

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA CENIZA VOLANTE PRODUCIDA POR LA
COMBUSTIÓN DE CARBÓN, EN LA PLANTA GENERADORA SAN JOSÉ
POWER STATION PARA UTILIZARSE COMO PUZOLANA ARTIFICIAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

EDGAR JACOBO MARTÍNEZ ROSALES

ASESORADO POR EL ING. SERGIO VINICIO CASTAÑEDA LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA FEBRERO DE 2008



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**EVALUACIÓN DE LA CENIZA VOLANTE PRODUCIDA POR LA
COMBUSTIÓN DE CARBÓN, EN LA PLANTA GENERADORA
SAN JOSÉ POWER STATION PARA UTILIZARSE COMO
PUZOLANA ARTIFICIAL**

Edgar Jacobo Martínez Rosales

Asesorado por: Ing. Sergio Vinicio Castañeda Lemus

Guatemala, febrero de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivònne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

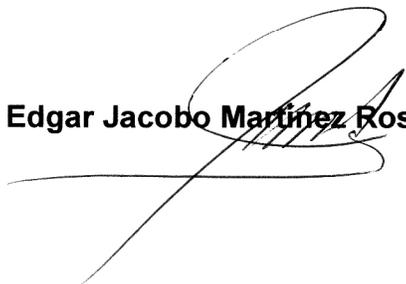
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Eduardo Ramírez Saravia
EXAMINADOR	Ing. Jeovany Rudaman Miranda
EXAMINADOR	Ing. Clero Uriel Gamarro Cano
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivònne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE LA CENIZA VOLANTE PRODUCIDA POR LA
COMBUSTIÓN DE CARBÓN, EN LA PLANTA GENERADORA SAN JOSÉ
POWER STATION PARA UTILIZARSE COMO PUZOLANA ARTIFICIAL,**

tema que se me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, el día 31 de octubre de 2006.


Edgar Jacobo Martínez Rosales

Ingeniero Sergio V. Castañeda L
Colegiado 5319

Guatemala 24 de septiembre de 2007

Ingeniero

Francisco Javier Quiñón de la Cruz

Coordinador Área de Materiales

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos

Ing. Quiñón de la Cruz

Por este medio me permito informarle que he revisado el trabajo de Graduación titulado "Evaluación de la ceniza volante producida por la combustión de carbón, en la planta generadora San José power station para utilizarse como puzolana artificial", desarrollado por el estudiante universitario Edgar Jacobo Martínez Rosales quien contó con mi asesoría.

Considero que el trabajo elaborado por el estudiante Martínez Rosales, satisface los requisitos exigidos en la Facultad, por lo que recomiendo su aprobación,

Agradezco a usted la atención a la presente, atentamente

Ing. Sergio Vinicio Castañeda Lemus

Asesor Trabajo de Graduación

Sergio Vinicio Castañeda Lemus
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO No. 5319

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala 16 de noviembre de 2007

Ing. Fernando Amílcar Boiton Velásquez
Director de Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Boiton Velásquez:

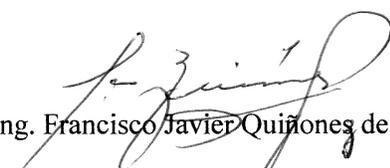
Me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **“EVALUACIÓN DE LA CENIZA VOLANTE PRODUCIDA POR LA COMBUSTIÓN DE CARBÓN, EN LA PLANTA GENERADORA SAN JOSÉ POWER STATION PARA UTILIZARSE COMO PUZOLANA ARTIFICIAL”**, elaborado por el estudiante universitario **Edgar Jacobo Martínez Rosales**, quien contó con la asesoría del Ingeniero Sergio Vinicio Castañeda Lemus.

Considero que el trabajo desarrollado por el estudiante **Martínez Rosales**, satisface los requisitos exigidos, por lo cual recomiendo su aprobación.

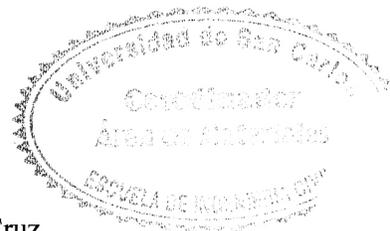
Agradezco a usted la atención a la presente.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Francisco Javier Quiñones de la Cruz

Coordinador Área de Materiales y Construcciones Civiles



Cc archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Sergio Vinicio Castañeda Lemus y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación del estudiante Edgar Jacobo Martínez Rosales, titulado EVALUACIÓN DE LA CENIZA VOLANTE PRODUCIDA POR LA COMBUSTIÓN DE CARBÓN, EN LA PLANTA GENERADORA SAN JOSÉ POWER STATION PARA UTILIZARSE COMO PUZOLANA ARTIFICIAL, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Ing. Fernando Amílcar Boiton Velásquez



Guatemala, febrero 2008.

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA CENIZA VOLANTE PRODUCIDA POR LA COMBUSTIÓN DE CARBÓN, EN LA PLANTA GENERADORA SAN JOSÉ POWER STATION PARA UTILIZARSE COMO PUZOLANA ARTIFICIAL**, presentado por el estudiante universitario **Edgar Jacobo Martínez Rosales**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large loop at the top and a vertical stroke extending downwards.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, