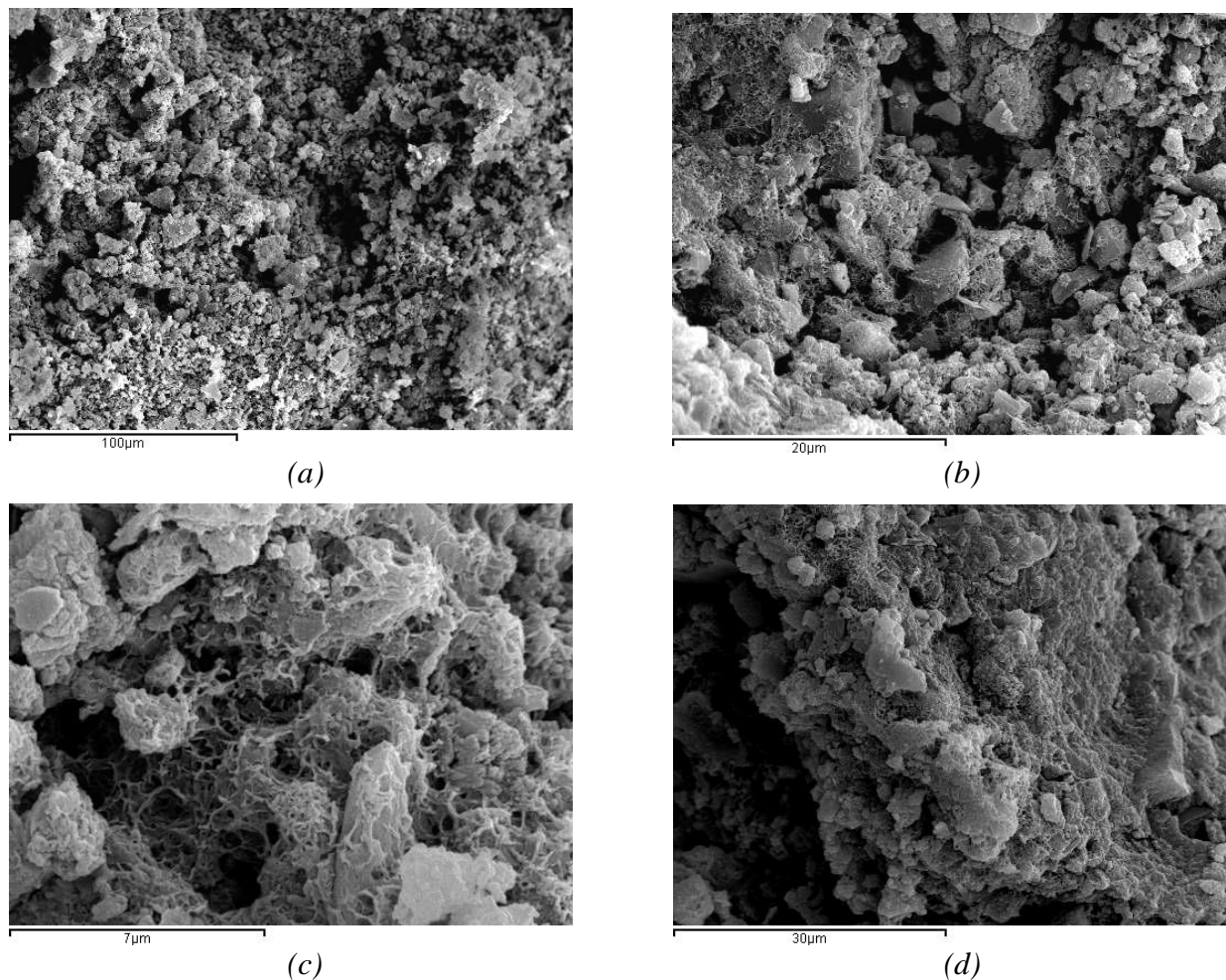


Figura 5-19 SEM Pasta Cal/Ceniza SPS 45 días (a) 500 aumentos, (b) 3000, (c) 8000, (d) 2000,

En todas las imágenes mostradas se puede ver como claramente toda la muestra es una masa amorfa. Se pudo detectar de manera cualitativa, mediante el análisis de las energías dispersivas de rayos x, que los componentes de esta masa amorfa eran silicio y calcio, por lo tanto se debe tratar de silicatos cálcicos hidratados.

La figura 5-20 muestra las imágenes captadas del ensayo realizado a la pasta de cal/ceniza procedente de Choluteca a los 45 días de curado.

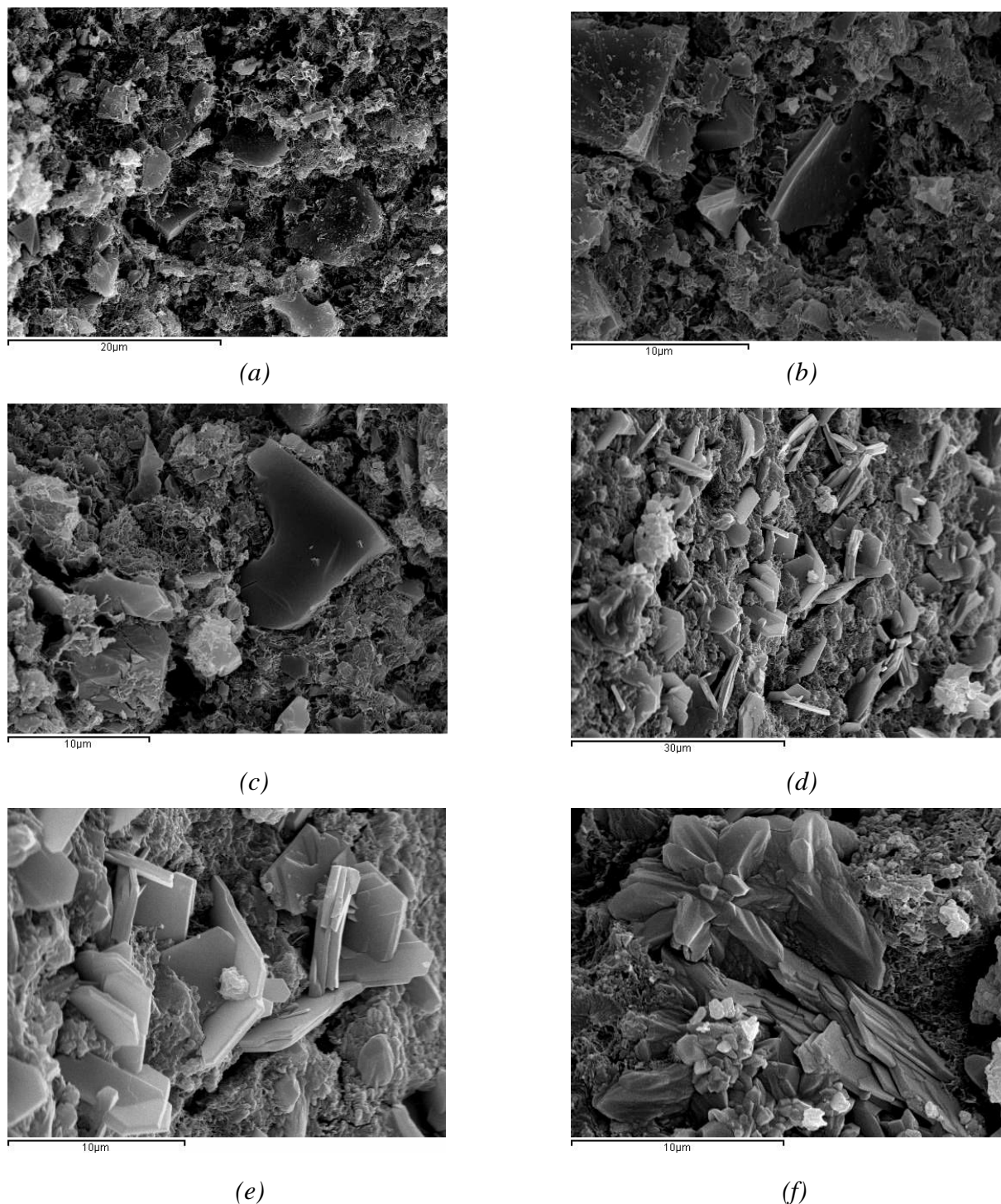


Figura 5-20 SEM Pasta Cal/Ceniza Choluteca 45 días (a) 3000 aumentos, (b) 5000, (c) 4000, (d) 2000, (e) 5000, (f) 6000

Esta pasta además de presentar la masa amorfa característica de los silicatos cálcicos hidratados, presenta cristales, probablemente de aluminatos cálcicos hidratados de forma hexagonal como se aprecia en las imágenes (d) y (e). Además en las imágenes (b) y (c) se observan trozos de ceniza en medio de la masa hidratada.

5.2.4.2 Pastas de Cemento / Ceniza

Análisis Termogravimétrico

La reacción del cemento Pórtland con agua, mediante una serie de procesos da como resultado productos de hidratación y libera portlandita. Esta portlandita liberada, en presencia de materiales puzolánicos activos puede dar lugar a la formación de nuevos productos de hidratación, similares a los formados en la hidratación del cemento.

Tras realizar el estudio de fijación de cal en pastas de cal/ceniza se procedió a llevar a cabo el mismo estudio en pastas de cemento/ceniza, donde se sustituye un porcentaje de cemento por ceniza.

En este caso, la cal fijada está en función del hidróxido cálcico que contiene la pasta control (solo cemento). Por ello, en el cálculo del porcentaje de cal fijada por las cenizas, se utiliza la siguiente expresión:

$$\% \text{ Cal fijada} = \frac{|CH_c * C_{\%}| - CH_p}{|CH_c * C_{\%}|} * 100$$

donde CH_c es la cantidad de CH en la pasta control para un tiempo de curado determinado, CH_p es la cantidad de CH presente en la pasta con catalizador a la misma edad de curado y $C_{\%}$ es la proporción de cemento presente en la pasta (en tanto por uno). Las determinaciones de CH_c y CH_p se realizan del mismo modo que para las pastas de cal.

La figura 5-21 muestra la curva DTG tanto para la pasta control, como para la pasta/ceniza (SPS) a los 28 días de curado. El resto de los termogramas utilizados se muestran en el anejo 5.2.4.

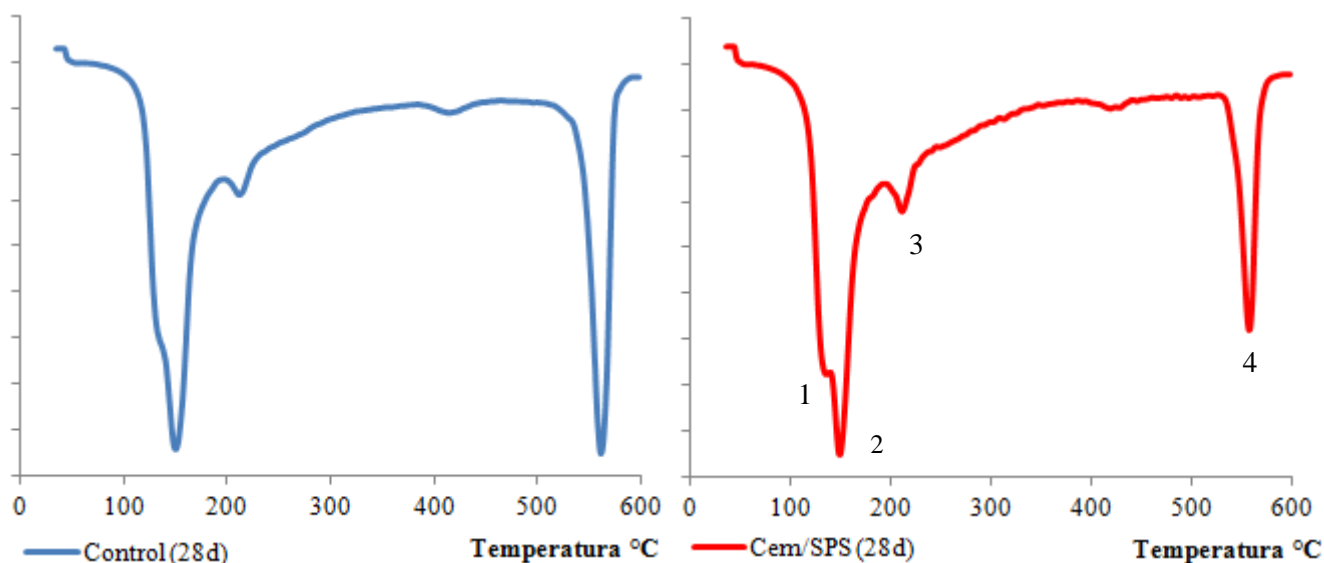


Figura 5-21 Curvas DTG Pasta Control - Pasta Cem/Ceniza SPS 28 días

En la figura 5-21 podemos diferenciar los picos de la siguiente manera: el pico 1 corresponde a la deshidratación de la etringita (100-180°C), solapado con el pico 2 de la deshidratación de la fase SCH; el pico 3 corresponde a la deshidratación de SACH-ACH (180-240°C). Finalmente, el pico 4 se asigna a la deshidroxilación del CH (520-600°C).

Los valores del porcentaje de cal fijada, la pérdida de masa total, la pérdida de masa debido a la deshidroxilación de la cal así como la pérdida de masa debido a los hidratos, se presentan en la tabla 5-10. En dicha tabla se resume los resultados para la pasta control así como las pastas con ceniza de San Pedro Sula ó de Choluteca para todas las edades de curado.

<i>Descripción</i>	<i>Tiempo de curado</i>				
	<i>3 días</i>	<i>7 días</i>	<i>28 días</i>	<i>45 días</i>	
<i>Control</i>	<i>PT (%)</i>	17.1916	17.7799	19.9314	19.4368
	<i>PCH (%)</i>	3.0428	3.0079	3.2248	3.2619
	<i>PH (%)</i>	14.1488	14.7720	16.7066	16.1749
<i>San Pedro Sula</i>	<i>PT (%)</i>	14.5683	16.3474	18.3438	17.8568
	<i>PCH (%)</i>	2.0872	1.9044	1.8041	1.4594
	<i>PH (%)</i>	12.4811	14.4430	16.5397	16.3974
	<i>Cal Fijada (%)</i>	8.5404	15.5823	25.4073	40.3456
<i>Choluteca</i>	<i>PT (%)</i>	15.2235	15.9281	18.3749	17.3941
	<i>PCH (%)</i>	2.4181	2.6018	2.4450	1.9805
	<i>PH (%)</i>	12.8054	13.3263	15.9299	15.4136
	<i>Cal Fijada (%)</i>	-5.9594	-15.3318	-1.0915	19.0451

Tabla 5-10 Cal Fijada Pastas Cemento/Ceniza

La pasta control presenta resultados muy similares para las edades de curado de 3 y 7, los porcentajes de pérdida de masa total y la asociada a la deshidroxilación son prácticamente iguales. A los 28 días se produce un aumento de pérdida de masa tanto la asociada a los hidratos como a la deshidroxilación, por ende la pérdida de masa total también aumenta. A los 45 días los resultados son muy similares que a los 28 días.

La pasta con ceniza de San Pedro Sula es capaz de fijar cal en todas las edades de curado, a los 45 días alcanza a fijar 40.3% de la portlandita. El porcentaje de pérdida de masa asociada a los hidratos y el porcentaje de cal fijada aumentan con el tiempo de curado.

Para el caso de las pastas con ceniza de Choluteca, se puede apreciar que solo se logra fijar cal a los 45 días de curado (19%). Los valores negativos en el porcentaje de cal fijada para las primeras edades de curado, indican que hay más portlandita en la pasta de cemento/ceniza que en la pasta control para una misma edad de curado. Esto se podría deber a que la ceniza actúa al principio como un filler y permite una mayor hidratación del cemento presente en la pasta.

Una posible explicación, sobre el distinto comportamiento de la pasta de cal/CHOLU y cemento/CHOLU, podría ser la siguiente:

En las pastas de cal, esta está desde el principio disponible para la reacción puzolánica, por lo que solamente se produce la reacción de fijación de cal, y en principio la velocidad de esta reacción nos determinaría el carácter puzolánico del material.

En el caso de las pastas cemento/ceniza se producen dos reacciones cuyas velocidades entran en “competición”. Por una parte, se produce la hidratación del cemento con la formación de portlandita y por otra parte, la reacción puzolánica de los componentes de la ceniza con dicha portlandita formada. Parece que en el caso de la ceniza de Choluteca, la reacción principal es la hidratación del cemento, ya que en un principio la ceniza actúa como filler, acelerando dicha reacción de hidratación. Esa es la razón por la que a edades cortas el porcentaje de fijación de cal sea negativo. Solamente cuando existe una cantidad “suficiente” de portlandita liberada en el medio, la reacción puzolánica cobra más importancia y se produce la fijación de cal.

Microscopía Electrónica

En la figura 5-22 se pueden observar las imágenes captadas del análisis realizado a la pasta control a los 28 días.

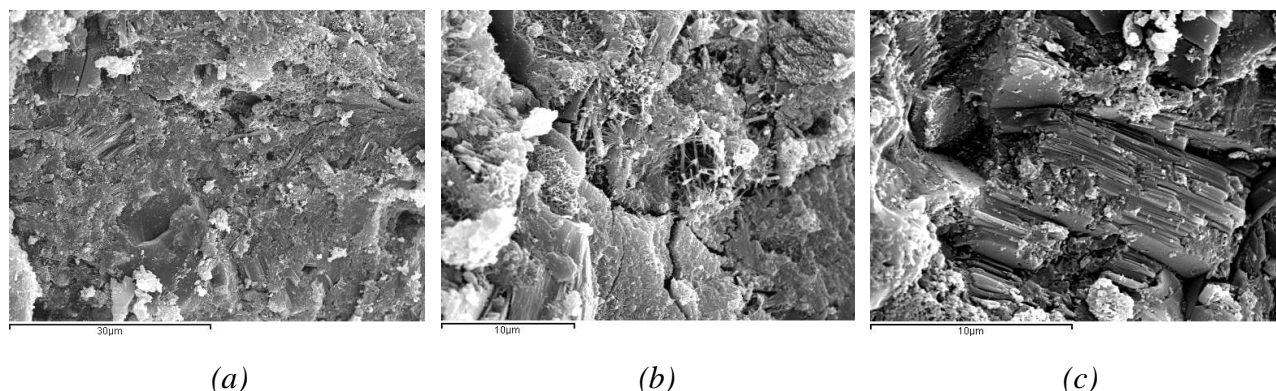


Figura 5-22 SEM Pasta Control 28 días (a) 2000 aumentos, (b)4000, (c) 5000

Se puede apreciar en la imagen (a) que la mayor parte de la muestra es una masa amorfa compuesta principalmente por silicatos cálcicos hidratados. En la imagen (b) se puede observar que también se ha producido ettringita y por otra parte la imagen (c) muestra las láminas de portlandita.

De manera general las imágenes captadas por el ensayo de microscopía electrónica corresponden con los productos de hidratación que se forman normalmente en una pasta compuesta únicamente de cemento y agua.

La figura 5-23 muestra las imágenes captadas del ensayo realizado a la pasta de cemento/ceniza procedente de San Pedro Sula a los 28 días de curado.

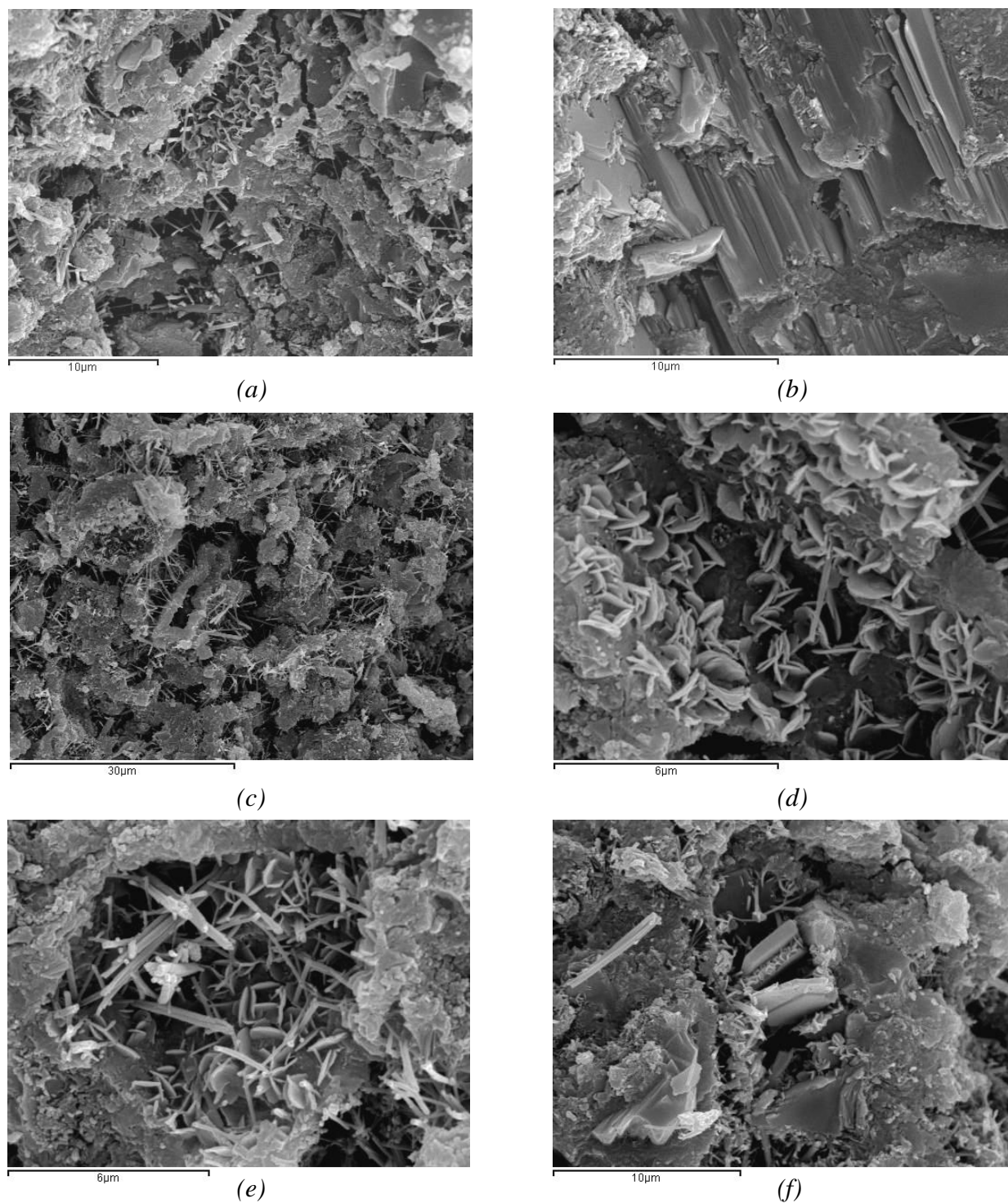


Figura 5-23 SEM Pasta Cemento/Ceniza SPS 28 días (a) 4000 aumentos, (b) 6000, (c) 9000, (d) 10.000, (e) 2000, (f) 5000

En las imágenes (a), (b) y (c) se aprecia que se forman productos de hidratación comunes en la hidratación del cemento, la portlandita, la ettringita y la masa amorfa de los silicatos cálcicos hidratados. Por otra parte se puede observar que se han formado otros productos de hidratación, probablemente gelhenita hidratada (imágenes d y e) y aluminatos cálcicos hidratados (imagen f), todos ellos característicos de reacciones puzolánicas.

La figura 5-24 muestra las imágenes captadas del ensayo realizado a la pasta de cemento/ceniza procedente de Choluteca a los 28 días de curado.

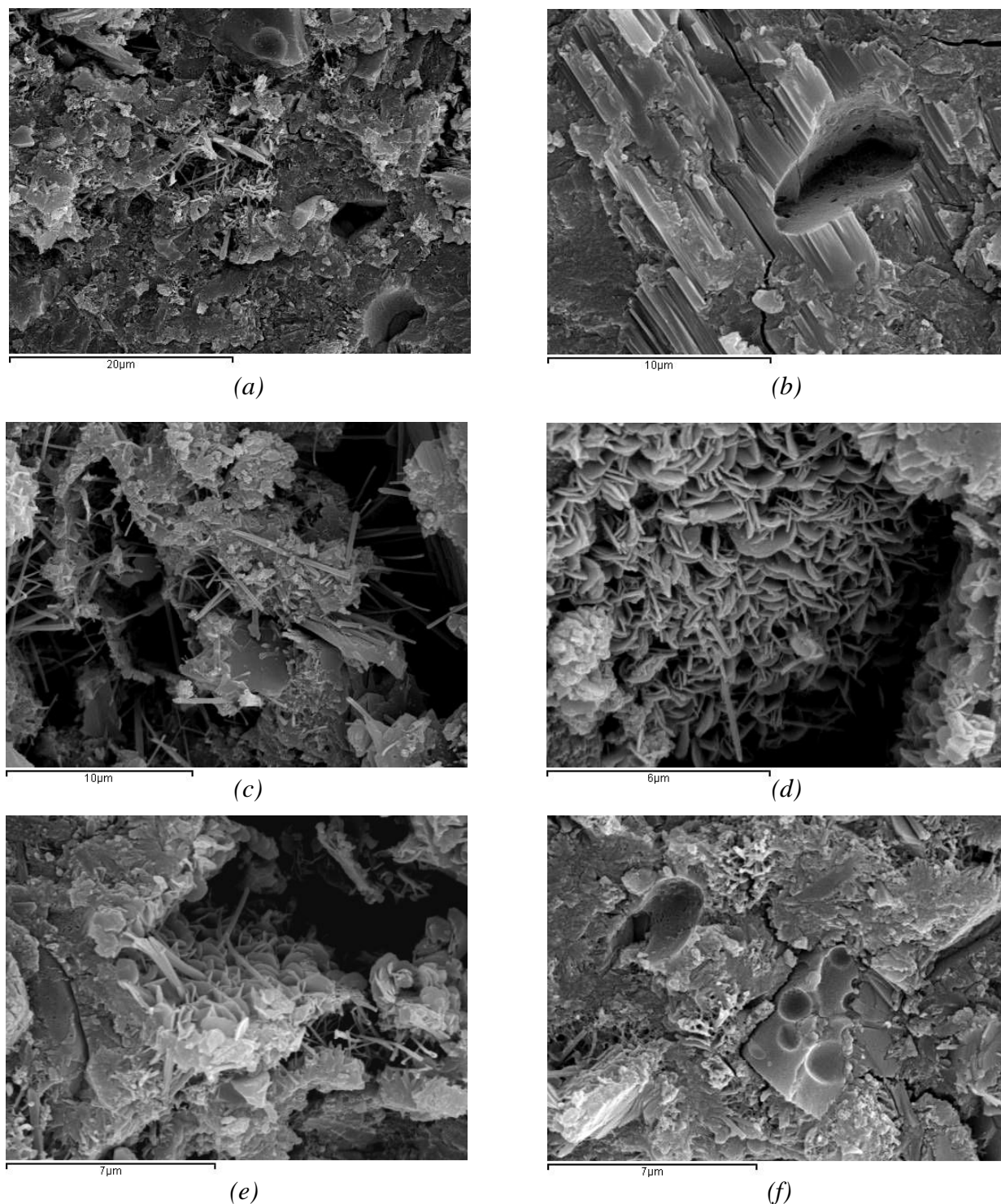


Figura 5-24 SEM Pasta Cemento/Ceniza Choluteca 28 días (a) 3000 aumentos, (b) 6000, (c) 5000, (d) 10.000, (e) 8000, (f) 8000

La pasta cem /CHOLU presenta como se puede apreciar en las primeras tres imágenes, silicatos cálcicos amorfos, ettringita y portlandita. En el resto de las imágenes se puede observar que se forma gelhenita hidratada, y también se observan algunos fragmentos de ceniza sin reaccionar.

5.3 UTILIZACIÓN DE CENIZA DE BAGAZO EN MORTEROS

Para evaluar las propiedades mecánicas de morteros en los que se utiliza como conglomerante cemento pórtland y ceniza de bagazo de caña de azúcar se fabricaron probetas de mortero de 4x4x4 cm. El mortero se fabricó siempre de manera minuciosa cumpliendo una dosificación específica, se determinó la trabajabilidad de los tres tipos de morteros fabricados, el control, y los morteros con sustitución parcial de cemento por ceniza de San Pedro Sula   Cholulteca. Las probetas fueron ensayadas posteriormente a compresión.

5.3.1 Dosificación y Trabajabilidad

Las relaciones de dosificación fijadas para los morteros objeto de este estudio se basan en las marcadas por la norma UNE-EN 196-1:2005:

- Relación agua/material cementante de 0.5.
- Relación árido/material cementante de 3.

Además se realizó una sustitución del 25% de cemento por ceniza de bagazo de caña. La dosificación utilizada para fabricar los morteros se muestra en la tabla 5-11.

<i>Descripción</i>	<i>Agua</i>	<i>Cemento</i>	<i>Ceniza</i>	<i>Binder</i>	<i>Relación A/B</i>	<i>�ridos</i>			
						<i>Grueso</i>	<i>Medio</i>	<i>Fino</i>	<i>Total</i>
Control	225	450	0	450	0.5	526.5	189	634.5	1350
SPS	225	337.5	112.5	450	0.5	526.5	189	634.5	1350
Cholulteca	225	337.5	112.5	450	0.5	526.5	189	634.5	1350

* Todas las unidades en gramos

Tabla 5-11 Dosificación de Morteros

Se realizaron dos ensayos de trabajabilidad a los morteros en amasadas distintas para verificar su comportamiento y la repetibilidad de los valores. Como era de esperar la trabajabilidad disminuyó significativamente al sustituir cemento por ceniza debido a que la estructura porosa de la ceniza absorbe agua. Los resultados se muestran en la tabla 5-12.

Trabajabilidad (mm)					
<i>Descripción</i>	<i>Ensayo 1</i>		<i>Ensayo 2</i>		<i>Promedio</i>
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	
Control	173	168	170	170	170.25
SPS	131	135	136	137	134.75
Cholulteca	139	141	140	142	140.50

Tabla 5-12 Trabajabilidad de Morteros

5.3.2 Resistencia Mecánica

Se fabricaron un total de 144 probetas de mortero de 4x4x4 cm, es decir, para cada tipo de mortero se elaboraron 48 probetas. La mitad de las probetas fueron curadas en una cámara húmeda a 20°C, la otra mitad fueron curadas en un baño térmico a 40°C. Las probetas curadas a 20°C fueron ensayadas a los 7, 28, 60 y 90 días de curado, mientras que las probetas a 40°C fueron ensayadas a 3, 7, 14 y 28 días de curado.

Resistencia Mecánica de probetas curadas a 40°C.

El resumen de los resultados obtenidos se presenta en la tabla 5-13 así como la figura 5-25. Los datos de cada uno de los ensayos realizados se detallan en el anejo 5.3.2.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)				
<i>Descripción</i>	<i>3 días</i>	<i>7 días</i>	<i>14 días</i>	<i>28 días</i>
Control	39.40	43.74	46.01	51.04
Cholulteca	37.95	45.35	50.79	55.66
San Pedro Sula	40.83	51.09	54.18	58.49

Tabla 5-13 Resistencia Mecánica de probetas curadas a 40°C

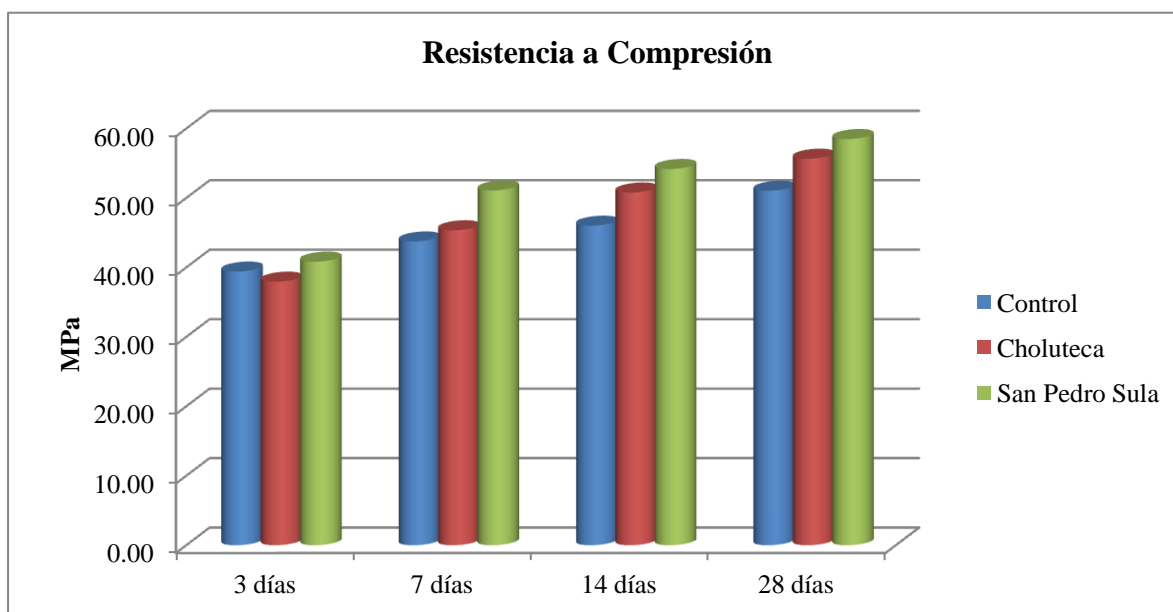


Figura 5-25 Resistencia Mecánica de probetas curadas a 40°C

Se puede observar que la presencia de ceniza de bagazo mejora la resistencia a compresión de las probetas de mortero, independientemente de la procedencia de la ceniza. Las probetas con ceniza de San Pedro Sula presentan la mayor resistencia en todas las edades, a la temprana edad de 7 días ya presentaba una resistencia de 51.09 MPa, un poco más de 7 MPa por encima de las probetas control y casi 6 MPa por encima de las probetas preparadas con ceniza de Cholulteca.

Para comparar la resistencia de las probetas control y las probetas con ceniza se calculó el índice de actividad resistente (cociente entre las resistencias del mortero con ceniza y el mortero control) a todas las edades, los resultados se detallan en la tabla 5-14 así como la figura 5-26.

ÍNDICE DE ACTIVIDAD RESISTENTE				
<i>Descripción</i>	<i>3 días</i>	<i>7 días</i>	<i>14 días</i>	<i>28 días</i>
Cholulteca	0.96	1.04	1.10	1.09
San Pedro Sula	1.04	1.17	1.18	1.15

Tabla 5-14 IAR de probetas curadas a 40°C

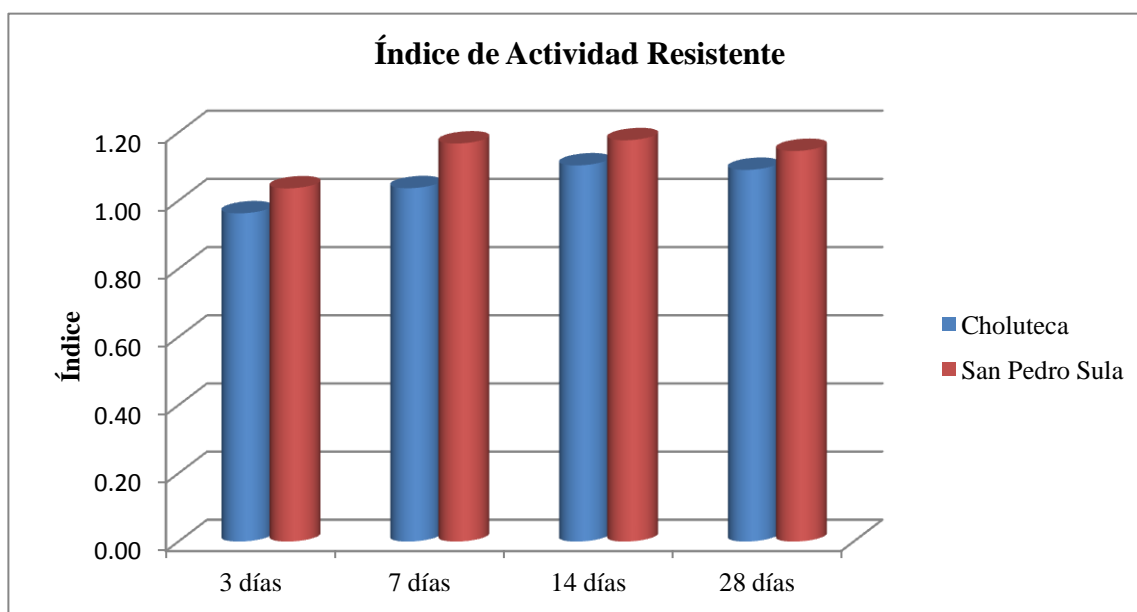


Figura 5-26 IAR de probetas curadas a 40°C

Los resultados obtenidos son muy importantes, ya que Las probetas preparadas con ceniza de SPS tienen un índice de actividad resistente superior a 1 en todas las edades, a los 28 días presenta una resistencia un 15% superior a las probetas control. Las probetas preparadas con ceniza de Cholulteca no presentan un IAR superior a 1 únicamente a los 3 días, a los 28 días tiene una resistencia un 9% mayor que las probetas control.

Resistencia Mecánica de probetas curadas a 20°C

Los valores promedio obtenidos de los ensayos realizados se presentan en la tabla 5-15 así como la figura 5-27. Los datos de cada uno de los ensayos realizados se detallan en el anejo 5.3.2.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)				
<i>Descripción</i>	<i>7 días</i>	<i>28 días</i>	<i>60 días</i>	<i>90 días</i>
Control	39.68	49.28	51.04	51.35
Cholulteca	39.99	52.42	54.82	57.17
San Pedro Sula	40.68	54.10	57.68	58.70

Tabla 5-15 Resistencia Mecánica de probetas curadas a 20°C

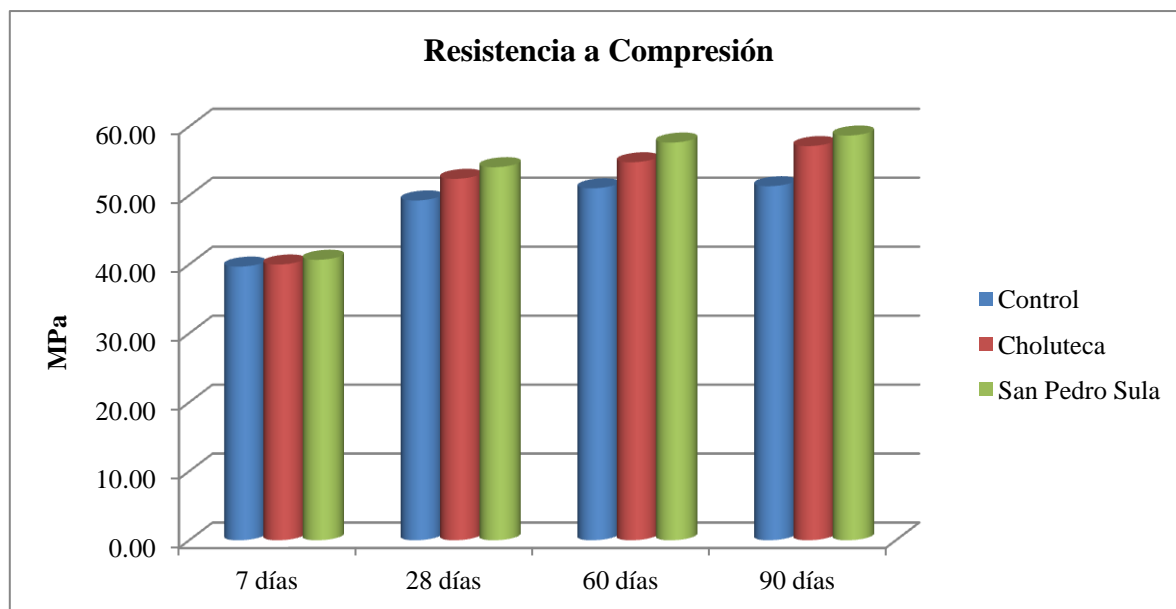


Figura 5-27 Resistencia Mecánica de probetas curadas a 20°C

Nuevamente las probetas con sustitución de cemento por ceniza mejoran la resistencia a compresión en todas las edades de ensayo. A temprana edad las resistencias son muy similares, con el transcurso del tiempo las probetas con ceniza desarrollan una mayor resistencia que las probetas control. La ceniza de San Pedro Sula sigue siendo la que presenta mayores valores de resistencia en todas las edades.

Para poder comparar las probetas se calculó el índice de actividad resistente, los valores se muestran en la tabla 5-16 así como la figura 5-28.

ÍNDICE DE ACTIVIDAD RESISTENTE				
<i>Descripción</i>	<i>7 días</i>	<i>28 días</i>	<i>60 días</i>	<i>90 días</i>
Cholulteca	1.01	1.06	1.07	1.11
San Pedro Sula	1.03	1.10	1.13	1.14

Tabla 5-16 IAR de probetas curadas a 20°C

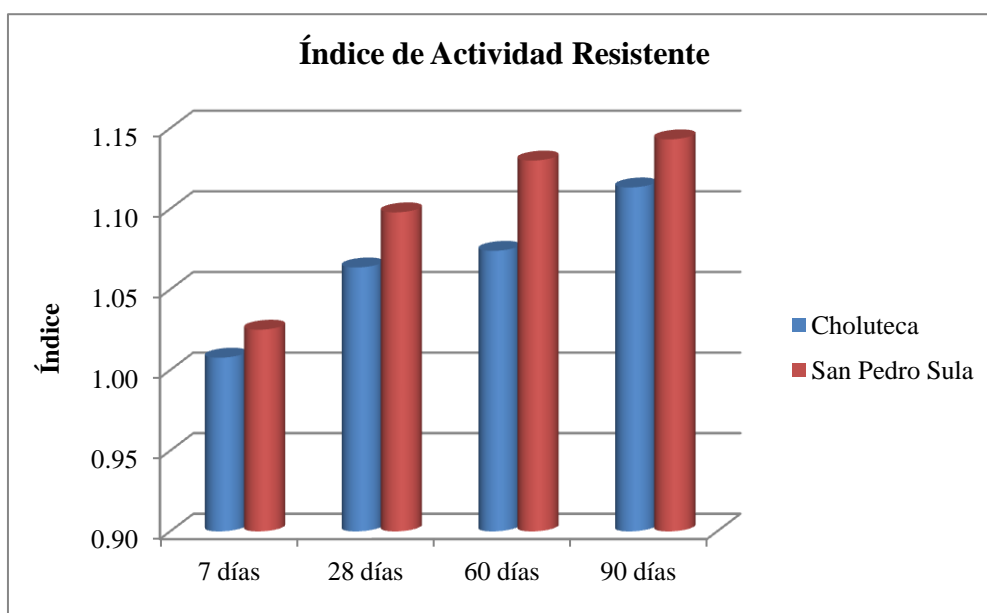


Figura 5-28 IAR de probetas curadas a 20°C

Nuevamente e incluso a temperatura ambiente, las probetas tanto con la ceniza de San Pedro Sula así como la de Choluteca tienen un índice superior a 1 en todas las edades, incluso a los 7 días de curado. A medida aumenta el tiempo de curado también aumenta el IAR para ambas cenizas. Al llegar a los 90 días las probetas de San Pedro Sula presentan una resistencia 14% superior a las probetas control, mientras que las probetas de Choluteca son un 11% más resistentes que las probetas control.

5.3.3 Peso de Probetas

Previo a realizar el ensayo de compresión, cada una de las probetas fue pesada para confirmar que tanto la dosificación como la amasada del mortero se realizaron de manera uniforme. Los resultados se resumen en las tablas 5-17 y 5-18, los datos completos del peso de cada probeta se detallan en el anejo 5.3.3.

Probetas Curadas a 40°C									
Descripción	3 días		7 días		14 días		28 días		
	Peso (g) Promedio	Desviación Estándar	Peso (g) Promedio	Desviación Estándar	Peso (g) Promedio	Desviación Estándar	Peso (g) Promedio	Desviación Estándar	
Control	140.66	1.638	140.78	1.659	140.70	0.467	142.25	1.206	
Choluteca	141.35	0.751	142.94	0.566	141.62	0.537	143.05	0.583	
SPS	139.78	0.411	141.79	0.983	141.00	0.648	140.97	0.702	

Tabla 5-17 Peso de probetas curadas a 40°C

La tabla refleja que los pesos de todas las probetas son muy uniformes, en ningún caso la desviación estándar fue mayor de 2.

Probetas Curadas a 20°C								
<i>Descripción</i>	<i>7 días</i>		<i>28 días</i>		<i>60 días</i>		<i>90 días</i>	
	<i>Peso (g)</i> <i>Promedio</i>	<i>Desviación</i> <i>Estándar</i>	<i>Peso (g)</i> <i>Promedio</i>	<i>Desviación</i> <i>Estándar</i>	<i>Peso (g)</i> <i>Promedio</i>	<i>Desviación</i> <i>Estándar</i>	<i>Peso (g)</i> <i>Promedio</i>	<i>Desviación</i> <i>Estándar</i>
Control	137.85	0.392	142.12	0.939	143.33	1.855	143.28	1.162
Cholulteca	144.55	1.033	144.34	1.239	144.10	1.962	144.30	0.795
SPS	142.42	1.516	144.16	1.794	143.98	1.182	144.22	0.895

Tabla 5-18 Peso de probetas curadas a 20°C

Las probetas tienen un peso muy uniforme en todas las edades, en ningún caso la desviación estándar es superior a 2. Los pesos de las probetas curadas a 20°C son ligeramente mayor que las probetas curadas a 40°C.

6. CONCLUSIONES

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES DE CARACTERIZACIÓN FÍSICO - QUÍMICA

- Se caracterizaron físico-químicamente tres tipos de ceniza de bagazo procedentes de Honduras. Una vez realizada dicha caracterización, se desechó la ceniza procedente de 3 Valles, debido a que probablemente tenía una contaminación importante de arena durante el muestreo y por tanto, no iba a tener un comportamiento puzolánico.
- La composición química de las cenizas de San Pedro Sula y Choluteca indica su potencial como puzolanas reactivas, el contenido de óxidos de aluminio, silicio y hierro tanto en la ceniza de San Pedro Sula como la de Choluteca es superior al 75%. Sus valores de pérdida al fuego (14.24% y 12.75%) fueron similares y los valores obtenidos de residuo insoluble muestran que tienen una baja fracción insoluble.

6.2 CONCLUSIONES DE REACTIVIDAD PUZOLÁNICA

- Las muestras de ceniza de San Pedro Sula y Choluteca son altamente reactivas, ya que los resultados del ensayo de pH y conductividad en suspensiones acuosas cal/ceniza así lo demuestran. La pérdida de conductividad a los 7 días para la proporción 1/9 fue de un 89.94% para la ceniza de SPS y de un 89.76% para la ceniza de Choluteca y dicha pérdida es superior al 40% para todas las mezclas estudiadas excepto para la 4/6 y 5/5.
- Los ensayos de termogravimetría indican que para pastas de cal/ceniza a 45 días han fijado más del 80% de la cal disponible. Los ensayos de microscopía electrónica realizados detallan que ambas cenizas reaccionan con la cal formando silicatos cálcicos hidratados.
- En el caso de las pastas cemento/ceniza, se produce un aumento progresivo con el tiempo de curado en el porcentaje de cal fijada con la ceniza SPS. En el caso de la ceniza de Choluteca, se producen fijaciones de cal negativas a tiempos cortos de curado, debido a que dicha ceniza actúa como filler y acelera la hidratación del cemento. A tiempos más largos predomina la reacción puzolánica y se produce una fijación de cal positiva por parte de la ceniza.

6.3 CONCLUSIONES DE LA UTILIZACIÓN DE CENIZA DE BAGAZO EN MORTEROS

- La adición de ceniza disminuyó la trabajabilidad de los morteros, la demanda de agua de la ceniza generada por su elevada superficie específica disminuyó la trabajabilidad de los morteros con ceniza de SPS con respecto al mortero control, para los morteros de Choluteca la disminución de la trabajabilidad fue del mismo orden de magnitud.
- La influencia de la ceniza de bagazo sobre la resistencia a compresión de morteros fue significativa. Para probetas con un 25% de sustitución de cemento por ceniza curadas a 40°C durante 28 días, las probetas de SPS fueron un 15% más resistentes que las probetas control, mientras que las probetas de Choluteca presentaron un 9% más de resistencia que las control. En el caso de probetas curadas a 20°C durante 90 días, las probetas de SPS fueron un 14% más resistentes que las control y las probetas de Choluteca presentaron un 11% más de resistencia que las control.
- De manera general se puede concluir que, en las condiciones estudiadas, es factible utilizar las cenizas de San Pedro Sula y Choluteca como adición puzolánica en morteros, generándose de esta manera una alternativa para el uso de estos residuos agrícolas que consiga un beneficio económico y medioambiental. Los resultados obtenidos abren la puerta al uso de la CBCA en prefabricados de base cementicia.

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de fin de máster ha sido una investigación inicial de tres muestras de ceniza de bagazo de caña de azúcar procedente de Honduras como su posible uso como adición puzolánica en morteros. Se ha comprobado que la sustitución parcial de cemento por ceniza genera resultados prometedores en la resistencia a compresión de morteros. Sin embargo, quedan pendientes entre otros, los siguientes trabajos a desarrollar en futuras investigaciones:

- Realizar un muestreo de forma distinta de la ceniza procedente de 3 Valles y realizar nuevamente los ensayos de esta investigación.
- Influencia de la calidad del terreno y de la variedad de caña sembrada, así como de los fertilizantes y abonos utilizados en la composición química de la ceniza obtenida.
- Influencia de la temperatura de calcinación en la actividad puzolánica de la ceniza.
- Trasladar la satisfactoria experiencia a pequeña escala en morteros a una mayor escala en la fabricación de hormigones.
- Estudio profundo de la resistencia mecánica de probetas de mortero y hormigón con adición de ceniza, evaluar la resistencia a compresión así como la resistencia a flexión. Utilizar distintos porcentajes de sustitución de cemento por ceniza, comparar los resultados y determinar el porcentaje de sustitución óptimo. Considerar la realización de ensayos con tiempos de curado de hasta 180 días.
- Analizar la influencia de la adición de ceniza en los aspectos de durabilidad en morteros y hormigones.
- Estudiar la viabilidad de utilizar morteros y hormigones con adición de ceniza para la elaboración de materiales de construcción prefabricados de bajo coste económico y medioambiental, como pueden ser bloques, tejas y ladrillos.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. L. Soriano. *"Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico Usado (FCC)"*, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (UPV), 2007.
2. S. A. Lima, H. Varum, A. Sales, V. F. Neto. *"Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash"*, *Construction and Building Materials* 35 (2012), pp 829-837.
3. UNICA - União das Indústrias de Cana-de-açúcar (Asociación de Caña de Azúcar), *Dados e Cotações (Datos y Estadísticas) - Produção total - Brazil. (2011)*. <http://www.unica.com.br/dadosCotacaos/estatistica>
4. Asociación de Productores de Azúcar de Honduras - *Innovaciones tecnológicas (2014), Estadísticas*. http://www.azucar.hn/web/?page_id=11.
5. F. Amahjour. *"Estudio de la Reactividad de las Puzolanas Artificiales: Cenizas Volantes y Humo de Sílice, y su Reutilización en Ingeniería Civil"*, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (UPV), 2000.
6. R. Roskovic, D. Bjegovic. *"Role of mineral additions in reducing CO2 emission"*, *Cement and Concrete Research* 35 (2005), 974-978.
7. UNE-EN 197-1:2000. *"Cemento. Parte I: composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes"*, 2000.
8. Ministerio de Fomento, Comisión Permanente del Hormigón España. *"Instrucción de Hormigón Estructural"*. Madrid: Ministerio de Fomento, 2008.
9. UNE-EN 451-1. *"Métodos de ensayo de cenizas volantes. Parte I: Determinación del óxido de calcio libre"*. 2006.
10. UNE-EN 196-3. *"Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y la estabilidad de volumen"*. 2005
11. V.M.Malhotra, P.K.Metha. *"Pozzolanic and cementitious materials"*, Gordon and Breach Publishers, Ottawa, 1996.

12. U. Bhattacharjee, T.C. Kandpal. "*Potential of fly ash utilization in India*". Energy 27 (2002), 151-166.
13. R.S. Iyer, J.A. Scott. "*Power station fly ash - a review of value-added utilization outside of the construction industry*", Resources Conservation & Recycling 31 (2001), 217-228.
14. Manuel Fernández Canovas. "*Hormigón*", Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Sexta Edición, Enero 2002.
15. K. Ganesan, K. Rajagopal, K. Thangavel. "*Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material*", Cement & Concrete Composites 29 (2007), 515-524.
16. S.V. Balasubramanian, K.N. Ratnavelu. "*Budget performance of sugar industry: 2000 – 2001. In: Proceeding of South India sugar mills association*", 2001, India.
17. G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, L.M. Tavares, E.M.R. Fairbairn. "*Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars*", Cement & Concrete Composites 30 (2008), 410-418.
18. N. Chusilp, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol. "*Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete*", Construction and Building Materials 23 (2009), 3352-3358.
19. G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, E.M.R. Fairbairn. "*Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash*", Construction and Building Materials 23 (2009), 3301-3303.
20. S. Rukzon, P. Chindaprasirt. "*Utilization of bagasse ash in high-strength concrete*", Materials and Design 34 (2012), 45-50.
21. G. Sua-iam, N. Makul. "*Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste*", Journal of Cleaner Production 57 (2013), 308-319.
22. E. Villar-Cociña, E. Valencia-Morales, R. González, J. Hernández. "*Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A kinetic-diffusive model*", Cement and Concrete Research 33 (2003) 517-524.
23. E. Villar-Cociña, M. Frías, E. Valencia-Morales, M.I. Sánchez. "*Validation of a kinetic-diffusive model to characterize pozzolanic reaction kinetics in sugar cane straw-clay ash/lime systems*", Materiales de Construcción 55 (2005), 29-40.

-
24. M. Frías, E. Villar-Cociña, M.I. Sánchez, E. Valencia-Morales. *"The effect that different pozzolanic activity methods has on the kinetic constants of the pozzolanic reaction in sugar cane straw-clay ash/lime systems: Application of a kinetic-diffusive model"*, Cement and Concrete Research 35 (2005), 2137-2142.
 25. E. Villar-Cociña, M. Frías, E. Valencia-Morales, M.I. Sánchez. *"An evaluation of different kinetic models for determining the kinetic coefficients in sugar cane straw - clay ash/lime system"*, Advances in Cement Research 18 (2006), 17-26.
 26. M. Frías, E. Villar-Cociña, E. Valencia-Morales. *"Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: Calcining temperature and kinetic parameters"*, Waste Management 27 (2007), 533-538.
 27. M. Frías, E. Villar-Cociña. *"Influence of calcining temperature on the activation of sugar-cane bagasse: kinetic parameters"*, Advances in Cement Research 19 (2007), 109-115.
 28. E. Villar-Cociña, M. Frías, E. Valencia-Morales. *"Sugar cane wastes as pozzolanic materials: Application of mathematical model"*, ACI Materials Journal 105 (2008), 258-264.
 29. E.V. Morales, E. Villar-Cociña, M. Frías, S.F. Santos, H. Savastano Jr. *"Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation"*, Cement & Concrete Composites 31 (2009), 22-28.
 30. E. Villar-Cociña, M. Frías, E. Valencia-Morales, H. Savastano Jr. *"Study of the pozzolanic reaction kinetics in sugar cane bagasse-clay ash/calcium hydroxide system: kinetic parameters and pozzolanic activity"*, Advances in Cement Research 21 (2009), 23-30.
 31. E. Villar-Cociña, M. Frías, J. Hernández, H. Savastano Jr. *"Pozzolanic behaviour of a bagasse ash from boiler of a Cuban sugar factory"*, Advances in Cement Research 25 (2013), 136-142.
 32. A.L. Beraldo, J. Payá, L. Soriano, J. Monzó. *"Physico-mechanical characterization of a composite from sugar cane straw particles and alternative cements"*, DYNA-Colombia 80 (2013), 105-114.
 33. J.F. Martirena, B. Middendorf, R.L. Day, M. Gehrke, P. Roque, L. Martínez, S. Betancourt. *"Rudimentary, low tech incinerators as a means to produce reactive pozzolan out of sugar cane straw"*, Cement and Concrete Research 36 (2006), 1056-1061.

34. L. Martínez, R. Quintana, J.F. Martirena. *"Aglomerante puzolánico formado por cal y ceniza de paja de caña de azúcar: la influencia granulométrica de sus componentes en la actividad aglomerante"*, Revista Ingeniería de Construcción 22 (2008), 113-122.
35. J. Payá, J. Monzó, M.V. Borrachero, L. Díaz, L.M. Ordóñez. *"Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production"*, Journal of Chemical Technology and Biotechnology 77 (2002), 321-325.
36. A.E. Souza, S.R. Teixeira, G.T.A. Santos, F.B. Costa, E. Longo. *"Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials"*, Journal of Environmental Management 92 (2011), 2774-2780.
37. K.C.P. Faria, R.F. Gurgel, J.N.F. Holanda. *"Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks"*, Journal of Environmental Management 101 (2012), 7-12.
38. S.R. Teixeira, A.E. Souza, G.T. Almeida, A.F. Vilche. *"Sugarcane Bagasse Ash as a Potential Quartz Replacement in Red Ceramic"*, Journal of the American Ceramic Society 91 (2008), 1883-1887.
39. R. Alavéz, P. Montes, J. Martínez, D. Altamirano, Y. Gochi. *"The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks"*, Construction and Building Materials 34 (2012), 296-305.
40. K.C.P. Faria, J.N.F. Holanda. *"Thermal study of clay ceramic pastes containing sugarcane bagasse ash waste"*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 114 (2013), 27-32.
41. UNE-EN 196-2. *"Métodos de ensayo de cementos. Parte II: Análisis químico de cemento"*. 2006.
42. UNE 77-013-89. *"Calidad del agua. Determinación del contenido de calcio: Método volumétrico con EDTA"*, 1989.
43. UNE-EN 196-1. *"Métodos de ensayo de cementos. Parte I: Determinación de resistencias mecánicas"*. 2005.
44. UNE-EN 83-811. *"Métodos de ensayo de morteros frescos. Determinación de la consistencia. Mesa de sacudidas"*. 1992.

-
45. Douglas A. Skoog, James J. Leary. *"Análisis instrumental"*. Mc Graw-Hill, cuarta edición, 1991
 46. Federación Interamericana del Cemento (FICEM). *"Informe Estadístico"*, 2013.
 47. H. Sagastume. *"Dinámica económica de la industria azucarera centroamericana: el caso de Guatemala, Honduras, El Salvador y Nicaragua"*, Tesis Escuela Agrícola Panamericana (Zamorano), 2012.
 48. M. Frías, E. Villar, H. Savastano. *"Brazilian sugar cane bagasse ashes from cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture"*, *Cement & Concrete Composites* 33 (2011), 490 - 496.
 49. G. C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, E.M.R. Fairbairn. *"Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios"*, *Quim Nova* 32 (2009), 82-86.
 50. R. Srinivasan, K. Sathiya. *"Experimental Study on Bagasse Ash in Concrete"*, *International Journal for Service Learning in Engineering* 5 (2010), 60-66.
 51. N.B. Singh, V.D. Singh, S. Rai. *"Hydration of bagasse ash-blended portland cement"*, *Cement and Concrete Research* 30 (2000), 1485-1488.
 52. V.G. Jiménez, F.M. León, P. Montes, C. Gaona, J.G. Chacón. *"Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars"*, *Construction and Building Materials* 40 (2013), 691-701.
 53. S. Janjaturaphan, S. Wansom. *"Pozzolanic activity of industrial sugar cane bagasse ash"*, *Suranaree Journal of Science and Technology*. 17 (2010), 349-357.
 54. G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, L.M. Tavares, E.M.R. Fairbairn. *"Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete"*, *Cement and Concrete Research* 39 (2009), 110-115.

ANEJOS

ANEJO 5.1.1 MOLIEDA Y GRANULOMETRÍA

En este anejo se muestran las gráficas de los ensayos de granulometría realizados para las 3 muestras de ceniza en su estado original así como para cada intervalo de tiempo de molienda.

A. Ceniza de San Pedro Sula

Concentration:	0.0382 %Vol	Vol. Weighted Mean D[4,3]:	62.269 um	Specific Surface Area:	0.262 m ² /g
Span :	2.175	Uniformity:	0.988	Surface Weighted Mean D[3,2]:	22.892 um
Result units:	Volume	Particle density :	1.000 g/cm ³		
d(0.1):	12.210 um	d(0.5):	40.230 um	d(0.9):	99.705 um

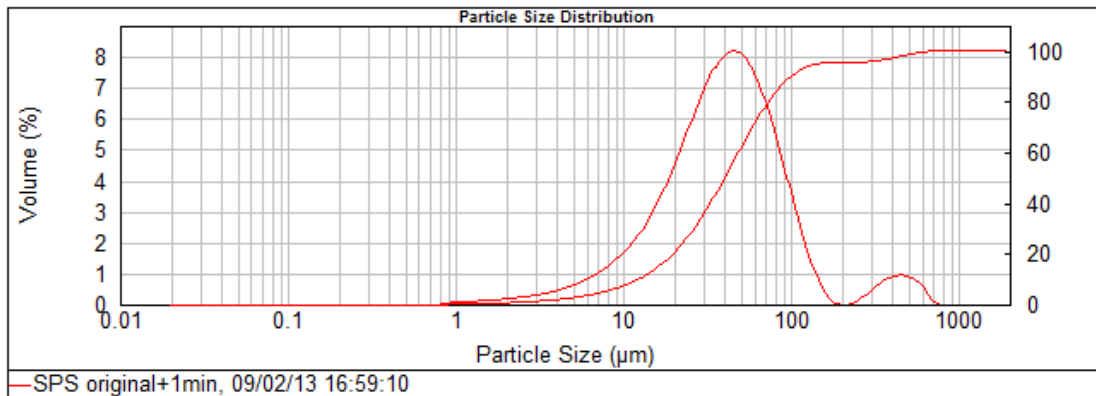


Figura A-5.1.1-1 Granulometría Original SPS

Concentration:	0.0075 %Vol	Vol. Weighted Mean D[4,3]:	18.845 um	Specific Surface Area:	1.08 m ² /g
Span :	3.017	Uniformity:	0.981	Surface Weighted Mean D[3,2]:	5.563 um
Result units:	Volume	Particle density :	1.000 g/cm ³		
d(0.1):	2.601 um	d(0.5):	12.858 um	d(0.9):	41.394 um

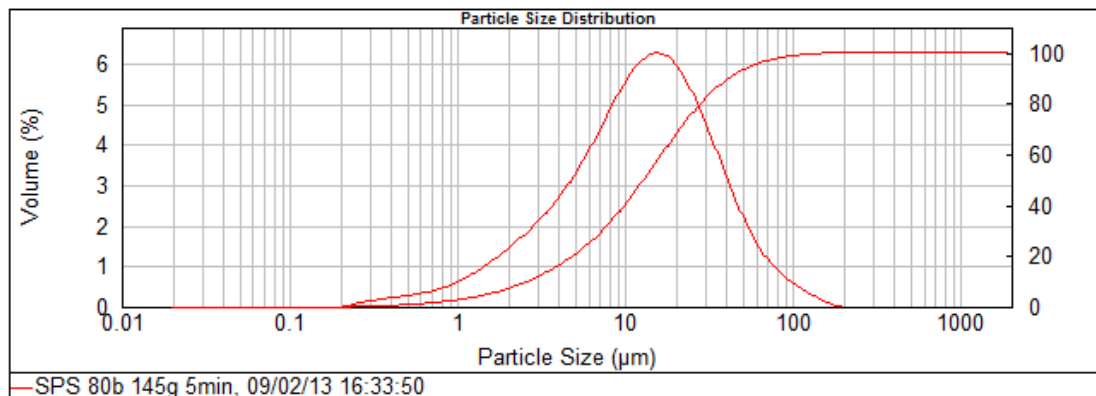


Figura A-5.1.1-2 Granulometría SPS molido 5 minutos

Concentration: 0.0062 %Vol Vol. Weighted Mean D[4,3]: 12.170 um Specific Surface Area: 1.56 m²/g
 Span : 2.989 Uniformity: 0.966 Surface Weighted Mean D[3,2]: 3.834 um
 Result units: Volume Particle density : 1.000 g/cm³
 d(0.1): 1.705 um d(0.5): 8.481 um d(0.9): 27.053 um

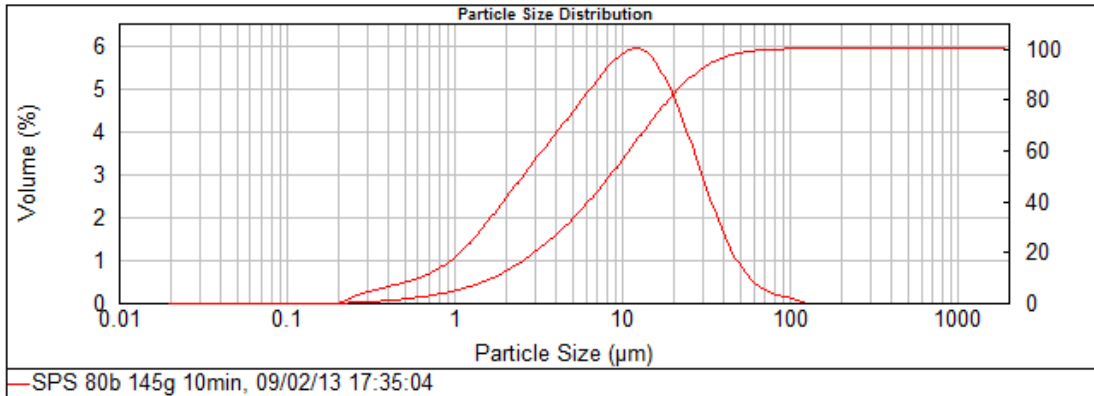


Figura A-5.1.1-3 Granulometría SPS molido 10 minutos

Concentration: 0.0049 %Vol Vol. Weighted Mean D[4,3]: 10.378 um Specific Surface Area: 1.8 m²/g
 Span : 2.951 Uniformity: 0.97 Surface Weighted Mean D[3,2]: 3.327 um
 Result units: Volume Particle density : 1.000 g/cm³
 d(0.1): 1.471 um d(0.5): 7.201 um d(0.9): 22.723 um

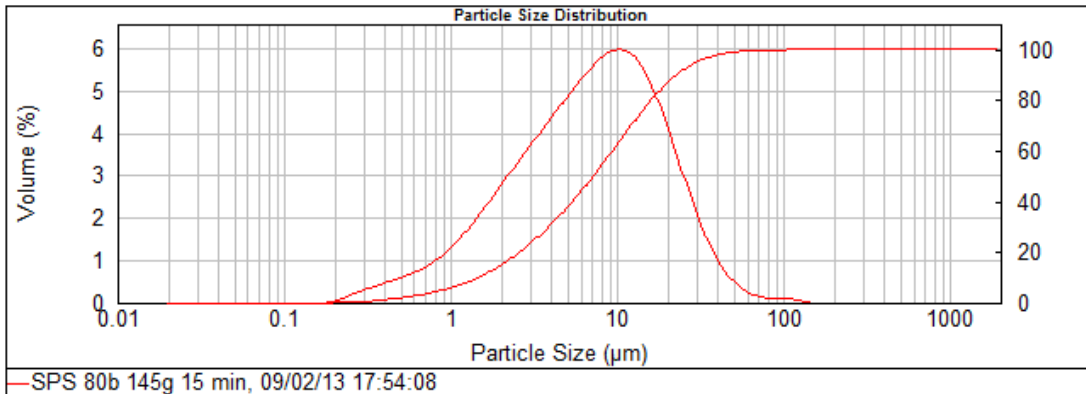


Figura A-5.1.1-4 Granulometría SPS molido 15 minutos

Concentration: 0.0043 %Vol Vol. Weighted Mean D[4,3]: 8.265 um Specific Surface Area: 2.22 m²/g
 Span : 3.200 Uniformity: 1.02 Surface Weighted Mean D[3,2]: 2.702 um
 Result units: Volume Particle density : 1.000 g/cm³
 d(0.1): 1.173 um d(0.5): 5.572 um d(0.9): 19.001 um

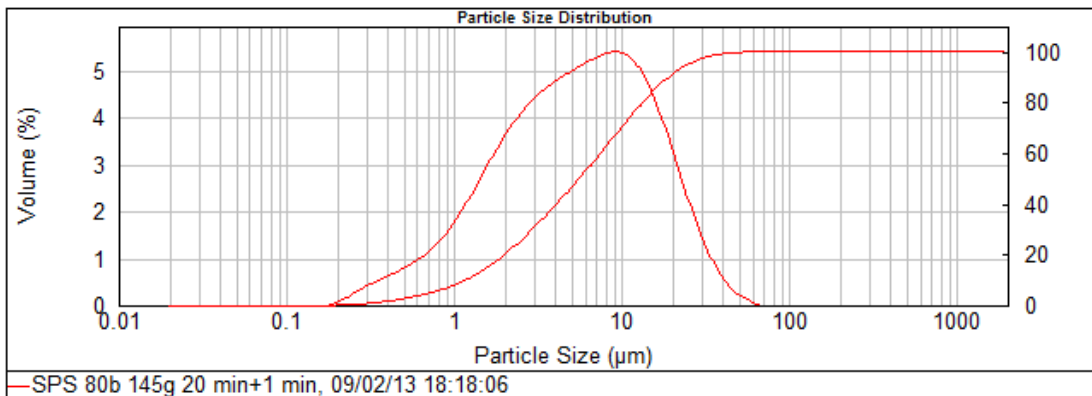


Figura A-5.1.1-5 Granulometría SPS molido 20 minutos

Concentration: 0.0035 %Vol Vol. Weighted Mean D[4,3]: 8.443 um Specific Surface Area: 2.52 m²/g
 Span : 3.574 Uniformity: 1.14 Surface Weighted Mean D[3,2]: 2.377 um
 Result units: Volume Particle density : 1.000 g/cm³
 d(0.1): 0.948 um d(0.5): 5.377 um d(0.9): 20.164 um

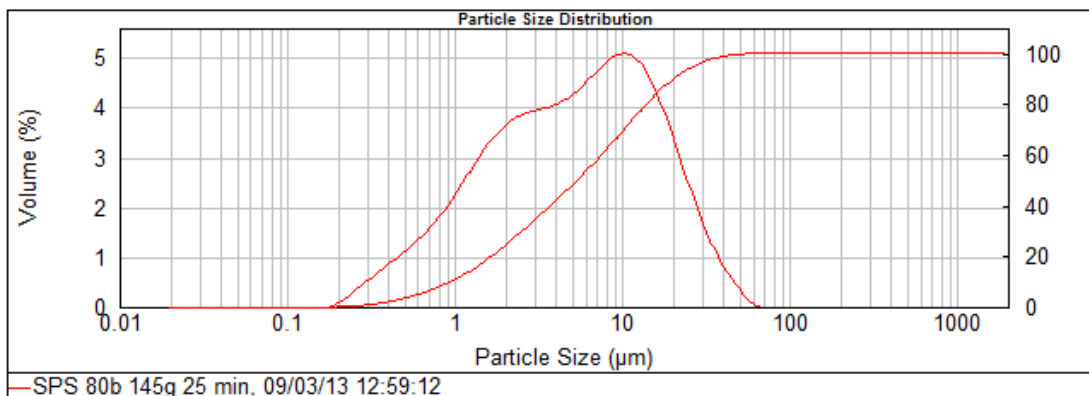


Figura A-5.1.1-6 Granulometría SPS molido 25 minutos

Concentration: 0.0037 %Vol Vol. Weighted Mean D[4,3]: 6.914 um Specific Surface Area: 2.93 m²/g
 Span : 3.710 Uniformity: 1.16 Surface Weighted Mean D[3,2]: 2.048 um
 Result units: Volume Particle density : 1.000 g/cm³
 d(0.1): 0.808 um d(0.5): 4.328 um d(0.9): 16.864 um

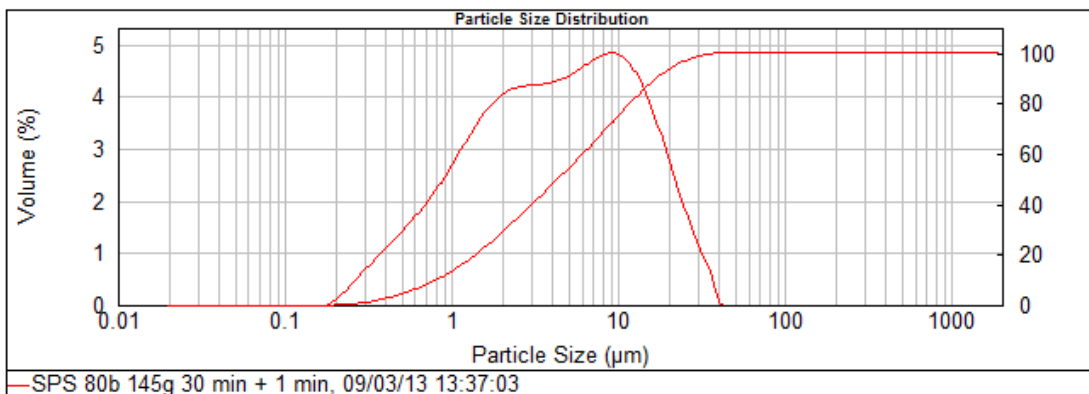


Figura A-5.1.1-7 Granulometría SPS molido 30 minutos

B. Ceniza de Choluteca

Concentration: 0.0546 %Vol Vol. Weighted Mean D[4,3]: 179.500 um Specific Surface Area: 0.189 m²/g
 Span : 7.319 Uniformity: 2.06 Surface Weighted Mean D[3,2]: 31.685 um
 Result units: Volume Particle density : 1.000 g/cm³
 d(0.1): 14.780 um d(0.5): 70.938 um d(0.9): 533.938 um

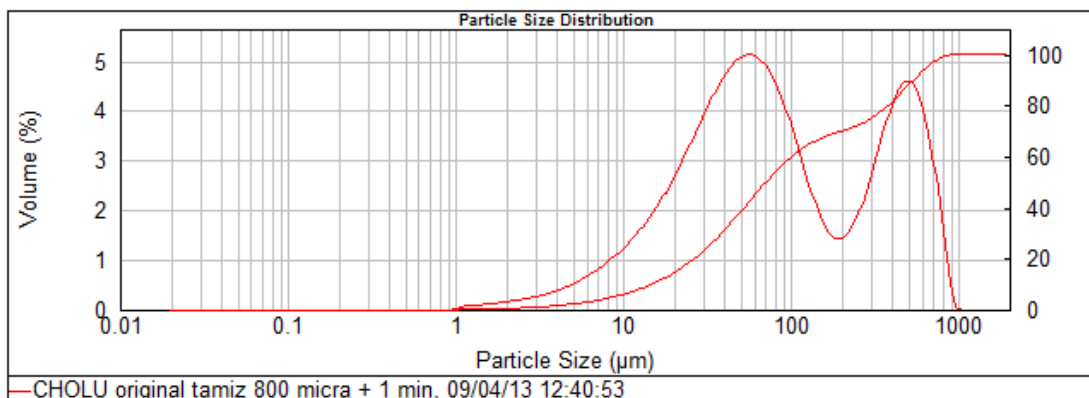


Figura B-5.1.1-1 Granulometría Original Choluteca

Concentration: 0.0070 %Vol **Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 16.313 um **Specific Surface Area:** 1.31 m²/g
Span : 3.254 **Uniformity:** 1.01 **Surface Weighted Mean D[3,2]:** 4.571 um
Result units: Volume **Particle density :** 1.000 g/cm³
d(0.1): 1.850 um **d(0.5):** 11.266 um **d(0.9):** 38.511 um

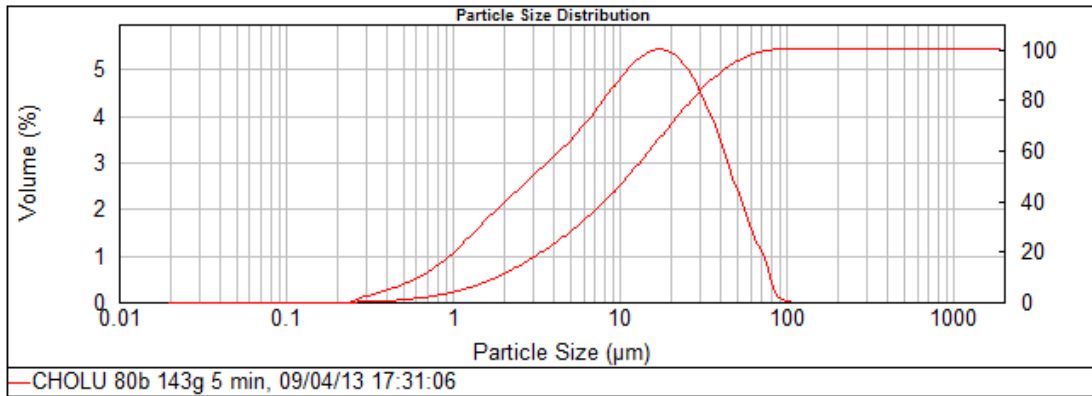


Figura B-5.1.1-2 Granulometría Cholteca molido 5 minutos

Concentration: 0.0045 %Vol **Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 11.646 um **Specific Surface Area:** 1.74 m²/g
Span : 3.251 **Uniformity:** 1.09 **Surface Weighted Mean D[3,2]:** 3.438 um
Result units: Volume **Particle density :** 1.000 g/cm³
d(0.1): 1.390 um **d(0.5):** 7.655 um **d(0.9):** 26.275 um

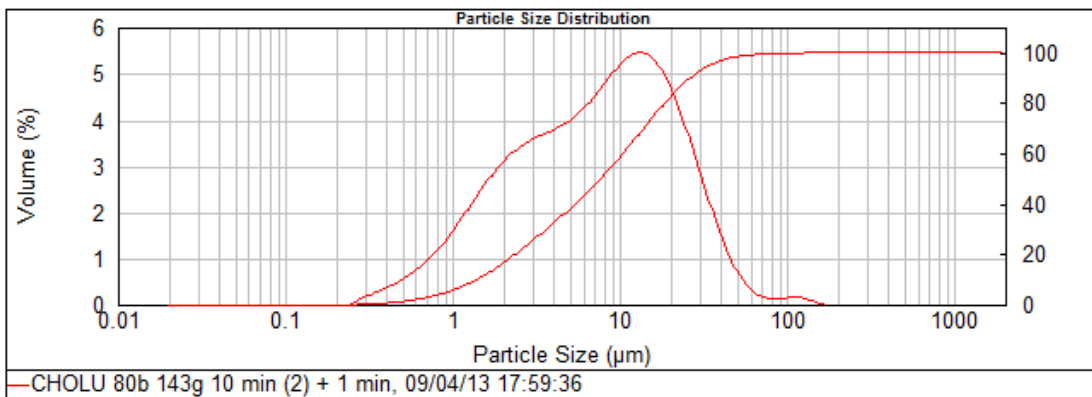


Figura B-5.1.1-3 Granulometría Cholteca molido 10 minutos

Concentration: 0.0041 %Vol **Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 9.932 um **Specific Surface Area:** 2.01 m²/g
Span : 3.209 **Uniformity:** 1.15 **Surface Weighted Mean D[3,2]:** 2.984 um
Result units: Volume **Particle density :** 1.000 g/cm³
d(0.1): 1.232 um **d(0.5):** 6.233 um **d(0.9):** 21.232 um

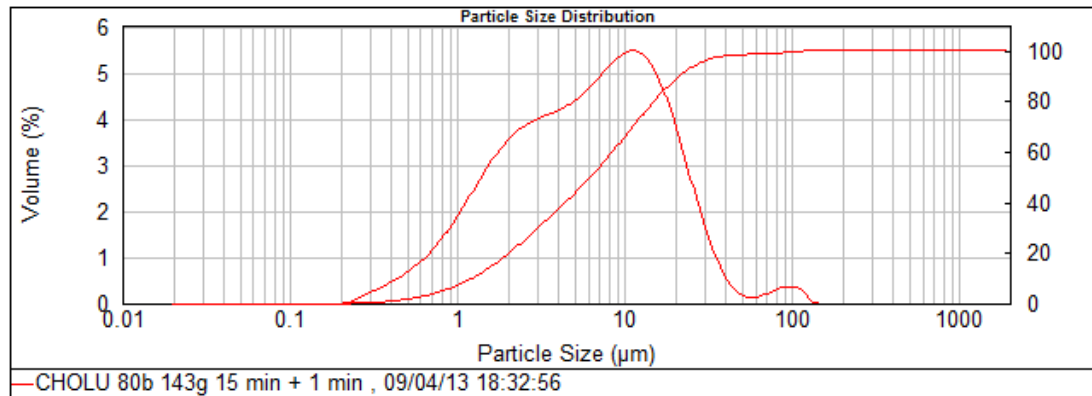


Figura B-5.1.1-4 Granulometría Cholteca molido 15 minutos

Concentration: 0.0041 %Vol **Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 8.839 μm **Specific Surface Area:** 2.1 m^2/g
Span : 3.164 **Uniformity:** 1.06 **Surface Weighted Mean D[3,2]:** 2.858 μm
Result units: Volume **Particle density :** 1.000 g/cm^3
d(0.1): 1.186 μm **d(0.5):** 5.816 μm **d(0.9):** 19.587 μm

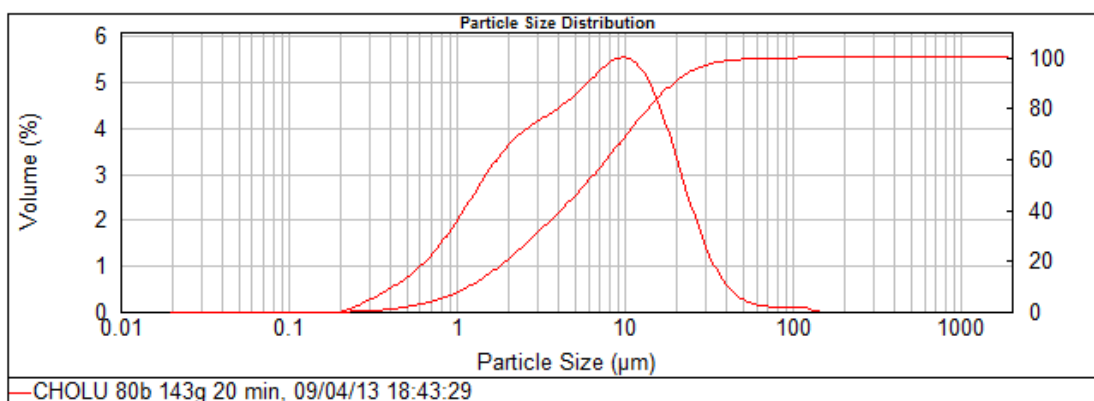


Figura B-5.1.1-5 Granulometría Choluteca molido 20 minutos

Concentration: 0.0039 %Vol **Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 8.483 μm **Specific Surface Area:** 2.25 m^2/g
Span : 3.247 **Uniformity:** 1.15 **Surface Weighted Mean D[3,2]:** 2.665 μm
Result units: Volume **Particle density :** 1.000 g/cm^3
d(0.1): 1.110 μm **d(0.5):** 5.266 μm **d(0.9):** 18.207 μm

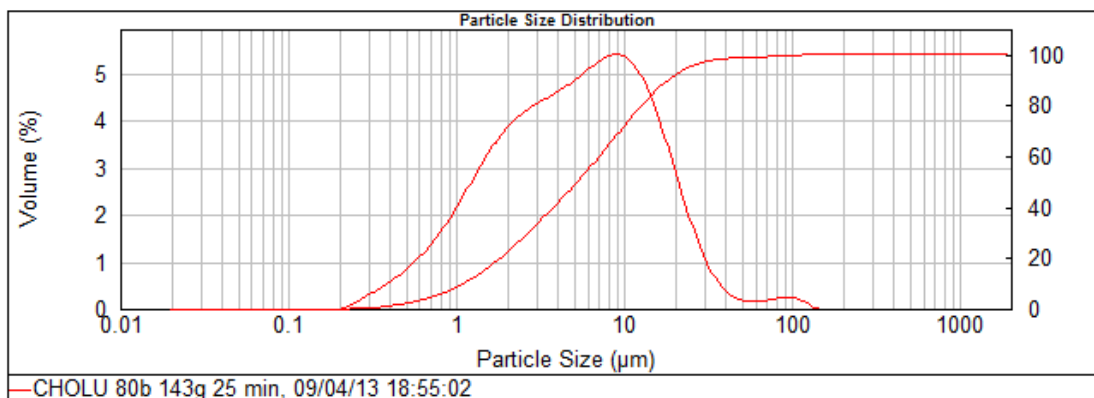


Figura B-5.1.1-6 Granulometría Choluteca molido 25 minutos

Concentration: 0.0040 %Vol **Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 6.901 μm **Specific Surface Area:** 2.46 m^2/g
Span : 3.267 **Uniformity:** 1.03 **Surface Weighted Mean D[3,2]:** 2.436 μm
Result units: Volume **Particle density :** 1.000 g/cm^3
d(0.1): 1.019 μm **d(0.5):** 4.613 μm **d(0.9):** 16.090 μm

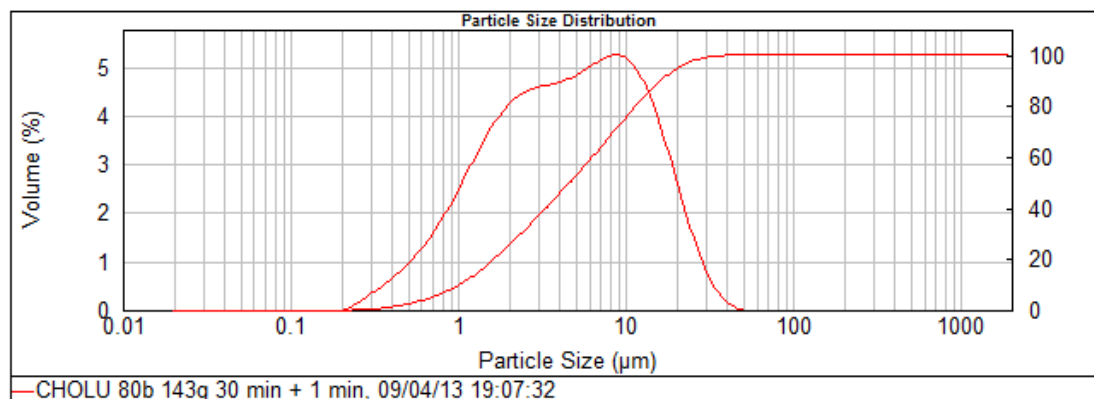


Figura B-5.1.1-7 Granulometría Choluteca molido 30 minutos

C. Ceniza de 3 Valles

Concentration:	0.2390 %Vol	Vol. Weighted Mean D[4,3]:	236.598 um	Specific Surface Area:	0.0433 m ² /g
Span :	1.529	Uniformity:	0.474	Surface Weighted Mean D[3,2]:	138.557 um
Result units:	Volume	Particle density :	1.000 g/cm ³		
d(0.1):	93.539 um	d(0.5):	213.151 um	d(0.9):	419.550 um

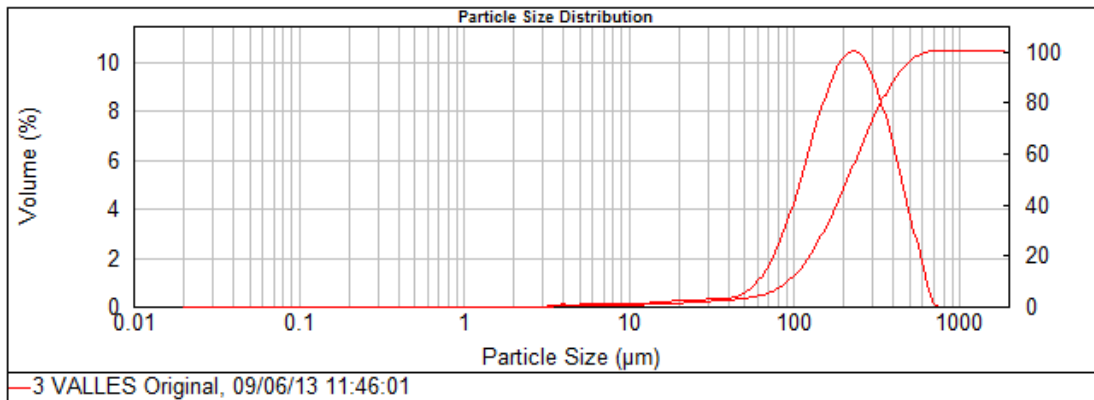


Figura C-5.1.1-1 Granulometría Original 3 Valles

Concentration:	0.0158 %Vol	Vol. Weighted Mean D[4,3]:	78.320 um	Specific Surface Area:	0.548 m ² /g
Span :	2.847	Uniformity:	0.899	Surface Weighted Mean D[3,2]:	10.950 um
Result units:	Volume	Particle density :	1.000 g/cm ³		
d(0.1):	5.018 um	d(0.5):	61.502 um	d(0.9):	180.096 um

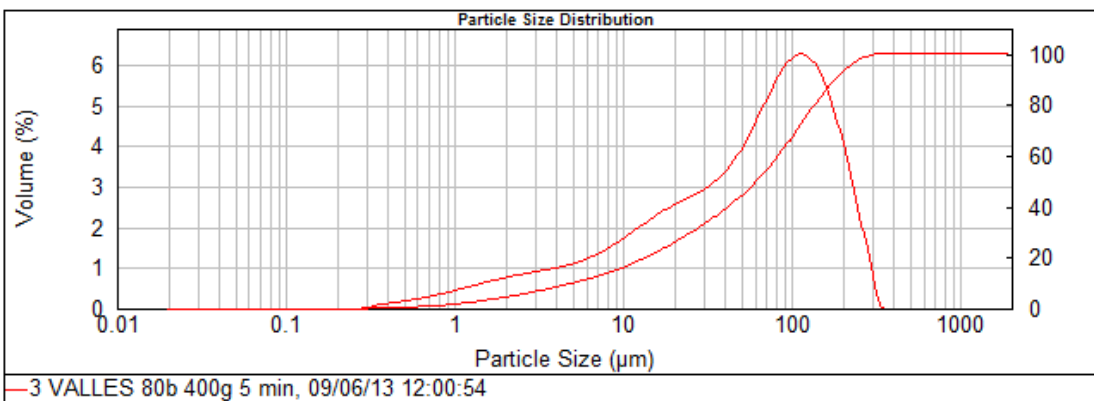


Figura C-5.1.1-2 Granulometría 3 Valles molido 5 minutos

Concentration:	0.0092 %Vol	Vol. Weighted Mean D[4,3]:	37.515 um	Specific Surface Area:	1 m ² /g
Span :	3.707	Uniformity:	1.16	Surface Weighted Mean D[3,2]:	5.997 um
Result units:	Volume	Particle density :	1.000 g/cm ³		
d(0.1):	2.220 um	d(0.5):	24.490 um	d(0.9):	93.009 um

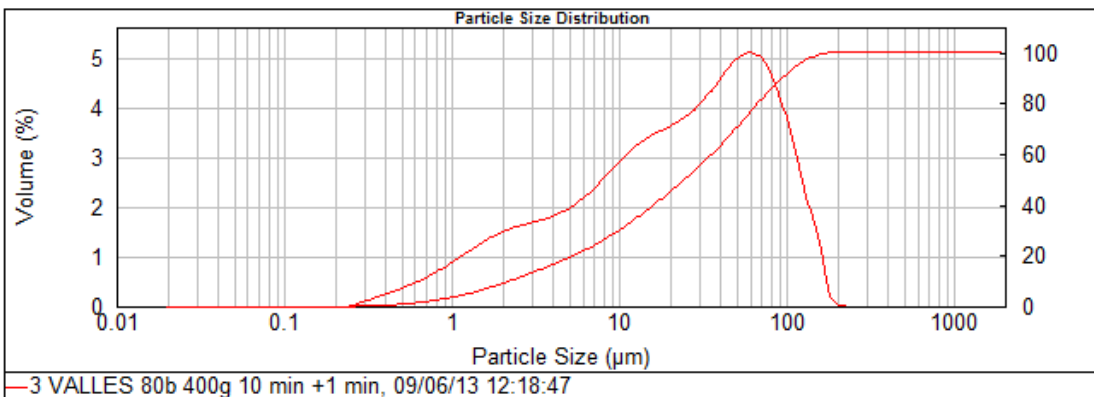


Figura C-5.1.1-3 Granulometría 3 Valles molido 10 minutos

Concentration: 0.0063 %Vol Vol. Weighted Mean D[4,3]: 24.716 um Specific Surface Area: 1.31 m²/g
 Span: 3.931 Uniformity: 1.22 Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.592 um
 Result units: Volume Particle density: 1.000 g/cm³
 d(0.1): 1.670 um d(0.5): 15.436 um d(0.9): 62.351 um

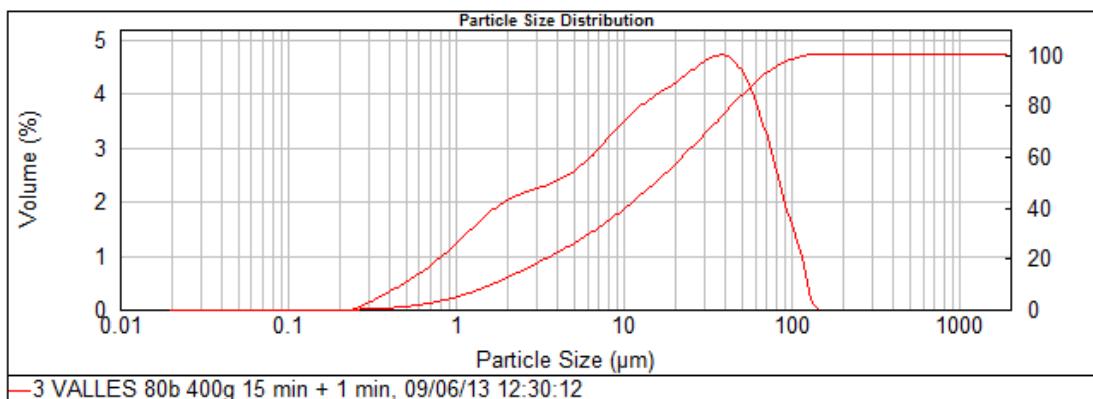


Figura C-5.1.1-4 Granulometría 3 Valles molido 15 minutos

Concentration: 0.0072 %Vol Vol. Weighted Mean D[4,3]: 15.633 um Specific Surface Area: 1.63 m²/g
 Span: 3.759 Uniformity: 1.16 Surface Weighted Mean D[3,2]: 3.686 um
 Result units: Volume Particle density: 1.000 g/cm³
 d(0.1): 1.387 um d(0.5): 9.985 um d(0.9): 38.914 um

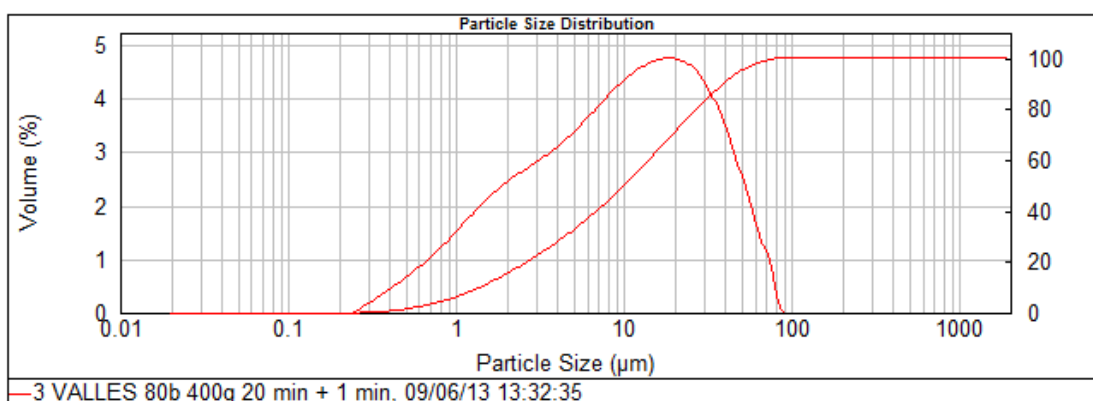


Figura C-5.1.1-5 Granulometría 3 Valles molido 20 minutos

Concentration: 0.0048 %Vol Vol. Weighted Mean D[4,3]: 14.857 um Specific Surface Area: 1.73 m²/g
 Span: 3.902 Uniformity: 1.21 Surface Weighted Mean D[3,2]: 3.474 um
 Result units: Volume Particle density: 1.000 g/cm³
 d(0.1): 1.305 um d(0.5): 9.234 um d(0.9): 37.338 um

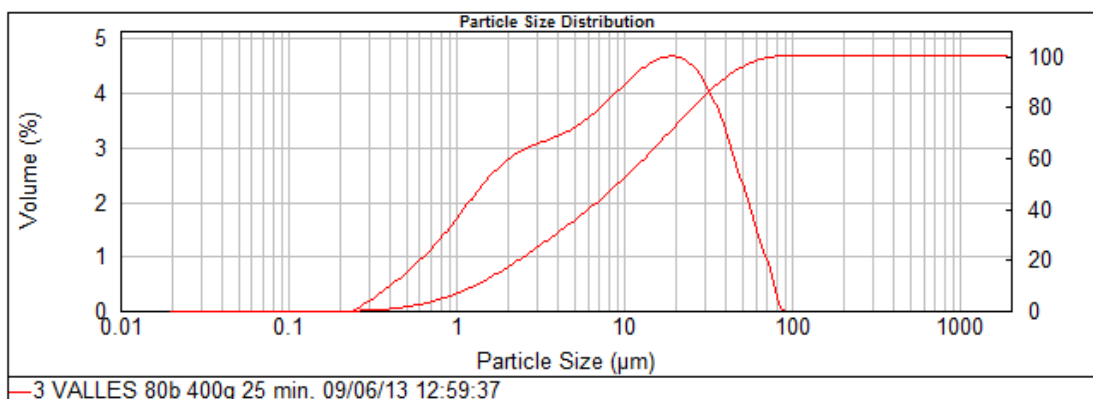


Figura C-5.1.1-6 Granulometría 3 Valles molido 25 minutos

Concentration:	0.0044 %Vol	Vol. Weighted Mean D[4,3]:	13.055 um	Specific Surface Area:	1.85 m ² /g
Span :	3.816	Uniformity:	1.19	Surface Weighted Mean D[3,2]:	3.244 um
Result units:	Volume	Particle density :	1.000 g/cm ³		
d(0.1):	1.226 um	d(0.5):	8.213 um	d(0.9):	32.569 um

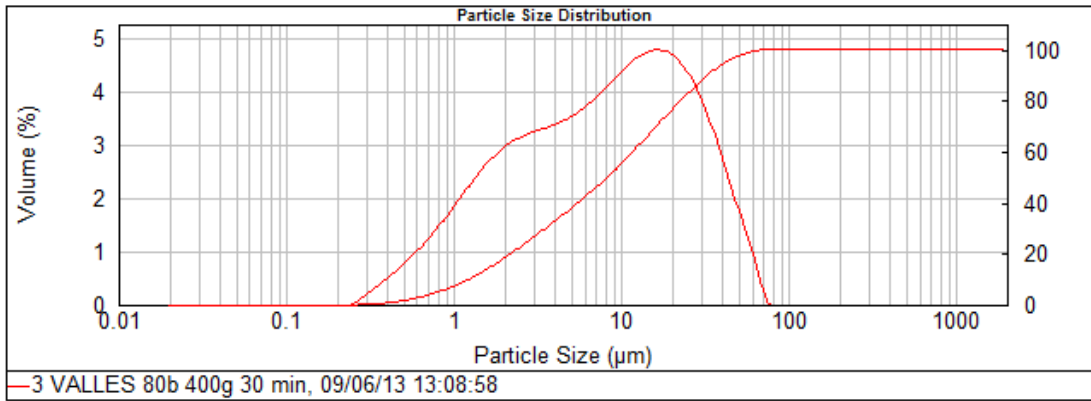


Figura C-5.1.1-7 Granulometría 3 Valles molido 30 minutos

Concentration:	0.0037 %Vol	Vol. Weighted Mean D[4,3]:	11.612 um	Specific Surface Area:	2.13 m ² /g
Span :	4.118	Uniformity:	1.29	Surface Weighted Mean D[3,2]:	2.819 um
Result units:	Volume	Particle density :	1.000 g/cm ³		
d(0.1):	1.051 um	d(0.5):	6.888 um	d(0.9):	29.417 um

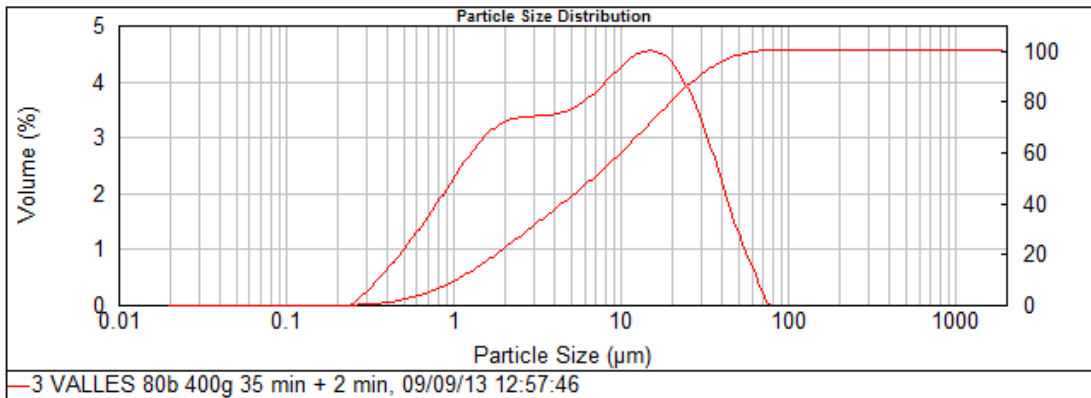


Figura C-5.1.1-8 Granulometría 3 Valles molido 35 minutos

Concentration:	0.0037 %Vol	Vol. Weighted Mean D[4,3]:	10.728 um	Specific Surface Area:	2.25 m ² /g
Span :	4.265	Uniformity:	1.34	Surface Weighted Mean D[3,2]:	2.672 um
Result units:	Volume	Particle density :	1.000 g/cm ³		
d(0.1):	1.007 um	d(0.5):	6.145 um	d(0.9):	27.210 um

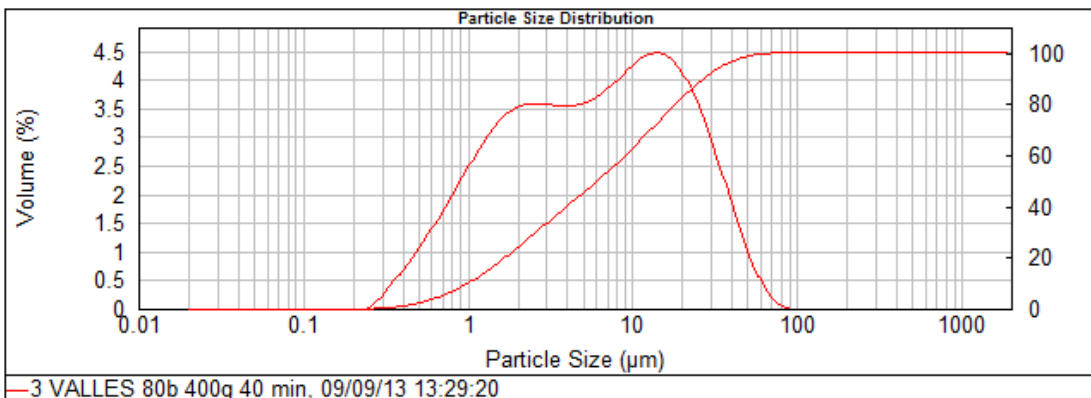


Figura C-5.1.1-9 Granulometría 3 Valles molido 40 minutos

Concentration: 0.0035 %Vol Vol. Weighted Mean D[4,3]: 10.004 um Specific Surface Area: 2.35 m²/g
 Span : 4.269 Uniformity: 1.34 Surface Weighted Mean D[3,2]: 2.555 um
 Result units: Volume Particle density : 1.000 g/cm³
 d(0.1): 0.967 um d(0.5): 5.712 um d(0.9): 25.351 um

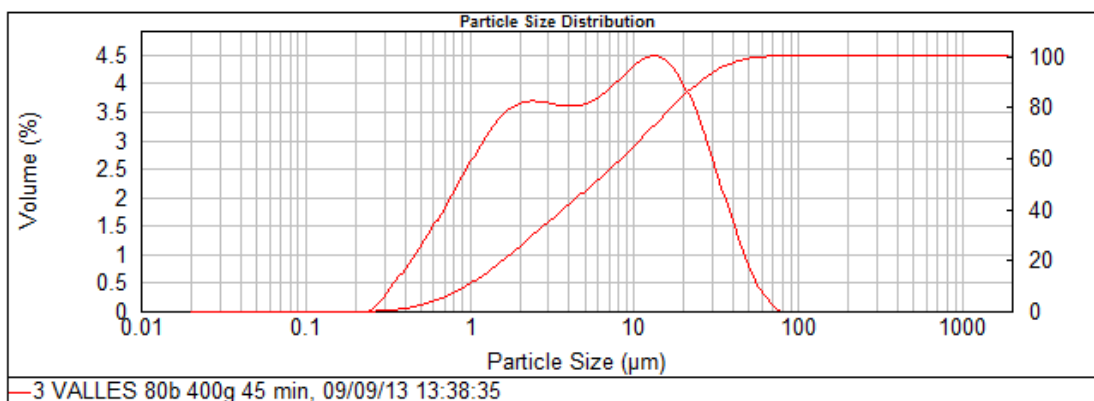


Figura C-5.1.1-10 Granulometría 3 Valles molido 45 minutos

Concentration: 0.0035 %Vol Vol. Weighted Mean D[4,3]: 9.405 um Specific Surface Area: 2.43 m²/g
 Span : 4.313 Uniformity: 1.35 Surface Weighted Mean D[3,2]: 2.464 um
 Result units: Volume Particle density : 1.000 g/cm³
 d(0.1): 0.939 um d(0.5): 5.319 um d(0.9): 23.877 um

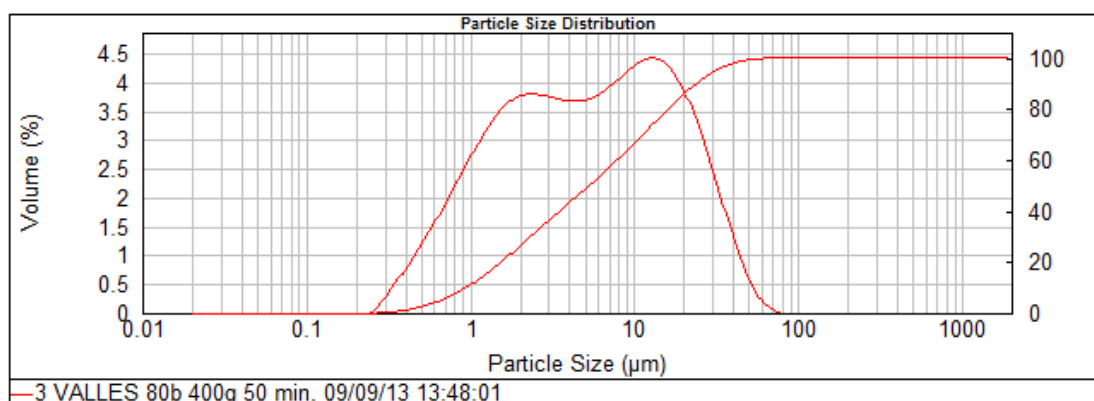


Figura C-5.1.1-11 Granulometría 3 Valles molido 50 minutos

Concentration: 0.0037 %Vol Vol. Weighted Mean D[4,3]: 8.502 um Specific Surface Area: 2.46 m²/g
 Span : 4.040 Uniformity: 1.32 Surface Weighted Mean D[3,2]: 2.436 um
 Result units: Volume Particle density : 1.000 g/cm³
 d(0.1): 0.956 um d(0.5): 4.851 um d(0.9): 20.555 um

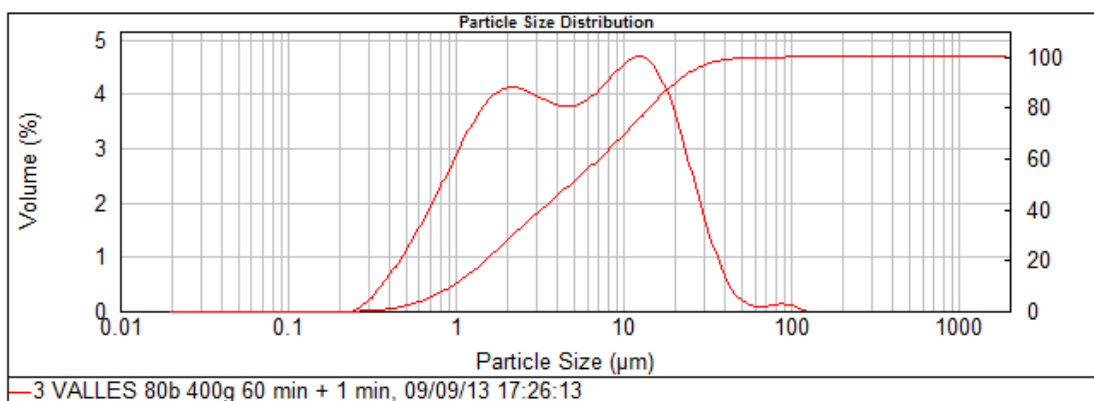


Figura C-5.1.1-12 Granulometría 3 Valles molido 60 minutos

ANEJO 5.2.1 pH Y CONDUCTIVIDAD

En este anejo se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de pH y conductividad.

A. Resultados de pH

TIEMPO (horas)	PROPORCIÓN					
	0 / 10	1 / 9	2 / 8	3 / 7	4 / 6	5 / 5
0	8.44	11.52	11.68	11.68	11.65	11.66
4	8.41	11.49	11.58	11.59	11.59	11.62
8	8.40	11.47	11.51	11.52	11.55	11.58
24	8.35	11.46	11.48	11.49	11.48	11.51
48	8.28	11.38	11.41	11.43	11.44	11.46
72	7.96	11.02	11.12	11.27	11.44	11.44
96	8.32	10.84	10.89	11.07	11.39	11.42
120	7.95	10.81	10.85	11.06	11.39	11.41
144	8.34	10.68	10.80	11.00	11.29	11.36
168	8.17	10.53	10.68	10.96	11.29	11.37

Tabla A-5.2.1-1 Lecturas de pH SPS

TIEMPO (horas)	PROPORCIÓN					
	0 / 10	1 / 9	2 / 8	3 / 7	4 / 6	5 / 5
0	0.000003	0.003311	0.004786	0.004786	0.004467	0.004571
4	0.000003	0.003090	0.003802	0.003890	0.003890	0.004169
8	0.000003	0.002951	0.003236	0.003311	0.003548	0.003802
24	0.000002	0.002884	0.003020	0.003090	0.003020	0.003236
48	0.000002	0.002399	0.002570	0.002692	0.002754	0.002884
72	0.000001	0.001047	0.001318	0.001862	0.002754	0.002754
96	0.000002	0.000692	0.000776	0.001175	0.002455	0.002630
120	0.000001	0.000646	0.000708	0.001148	0.002455	0.002570
144	0.000002	0.000479	0.000631	0.001000	0.001950	0.002291
168	0.000001	0.000339	0.000479	0.000912	0.001950	0.002344

Tabla A-5.2.1-2 Concentración de iones [OH] SPS

TIEMPO (horas)	PROPORCIÓN					
	0 / 10	1 / 9	2 / 8	3 / 7	4 / 6	5 / 5
0	9.61	11.64	11.71	11.67	11.67	11.71
4	9.61	11.44	11.61	11.59	11.58	11.61
8	9.58	11.34	11.54	11.57	11.53	11.59
24	9.47	11.22	11.47	11.51	11.48	11.53
48	9.19	10.77	10.98	11.46	11.46	11.49
72	9.15	10.70	11.05	11.41	11.42	11.47
96	9.22	10.60	10.99	11.28	11.41	11.45
120	9.19	10.58	10.92	11.15	11.36	11.41
144	9.04	10.41	10.89	11.13	11.26	11.37
168	9.04	10.48	10.89	11.09	11.24	11.31

Tabla A-5.2.1-3 Lecturas de pH Choluteca

TIEMPO (horas)	PROPORCIÓN					
	0 / 10	1 / 9	2 / 8	3 / 7	4 / 6	5 / 5
0	0.00004	0.00437	0.00513	0.00468	0.00468	0.00513
4	0.00004	0.00275	0.00407	0.00389	0.00380	0.00407
8	0.00004	0.00219	0.00347	0.00372	0.00339	0.00389
24	0.00003	0.00166	0.00295	0.00324	0.00302	0.00339
48	0.00002	0.00059	0.00095	0.00288	0.00288	0.00309
72	0.00001	0.00050	0.00112	0.00257	0.00263	0.00295
96	0.00002	0.00040	0.00098	0.00191	0.00257	0.00282
120	0.00002	0.00038	0.00083	0.00141	0.00229	0.00257
144	0.00001	0.00026	0.00078	0.00135	0.00182	0.00234
168	0.00001	0.00030	0.00078	0.00123	0.00174	0.00204

Tabla A-5.2.1-4 Concentración de iones [OH] Choluteca

B. Resultados de Conductividad

TIEMPO (horas)	PROPORCIÓN					
	0 / 10	1 / 9	2 / 8	3 / 7	4 / 6	5 / 5
0	0.24	10.13	10.46	10.51	10.60	10.65
4	0.28	8.56	9.37	9.47	9.56	9.68
8	0.31	8.16	8.80	9.15	9.33	9.48
24	0.35	7.67	8.12	8.22	8.35	8.60
48	0.38	6.40	7.30	7.29	7.64	7.91
72	0.39	2.47	3.60	6.00	7.55	7.80
96	0.40	1.73	2.27	3.76	7.54	7.68
120	0.42	1.43	1.86	3.00	7.47	7.67
144	0.41	1.27	1.58	2.57	7.31	7.89
168	0.42	1.02	1.47	2.47	6.37	7.68

Tabla B-5.2.1-1 Lecturas Conductividad SPS (m^{-1})

TIEMPO (horas)	PROPORCIÓN				
	1 / 9	2 / 8	3 / 7	4 / 6	5 / 5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	15.47	10.39	9.87	9.78	9.08
8	19.42	15.84	12.91	11.95	10.96
24	24.30	24.49	21.81	21.25	19.27
48	36.87	30.26	30.69	27.97	25.77
72	75.58	65.54	42.87	28.74	26.72
96	82.97	78.35	64.27	28.92	27.93
120	85.89	82.23	71.47	29.54	27.99
144	87.49	84.91	75.59	31.08	25.96
168	89.94	85.96	76.55	39.95	27.93

Tabla B-5.2.1-2 Pérdida de Conductividad SPS (%)

TIEMPO (horas)	PROPORCIÓN					
	0 / 10	1 / 9	2 / 8	3 / 7	4 / 6	5 / 5
0	0.36	9.93	10.40	10.50	10.54	10.57
4	0.41	9.01	9.13	9.12	9.13	9.21
8	0.46	8.40	8.43	8.63	8.84	8.92
24	0.49	2.07	6.56	7.68	8.23	8.66
48	0.52	1.61	3.47	7.51	7.90	8.65
72	0.57	1.29	2.85	7.51	8.12	8.68
96	0.60	1.17	2.75	6.29	8.06	8.53
120	0.61	1.15	2.58	5.27	8.12	8.61
144	0.65	1.06	2.37	4.47	8.15	8.60
168	0.64	1.02	2.31	3.52	8.12	8.62

Tabla B-5.2.1-3 Lecturas Conductividad Choluteca (m^{-1})

TIEMPO (horas)	PROPORCIÓN				
	1 / 9	2 / 8	3 / 7	4 / 6	5 / 5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	9.26	12.21	13.14	13.38	12.87
8	15.42	18.95	17.82	16.14	15.62
24	79.13	36.90	26.84	21.90	18.05
48	83.79	66.63	28.48	25.05	18.16
72	86.98	72.64	28.52	23.01	17.93
96	88.20	73.52	40.06	23.49	19.26
120	88.43	75.24	49.86	23.01	18.59
144	89.38	77.26	57.48	22.72	18.68
168	89.76	77.79	66.48	22.96	18.45

Tabla B-5.2.1-4 Pérdida de Conductividad Choluteca (%)

ANEJO 5.2.4 PASTAS CAL/CENIZA Y CEMENTO/CENIZA

En este anejo se muestran los termogramas resultado de los análisis termogravimétricos que se realizaron a las pastas de cal/ceniza y cemento/ceniza.

A. Pasta Control

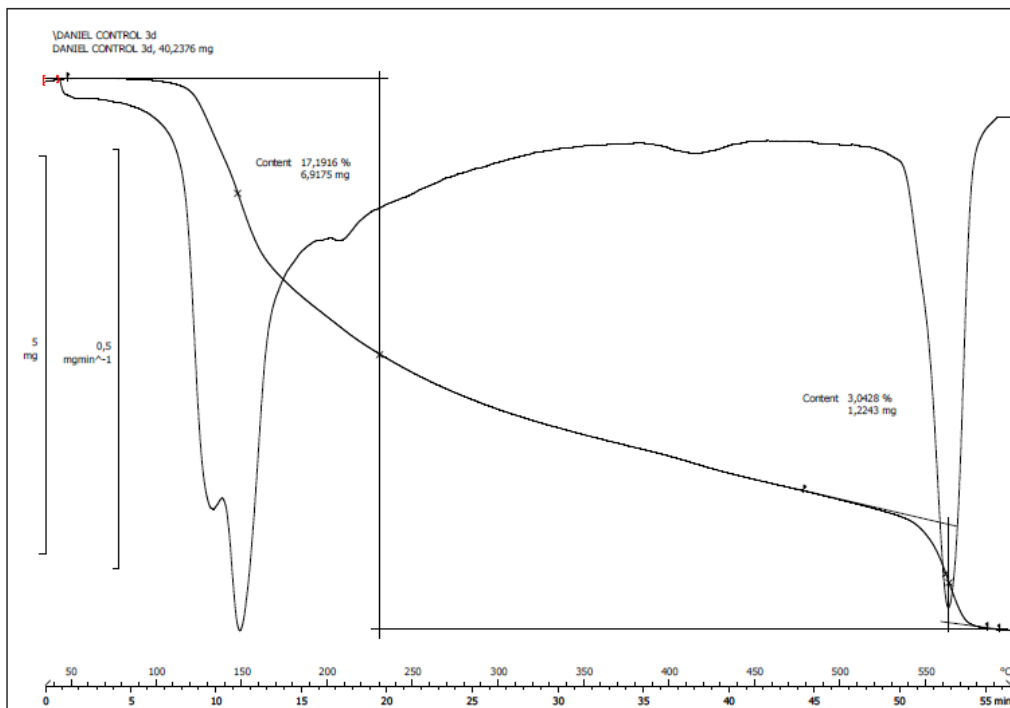


Figura A-5.2.4-1 Curva TG Pasta Control 3 días

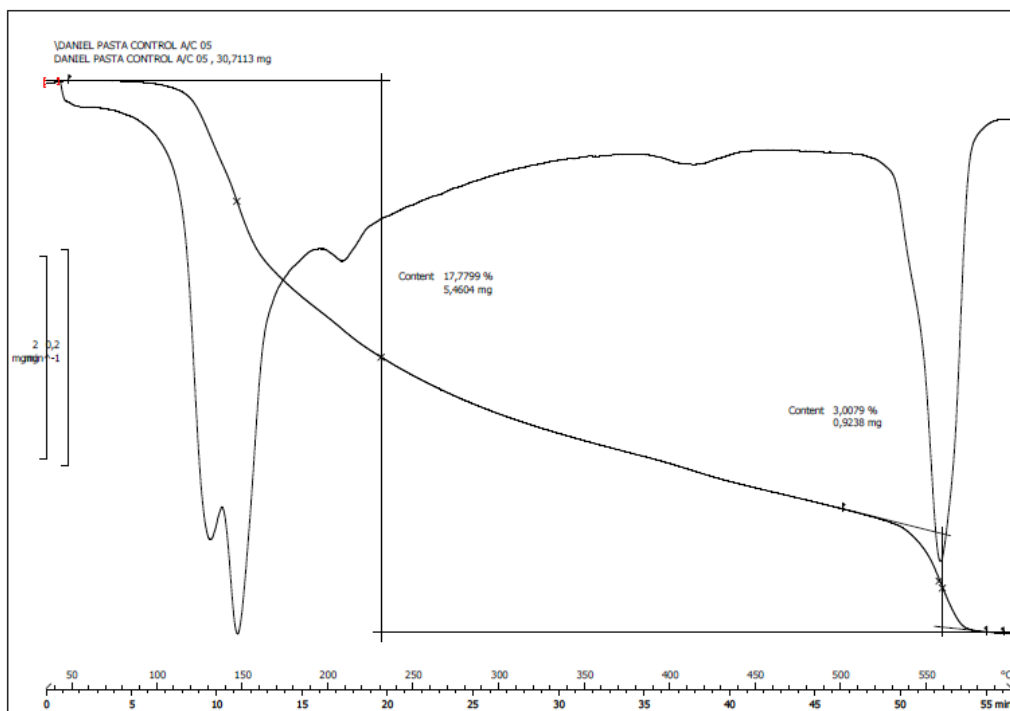


Figura A-5.2.4-2 Curva TG Pasta Control 7 días

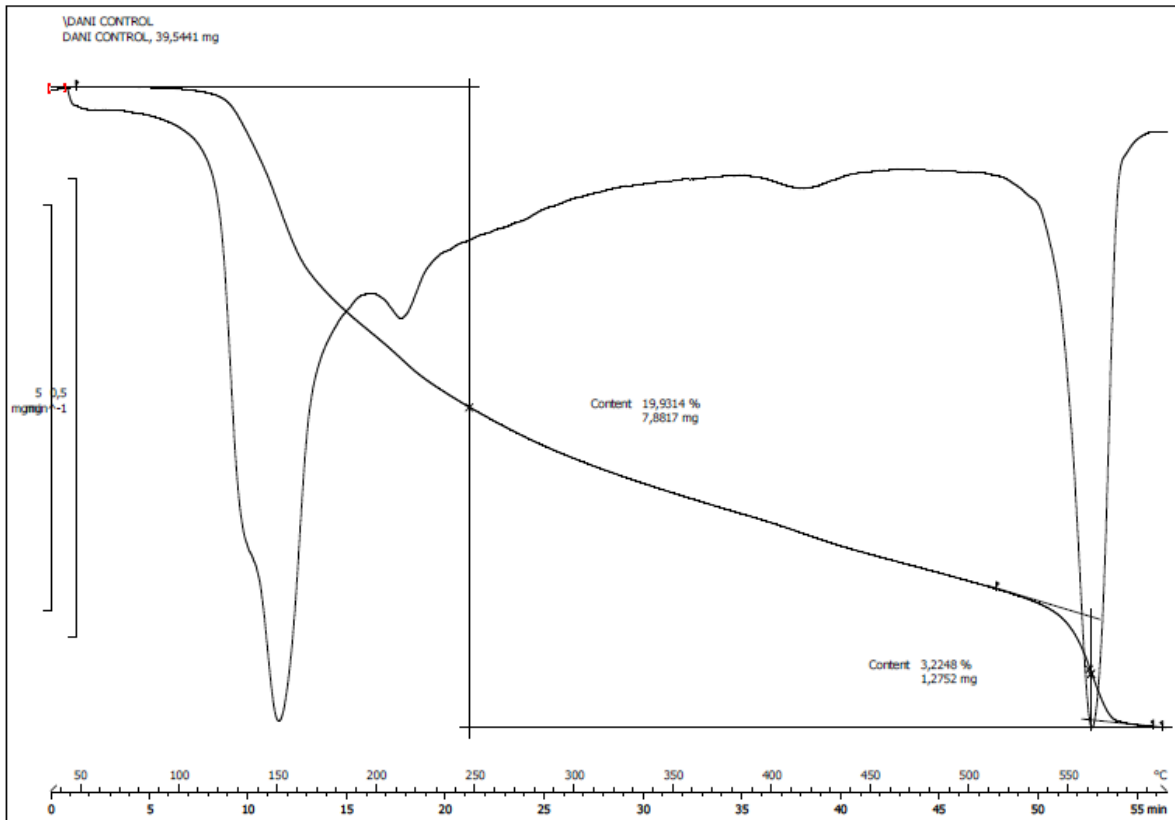


Figura A-5.2.4-3 Curva TG Pasta Control 28 días

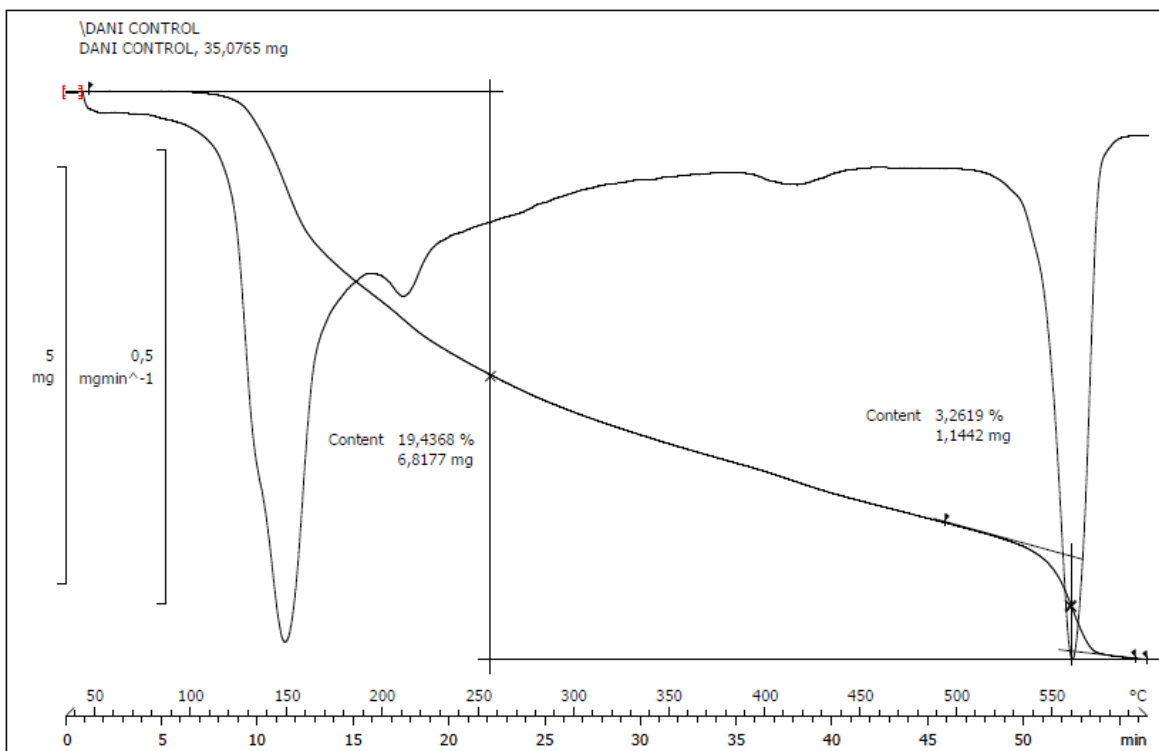


Figura A-5.2.4-4 Curva TG Pasta Control 45 días

B. Pasta Cemento / Ceniza San Pedro Sula

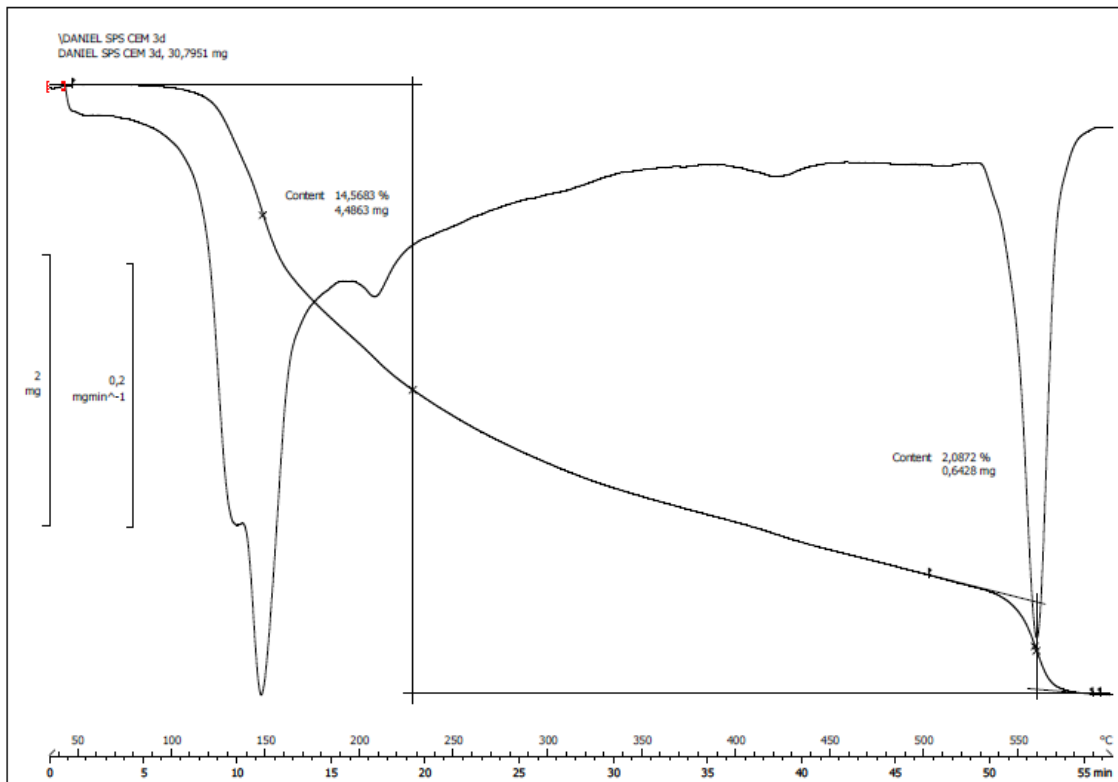


Figura B-5.2.4-1 Curva TG Pasta Cemento/Ceniza SPS 3 días

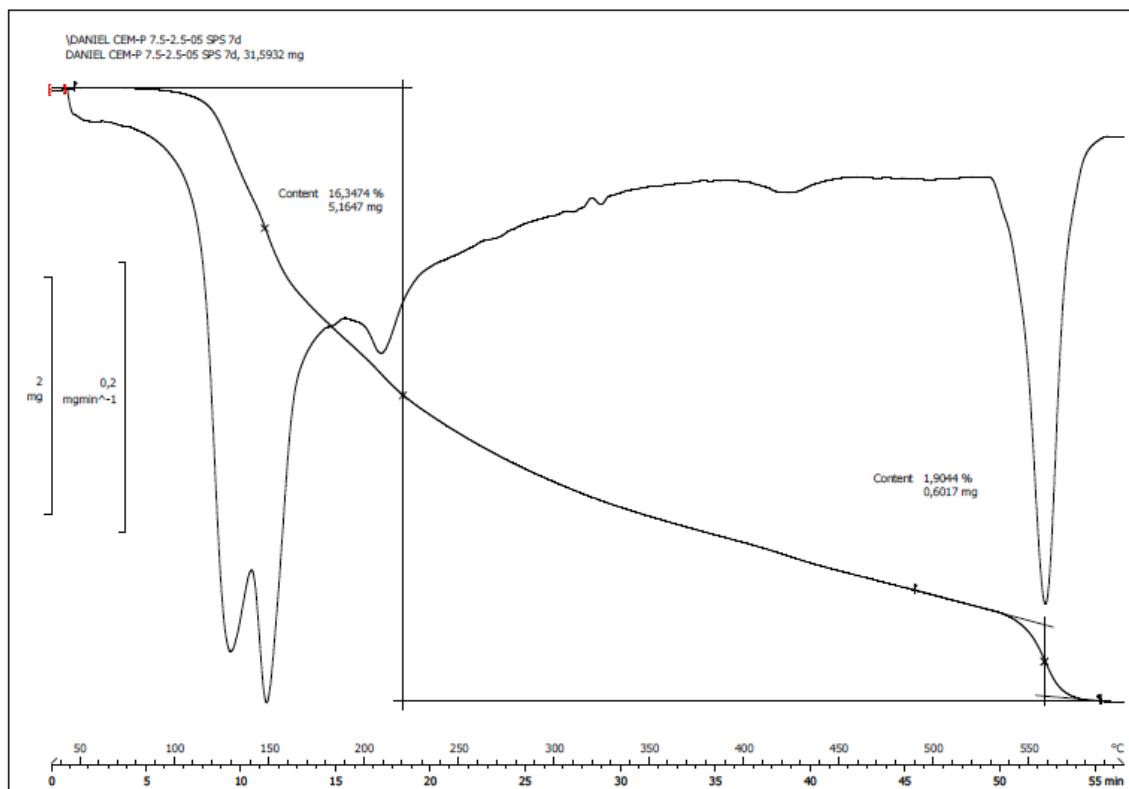


Figura B-5.2.4-2 Curva TG Pasta Cemento/Ceniza SPS 7 días

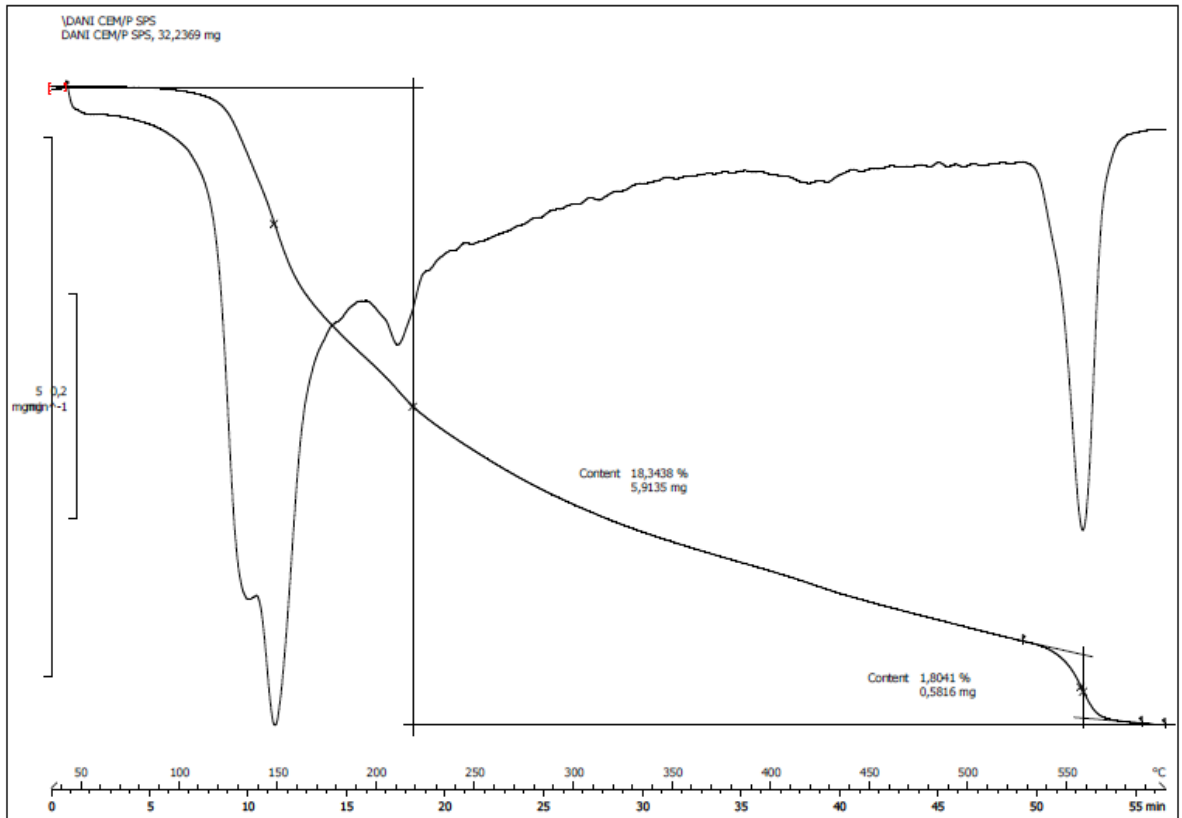


Figura B-5.2.4-3 Curva TG Pasta Cemento/Ceniza SPS 28 días

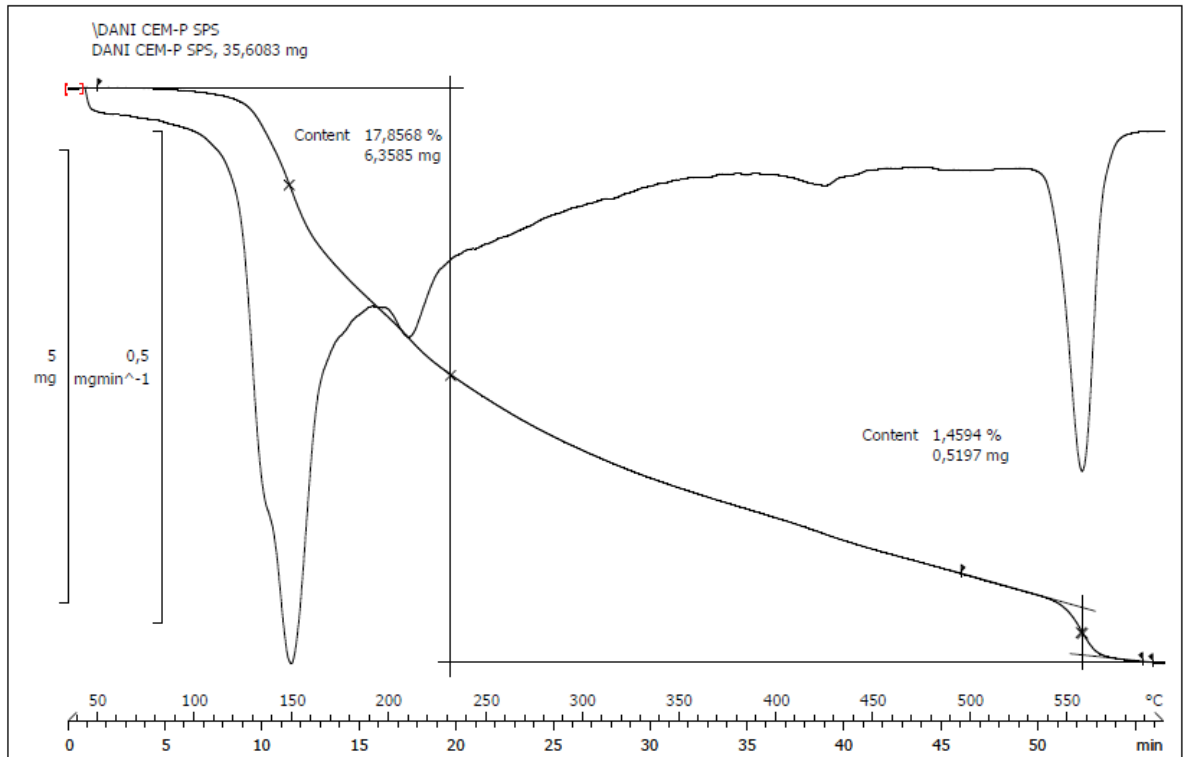


Figura B-5.2.4-4 Curva TG Pasta Cemento/Ceniza SPS 45 días

C. Pasta Cemento / Ceniza Choluteca

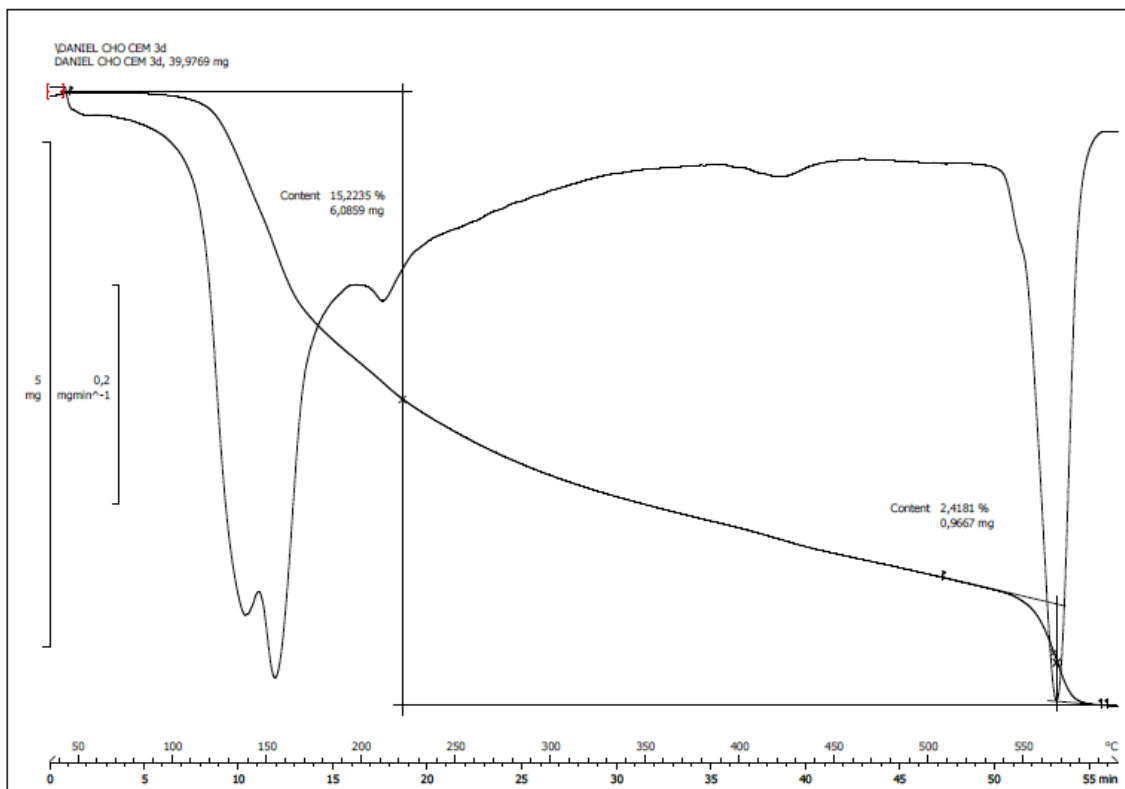


Figura C-5.2.4-1 Curva TG Pasta Cemento/Ceniza Choluteca 3 días

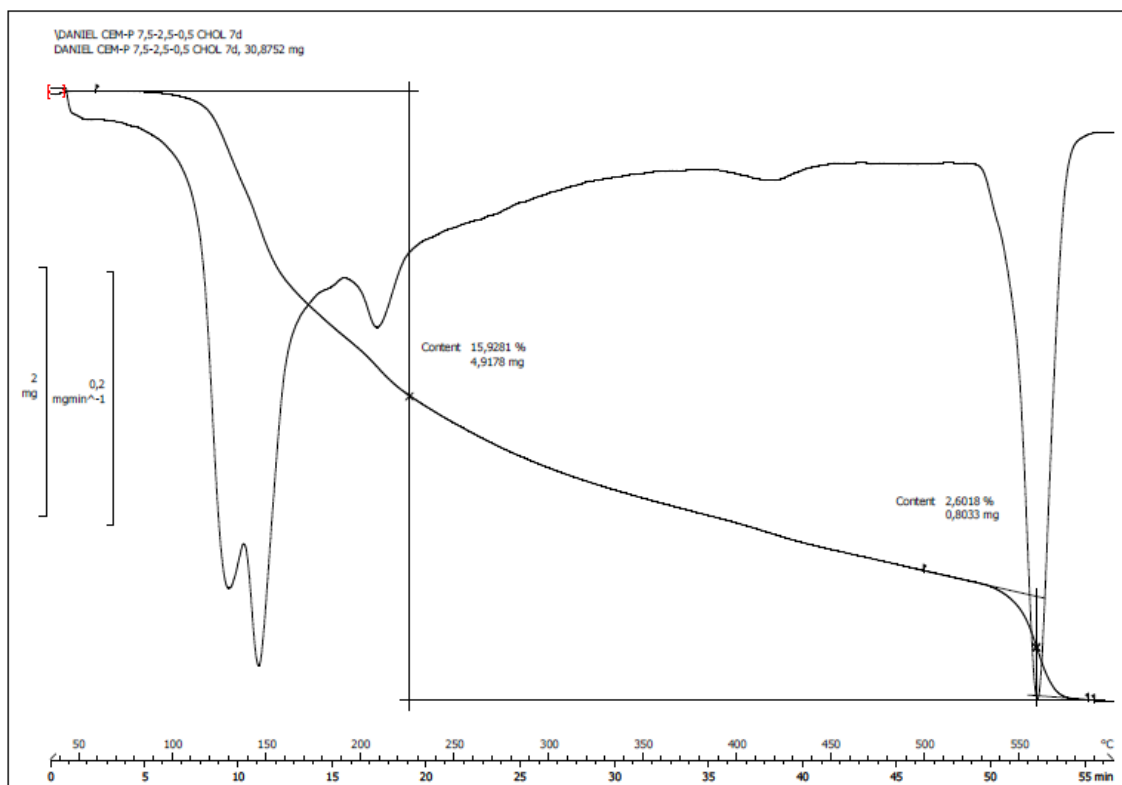


Figura C-5.2.4-2 Curva TG Pasta Cemento/Ceniza Choluteca 7 días

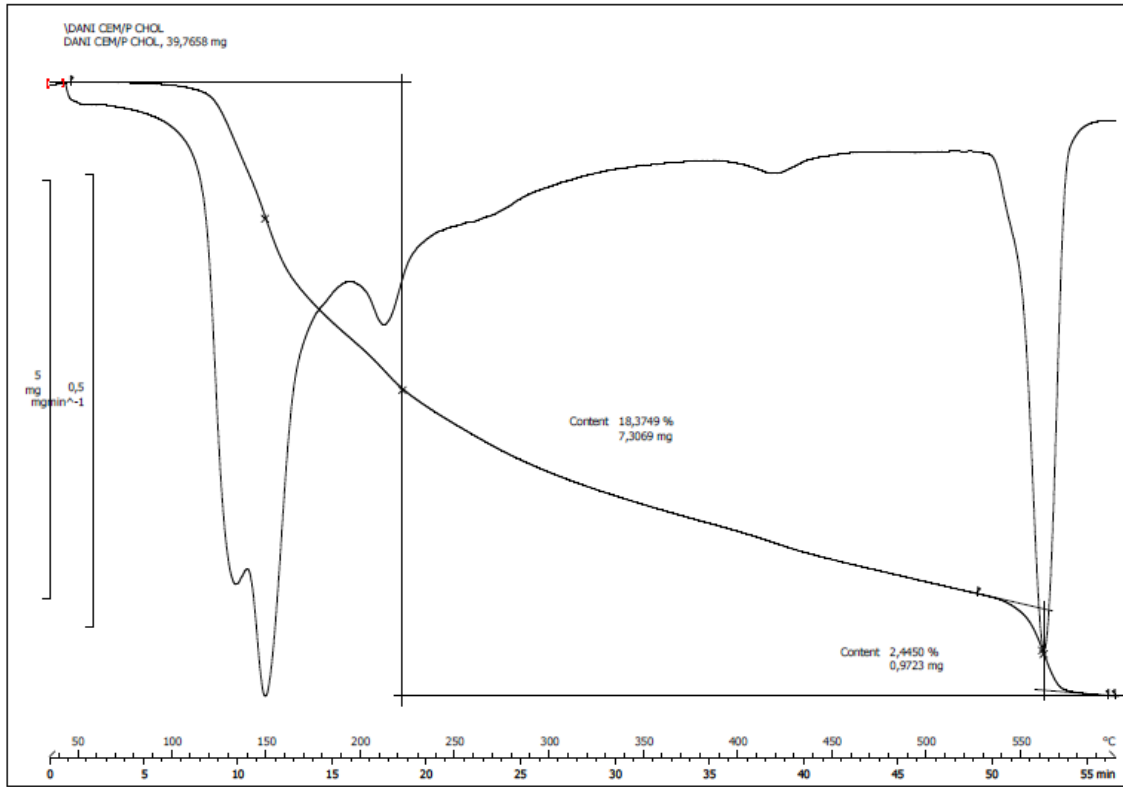


Figura C-5.2.4-3 Curva TG Pasta Cemento/Ceniza Choluteca 28 días

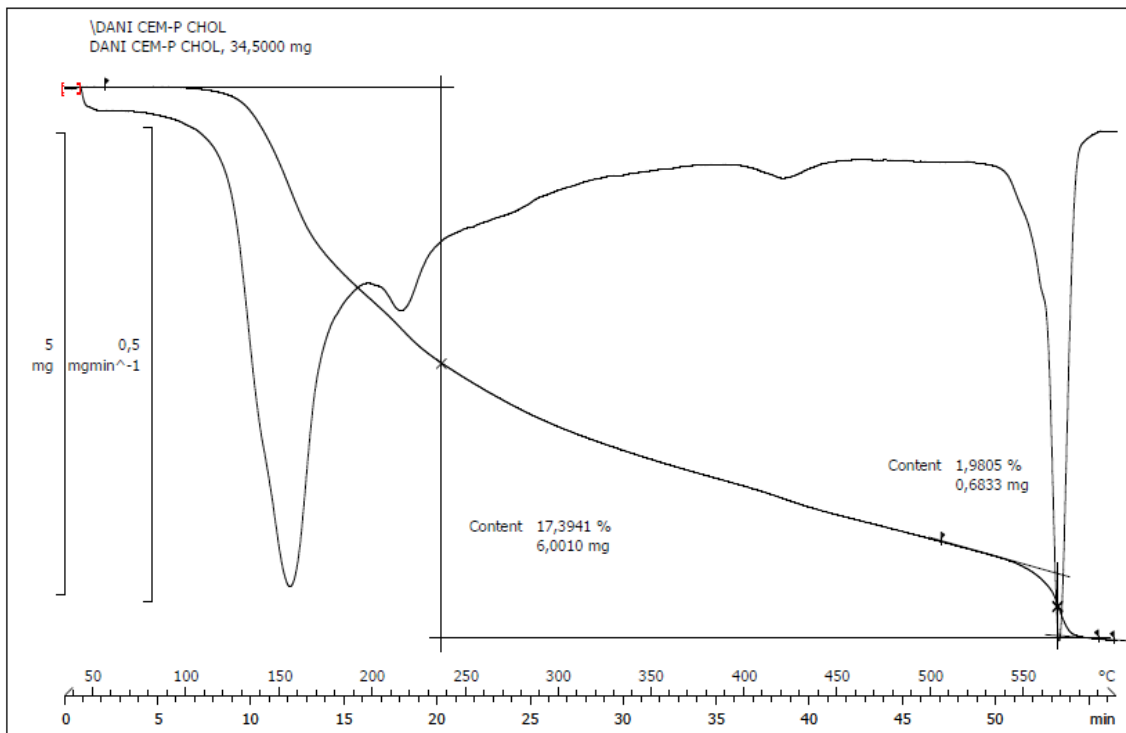


Figura C-5.2.4-4 Curva TG Pasta Cemento/Ceniza Choluteca 45 días

D. Pasta Cal / Ceniza San Pedro Sula

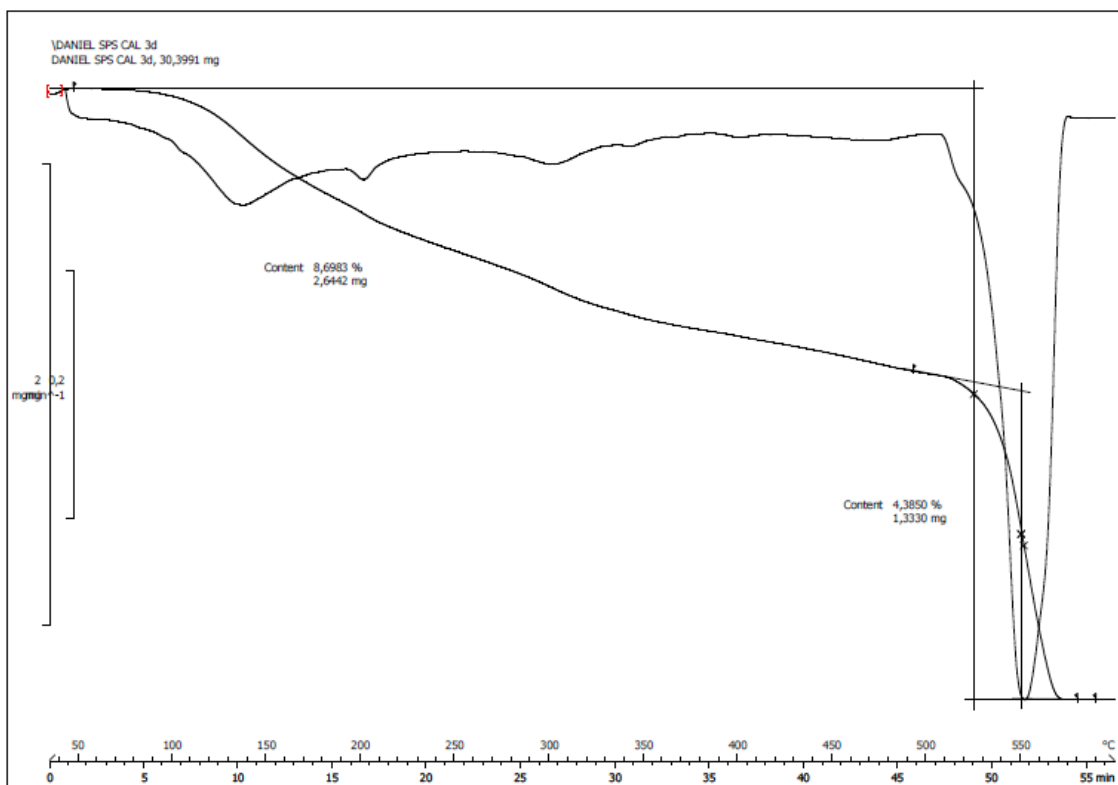


Figura D-5.2.4-1 Curva TG Pasta Cal/Ceniza SPS 3 días

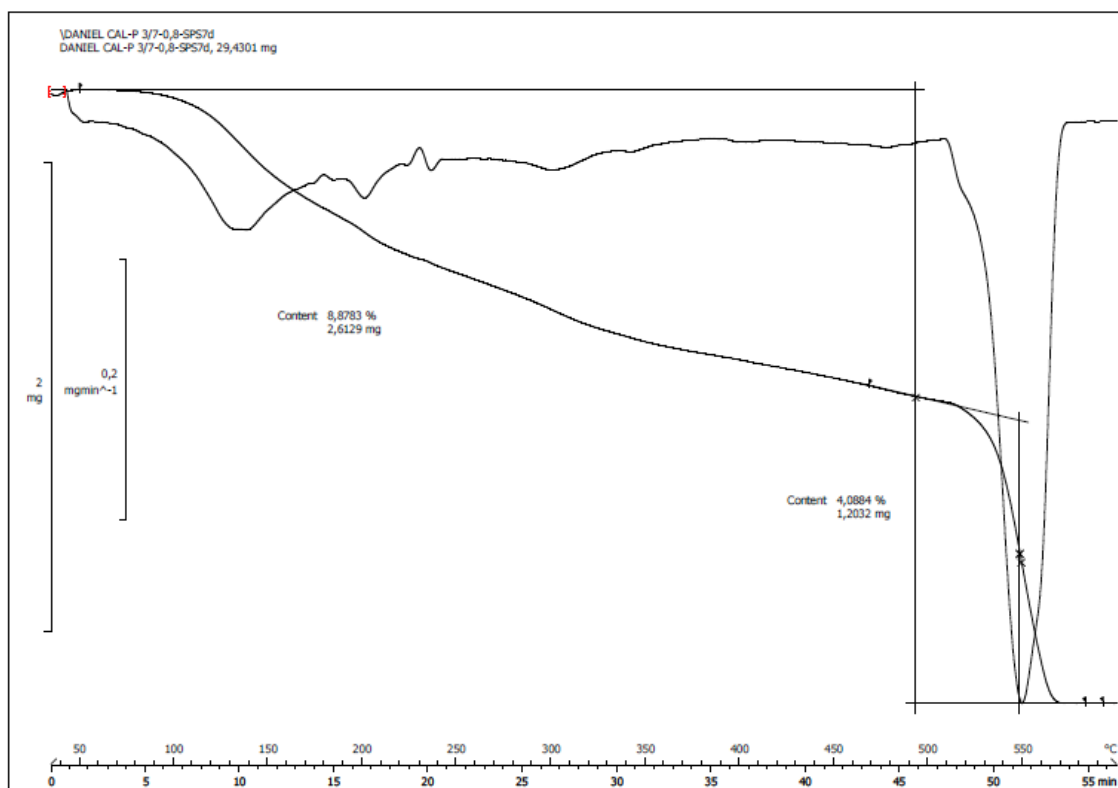


Figura D-5.2.4-2 Curva TG Pasta Cal/Ceniza SPS 7 días

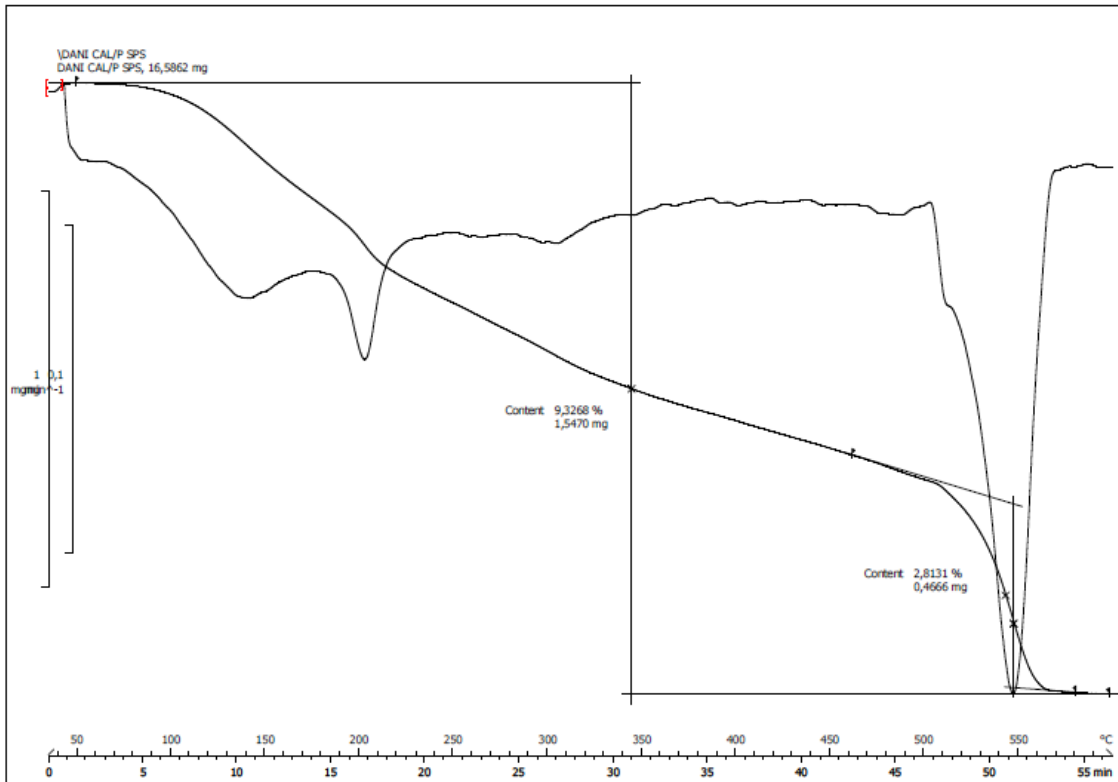


Figura D-5.2.4-3 Curva TG Pasta Cal/Ceniza SPS 28 días

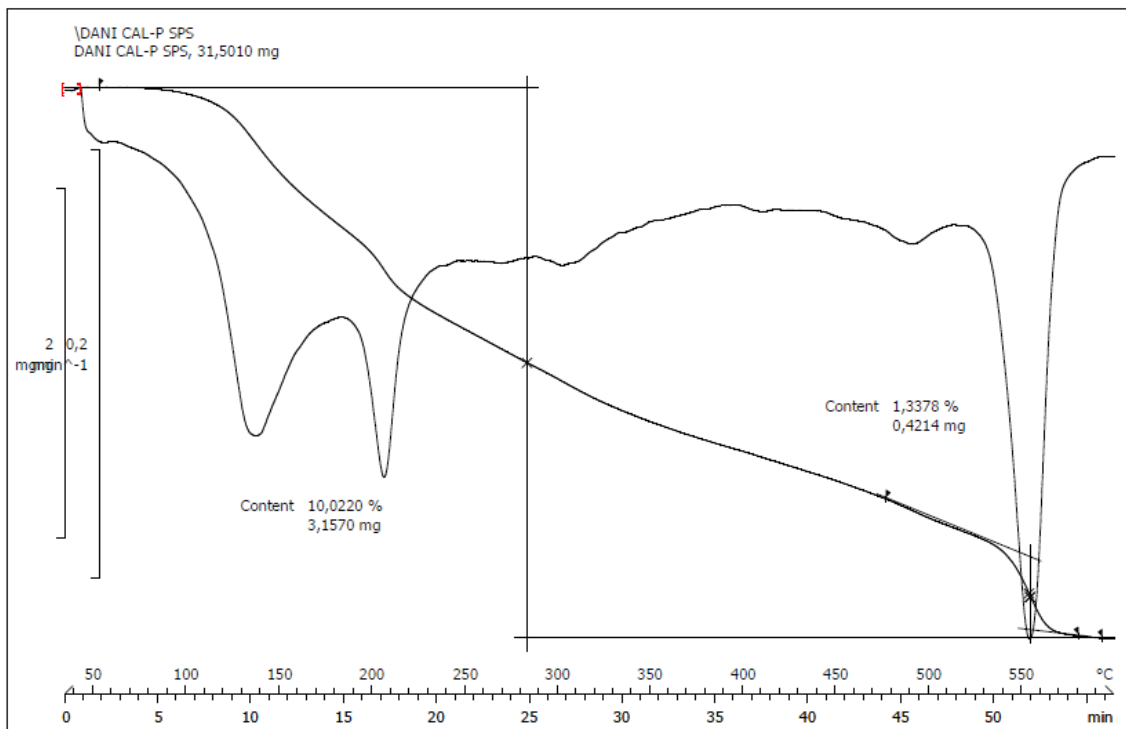


Figura D-5.2.4-4 Curva TG Pasta Cal/Ceniza SPS 45 días

E. Pasta Cal / Ceniza Choluteca

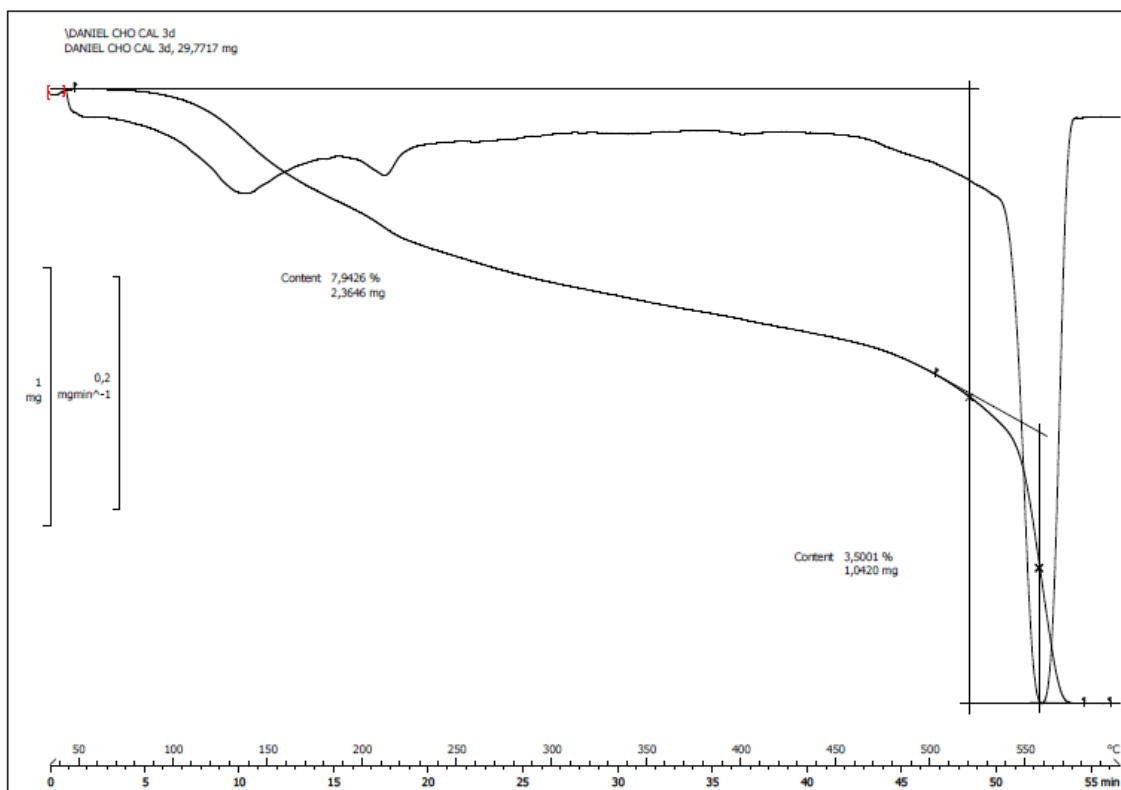


Figura E-5.2.4-1 Curva TG Pasta Cal/Ceniza Choluteca 3 días

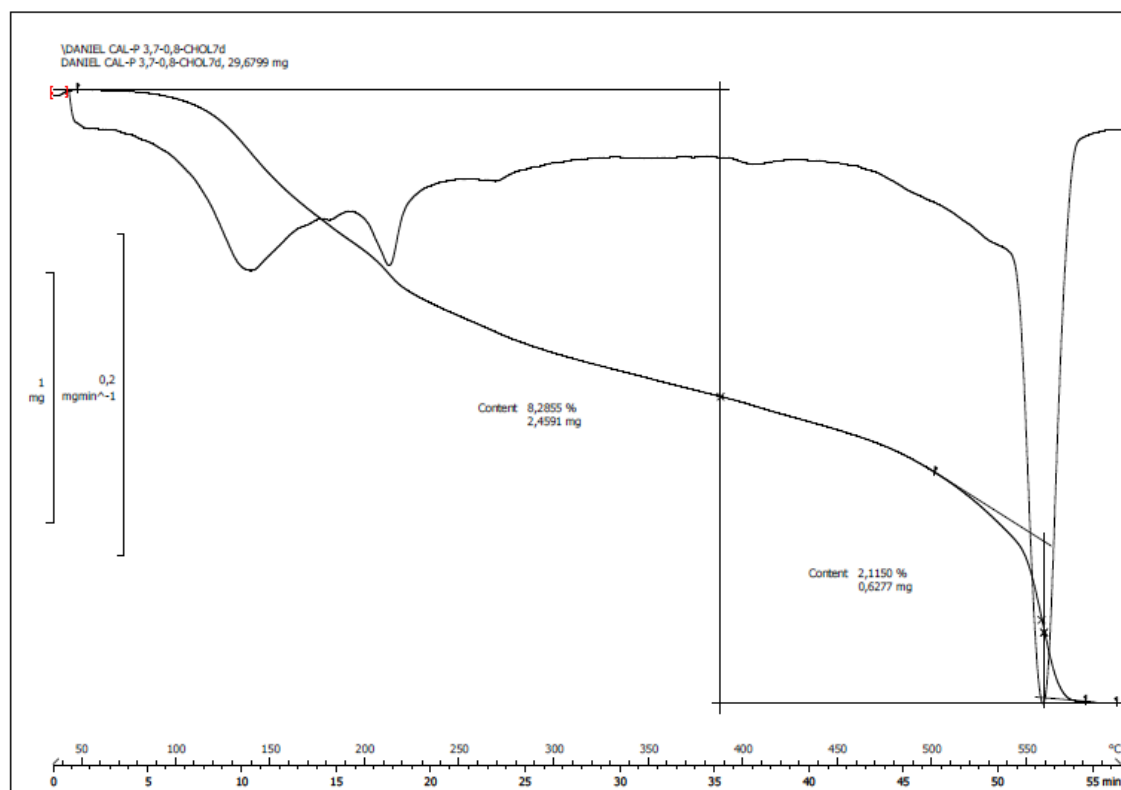


Figura E-5.2.4-2 Curva TG Pasta Cal/Ceniza Choluteca 7 días

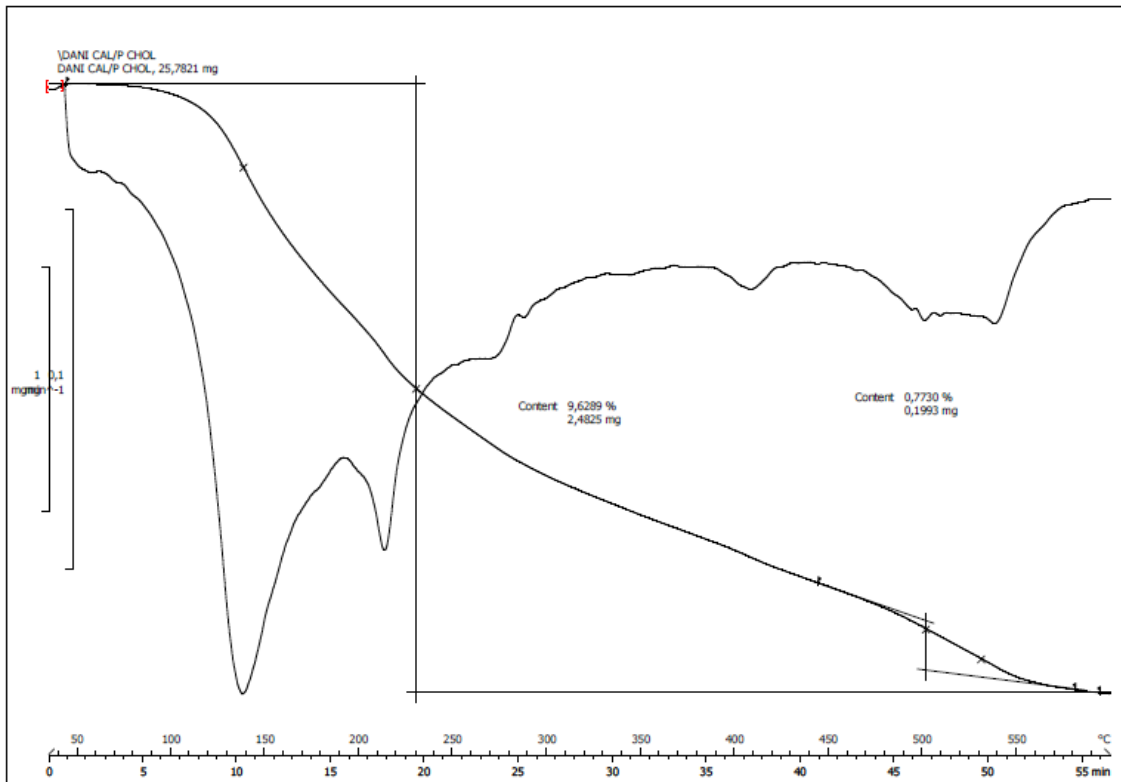


Figura E-5.2.4-3 Curva TG Pasta Cal/Ceniza Choluteca 28 días

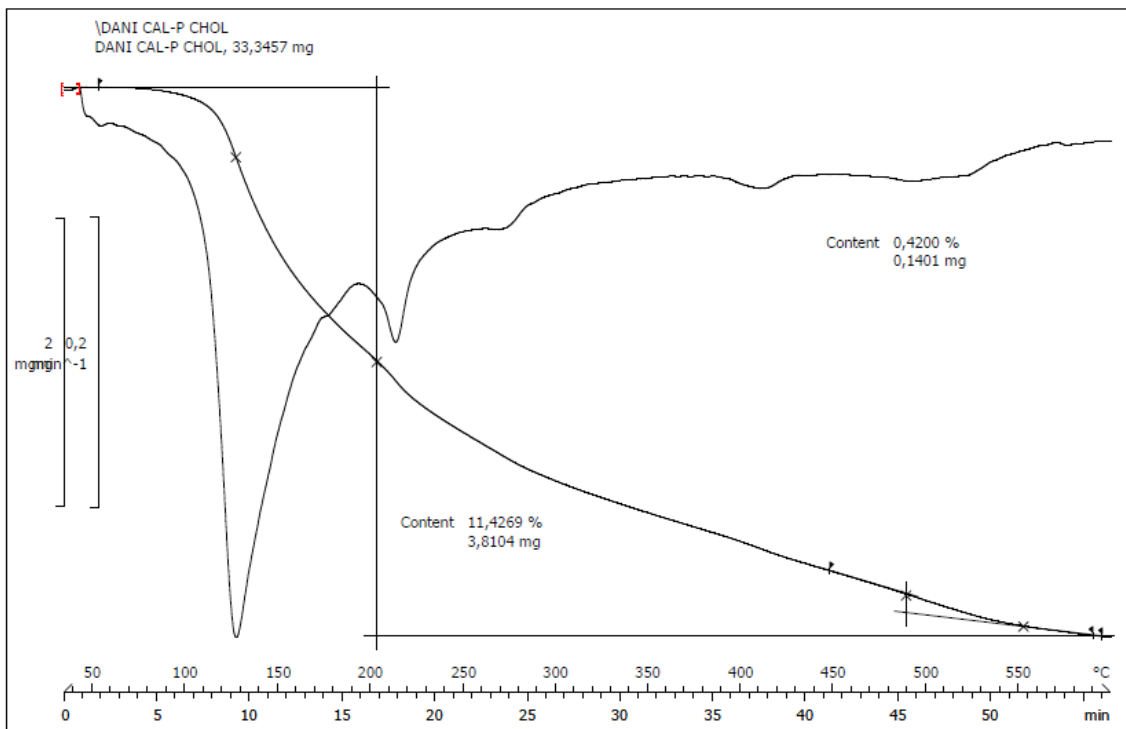


Figura E-5.2.4-4 Curva TG Pasta Cal/Ceniza Choluteca 45 días

ANEJO 5.3.2 RESISTENCIA MECÁNICA

En este anejo se presentan las tablas con los resultados de los ensayos de compresión de las probetas de mortero.

A. Resistencia a compresión de probetas control curadas a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	3	40°C	6425	39.35
2	3	40°C	6500	39.81
3	3	40°C	6650	40.73
4	3	40°C	6475	39.66
5	3	40°C	6500	39.81
6	3	40°C	6050	37.06

Promedio **39.40**

Desv. Est. **1.239**

% fcm **75.06**

Tabla A-5.3.2-1 Resistencia control 3 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	7	40°C	7075	43.33
2	7	40°C	7550	46.24
3	7	40°C	6775	41.50
4	7	40°C	7425	45.48
5	7	40°C	7100	43.49
6	7	40°C	6925	42.42

Promedio **43.74**

Desv. Est. **1.806**

% fcm **83.32**

Tabla A-5.3.2-2 Resistencia control 7 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	14	40°C	7525	46.09
2	14	40°C	7300	44.71
3	14	40°C	7425	45.48
4	14	40°C	7525	46.09
5	14	40°C	7675	47.01
6	14	40°C	7625	46.70

Promedio **46.01**

Desv. Est. **0.832**

% fcm **87.65**

Tabla A-5.3.2-3 Resistencia control 14 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	28	40°C	8075	49.46
2	28	40°C	8475	51.91
3	28	40°C	8525	52.22
4	28	40°C	8050	49.31
5	28	40°C	8400	51.45
6	28	40°C	8475	51.91

Promedio **51.04**

Desv. Est. **1.309**

% fcm **97.22**

Tabla A-5.3.2-4 Resistencia control 28 días curado a 40°C

B. Resistencia a compresión de probetas con ceniza de Cholteca curadas a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	3	40°C	5925	36.29
2	3	40°C	6675	40.88
3	3	40°C	6075	37.21
4	3	40°C	6275	38.43
5	3	40°C	5850	35.83
6	3	40°C	6375	39.05

Promedio **37.95**

Desv. Est. **1.889**

% fcm **72.28**

Tabla B-5.3.2-1 Resistencia Cholteca 3 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	7	40°C	7400	45.33
2	7	40°C	7825	47.93
3	7	40°C	7225	44.25
4	7	40°C	7025	43.03
5	7	40°C	7425	45.48
6	7	40°C	7525	46.09

Promedio **45.35**

Desv. Est. **1.662**

% fcm **86.38**

Tabla B-5.3.2-2 Resistencia Choluteca 7 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	14	40°C	8250	50.53
2	14	40°C	8100	49.61
3	14	40°C	8400	51.45
4	14	40°C	8300	50.84
5	14	40°C	8500	52.06
6	14	40°C	8200	50.23

Promedio **50.79**

Desv. Est. **0.875**

% fcm **96.73**

Tabla B-5.3.2-3 Resistencia Choluteca 14 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	28	40°C	8900	54.51
2	28	40°C	8850	54.21
3	28	40°C	9100	55.74
4	28	40°C	9000	55.13
5	28	40°C	9275	56.81
6	28	40°C	9400	57.58

Promedio **55.66**

Desv. Est. **1.320**

% fcm **106.02**

Tabla B-5.3.2-4 Resistencia Choluteca 28 días curado a 40°C

C. Resistencia a compresión de probetas con ceniza de San Pedro Sula curadas a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	3	40°C	6875	42.11
2	3	40°C	6775	41.50
3	3	40°C	6300	38.59
4	3	40°C	6400	39.20
5	3	40°C	6800	41.65
6	3	40°C	6850	41.96

Promedio 40.83

Desv. Est. 1.530

% fcm 77.77

Tabla C-5.3.2-1 Resistencia SPS 3 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	7	40°C	8350	51.14
2	7	40°C	8225	50.38
3	7	40°C	8175	50.07
4	7	40°C	8500	52.06
5	7	40°C	8325	50.99
6	7	40°C	8475	51.91

Promedio 51.09

Desv. Est. 0.797

% fcm 97.31

Tabla C-5.3.2-2 Resistencia SPS 7 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	14	40°C	8600	52.68
2	14	40°C	8650	52.98
3	14	40°C	8900	54.51
4	14	40°C	9000	55.13
5	14	40°C	8900	54.51
6	14	40°C	9025	55.28

Promedio 54.18

Desv. Est. 1.097

% fcm 103.20

Tabla C-5.3.2-3 Resistencia SPS 14 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	28	40°C	9600	58.80
2	28	40°C	9550	58.49
3	28	40°C	9550	58.49
4	28	40°C	9900	60.64
5	28	40°C	9100	55.74
6	28	40°C	9600	58.80

Promedio **58.49**

Desv. Est. **1.574**

% fcm **111.41**

Tabla C-5.3.2-4 Resistencia SPS 28 días curado a 40°C

D. Resistencia a compresión de probetas control curadas a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	7	20°C	6475	39.66
2	7	20°C	6475	39.66
3	7	20°C	6525	39.97
4	7	20°C	6575	40.27
5	7	20°C	6450	39.51
6	7	20°C	6375	39.05

Promedio **39.68**

Desv. Est. **0.42**

% fcm **75.59**

Tabla D-5.3.2-1 Resistencia control 7 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	28	20°C	7950	48.69
2	28	20°C	7750	47.47
3	28	20°C	8250	50.53
4	28	20°C	8075	49.46
5	28	20°C	8200	50.23
6	28	20°C	8050	49.31

Promedio **49.28**

Desv. Est. **1.11**

% fcm **93.87**

Tabla D-5.3.2-2 Resistencia control 28 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	60	20°C	8200	50.23
2	60	20°C	8350	51.14
3	60	20°C	8400	51.45
4	60	20°C	8600	52.68
5	60	20°C	8000	49.00
6	60	20°C	8450	51.76

Promedio **51.04**

Desv. Est. **1.28**

% fcm **97.22**

Tabla D-5.3.2-3 Resistencia control 60 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	90	20°C	8300	50.84
2	90	20°C	8550	52.37
3	90	20°C	8400	51.45
4	90	20°C	8525	52.22
5	90	20°C	8275	50.68
6	90	20°C	8250	50.53

Promedio **51.35**

Desv. Est. **0.80**

% fcm **97.81**

Tabla D-5.3.2-4 Resistencia control 90 días curado a 20°C

E. Resistencia a compresión de probetas con ceniza de Cholteca curadas a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	7	20°C	6675	40.88
2	7	20°C	6525	39.97
3	7	20°C	6225	38.13
4	7	20°C	6700	41.04
5	7	20°C	6650	40.73
6	7	20°C	6400	39.20

Promedio **39.99**

Desv. Est. **1.14**

% fcm **76.17**

Tabla E-5.3.2-1 Resistencia Cholteca 7 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	28	20°C	8775	53.75
2	28	20°C	8600	52.68
3	28	20°C	8500	52.06
4	28	20°C	8600	52.68
5	28	20°C	8500	52.06
6	28	20°C	8375	51.30

Promedio **52.42**

Desv. Est. **0.83**

% fcm **99.85**

Tabla E-5.3.2-2 Resistencia Choluteca 28 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	60	20°C	8700	53.29
2	60	20°C	9200	56.35
3	60	20°C	9100	55.74
4	60	20°C	8700	53.29
5	60	20°C	9100	55.74
6	60	20°C	8900	54.51

Promedio **54.82**

Desv. Est. **1.33**

% fcm **104.42**

Tabla E-5.3.2-3 Resistencia Choluteca 60 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	90	20°C	9350	57.27
2	90	20°C	9350	57.27
3	90	20°C	9200	56.35
4	90	20°C	9150	56.04
5	90	20°C	9525	58.34
6	90	20°C	9425	57.73

Promedio **57.17**

Desv. Est. **0.85**

% fcm **108.89**

Tabla E-5.3.2-4 Resistencia Choluteca 90 días curado a 20°C

F. Resistencia a compresión de probetas con ceniza de San Pedro Sula curadas a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	7	20°C	6700	41.04
2	7	20°C	6825	41.80
3	7	20°C	6500	39.81
4	7	20°C	6725	41.19
5	7	20°C	6925	42.42
6	7	20°C	6175	37.82

Promedio **40.68**

Desv. Est. **1.65**

% fcm **77.49**

Tabla F-5.3.2-1 Resistencia SPS 7 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	28	20°C	8600	52.68
2	28	20°C	8875	54.36
3	28	20°C	8700	53.29
4	28	20°C	8775	53.75
5	28	20°C	9000	55.13
6	28	20°C	9050	55.43

Promedio **54.10**

Desv. Est. **1.07**

% fcm **103.06**

Tabla F-5.3.2-2 Resistencia SPS 28 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	60	20°C	9100	55.74
2	60	20°C	9500	58.19
3	60	20°C	9500	58.19
4	60	20°C	9400	57.58
5	60	20°C	9500	58.19
6	60	20°C	9500	58.19

Promedio **57.68**

Desv. Est. **0.98**

% fcm **109.86**

Tabla F-5.3.2-3 Resistencia SPS 60 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Kilopondios</i>	<i>Resistencia MPa</i>
1	90	20°C	9600	58.80
2	90	20°C	9500	58.19
3	90	20°C	9850	60.33
4	90	20°C	9700	59.41
5	90	20°C	9300	56.96
6	90	20°C	9550	58.49

Promedio **58.70**

Desv. Est. **1.14**

% fcm **111.81**

Tabla F-5.3.2-4 Resistencia SPS 90 días curado a 20°C

ANEJO 5.3.3 PESO DE PROBETAS

En este anejo se presentan las tablas con los resultados de los pesos de las probetas de mortero.

A. Peso de probetas control curadas a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	3	40°C	137.47
2	3	40°C	141.39
3	3	40°C	140.58
4	3	40°C	141.69
5	3	40°C	141.91
6	3	40°C	140.93

Promedio **140.66**

Desv. Est. **1.68**

Tabla A-5.3.2-1 Peso de probetas control 3 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	7	40°C	141.45
2	7	40°C	143.50
3	7	40°C	139.14
4	7	40°C	141.12
5	7	40°C	140.39
6	7	40°C	139.06

Promedio ***140.78***
Desv. Est. ***1.66***

Tabla A-5.3.2-2 Peso de probetas control 7 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	14	40°C	140.78
2	14	40°C	140.75
3	14	40°C	140.36
4	14	40°C	139.98
5	14	40°C	141.05
6	14	40°C	141.27

Promedio ***140.70***
Desv. Est. ***0.47***

Tabla A-5.3.2-3 Peso de probetas control 14 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	28	40°C	143.41
2	28	40°C	141.76
3	28	40°C	141.67
4	28	40°C	142.26
5	28	40°C	140.55
6	28	40°C	143.82

Promedio ***142.25***
Desv. Est. ***1.21***

Tabla A-5.3.2-4 Peso de probetas control 28 días curado a 40°C

B. Peso de probetas con ceniza de Cholteca curadas a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	3	40°C	141.40
2	3	40°C	142.23
3	3	40°C	141.73
4	3	40°C	140.32
5	3	40°C	141.83
6	3	40°C	140.57

Promedio **141.35**
Desv. Est. **0.75**

Tabla B-5.3.2-1 Peso de probetas Cholteca 3 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	7	40°C	142.60
2	7	40°C	143.74
3	7	40°C	142.67
4	7	40°C	143.16
5	7	40°C	142.16
6	7	40°C	143.28

Promedio **142.94**
Desv. Est. **0.57**

Tabla B-5.3.2-2 Peso de probetas Cholteca 7 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	14	40°C	141.60
2	14	40°C	140.84
3	14	40°C	141.61
4	14	40°C	141.60
5	14	40°C	142.53
6	14	40°C	141.55

Promedio **141.62**
Desv. Est. **0.54**

Tabla B-5.3.2-3 Peso de probetas Cholteca 14 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	28	40°C	142.32
2	28	40°C	143.10
3	28	40°C	143.34
4	28	40°C	144.01
5	28	40°C	142.80
6	28	40°C	142.74

Promedio **143.05**

Desv. Est. **0.58**

Tabla B-5.3.2-4 Peso de probetas Cholteca 28 días curado a 40°C

C. Peso de probetas con ceniza de San Pedro Sula curadas a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	3	40°C	140.05
2	3	40°C	139.80
3	3	40°C	139.84
4	3	40°C	139.66
5	3	40°C	139.07
6	3	40°C	140.28

Promedio **139.78**

Desv. Est. **0.41**

Tabla C-5.3.2-1 Peso de probetas SPS 3 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	7	40°C	141.62
2	7	40°C	142.63
3	7	40°C	141.63
4	7	40°C	140.10
5	7	40°C	142.89
6	7	40°C	141.85

Promedio **141.79**

Desv. Est. **0.98**

Tabla C-5.3.2-2 Peso de probetas SPS 7 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	14	40°C	140.68
2	14	40°C	141.41
3	14	40°C	141.17
4	14	40°C	140.77
5	14	40°C	141.91
6	14	40°C	140.04

Promedio **141.00**
Desv. Est. **0.65**

Tabla C-5.3.2-3 Peso de probetas SPS 14 días curado a 40°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	28	40°C	142.17
2	28	40°C	140.50
3	28	40°C	140.79
4	28	40°C	141.00
5	28	40°C	140.13
6	28	40°C	141.22

Promedio **140.97**
Desv. Est. **0.70**

Tabla C-5.3.2-4 Peso de probetas SPS 28 días curado a 40°C

D. Peso de probetas control curadas a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	7	20°C	137.82
2	7	20°C	137.74
3	7	20°C	137.41
4	7	20°C	137.52
5	7	20°C	138.19
6	7	20°C	138.43

Promedio **137.85**
Desv. Est. **0.39**

Tabla D-5.3.2-1 Peso de probetas control 7 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	28	20°C	143.40
2	28	20°C	141.20
3	28	20°C	142.60
4	28	20°C	141.20
5	28	20°C	142.80
6	28	20°C	141.50

Promedio **142.12**
Desv. Est. **0.94**

Tabla D-5.3.2-2 Peso de probetas control 28 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	60	20°C	145.0
2	60	20°C	143.4
3	60	20°C	140.3
4	60	20°C	145.1
5	60	20°C	142.1
6	60	20°C	144.1

Promedio **143.33**
Desv. Est. **1.86**

Tabla D-5.3.2-3 Peso de probetas control 60 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	90	20°C	141.2
2	90	20°C	143.5
3	90	20°C	142.8
4	90	20°C	143.8
5	90	20°C	144.5
6	90	20°C	143.9

Promedio **143.28**
Desv. Est. **1.16**

Tabla D-5.3.2-4 Peso de probetas control 90 días curado a 20°C

E. Peso de probetas con ceniza de Cholteca curadas a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	7	20°C	144.20
2	7	20°C	144.30
3	7	20°C	143.40
4	7	20°C	144.50
5	7	20°C	144.40
6	7	20°C	146.50

Promedio **144.55**
Desv. Est. **1.03**

Tabla E-5.3.2-1 Peso de probetas Cholteca 7 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	28	20°C	143.15
2	28	20°C	142.79
3	28	20°C	145.65
4	28	20°C	145.31
5	28	20°C	143.81
6	28	20°C	145.30

Promedio **144.34**
Desv. Est. **1.24**

Tabla E-5.3.2-2 Peso de probetas Cholteca 28 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	60	20°C	142.9
2	60	20°C	147.6
3	60	20°C	143.3
4	60	20°C	142.4
5	60	20°C	145.2
6	60	20°C	143.2

Promedio **144.10**
Desv. Est. **1.96**

Tabla E-5.3.2-3 Peso de probetas Cholteca 60 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	90	20°C	144.3
2	90	20°C	145.5
3	90	20°C	143.2
4	90	20°C	144.8
5	90	20°C	143.8
6	90	20°C	144.2

Promedio **144.30**
Desv. Est. **0.79**

Tabla E-5.3.2-4 Peso de probetas Cholteca 90 días curado a 20°C

F. Peso de probetas con ceniza de San Pedro Sula curadas a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	7	20°C	144.00
2	7	20°C	143.00
3	7	20°C	142.20
4	7	20°C	140.20
5	7	20°C	141.20
6	7	20°C	143.90

Promedio **142.42**
Desv. Est. **1.52**

Tabla F-5.3.2-1 Peso de probetas San Pedro Sula 7 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	28	20°C	146.2
2	28	20°C	146.35
3	28	20°C	143.8
4	28	20°C	141.75
5	28	20°C	143.65
6	28	20°C	143.19

Promedio **144.16**
Desv. Est. **1.79**

Tabla F-5.3.2-2 Peso de probetas San Pedro Sula 28 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	60	20°C	145.5
2	60	20°C	142.1
3	60	20°C	144.8
4	60	20°C	143.8
5	60	20°C	143.4
6	60	20°C	144.3

Promedio ***143.98***

Desv. Est. ***1.18***

Tabla F-5.3.2-3 Peso de probetas San Pedro Sula 60 días curado a 20°C

<i>Descripción</i>	<i>Edad</i>	<i>Temperatura Curado</i>	<i>Peso (g)</i>
1	90	20°C	143.8
2	90	20°C	144.8
3	90	20°C	145.6
4	90	20°C	143.5
5	90	20°C	144.4
6	90	20°C	143.2

Promedio ***144.22***

Desv. Est. ***0.90***

Tabla F-5.3.2-4 Peso de probetas San Pedro Sula 90 días curado a 20°C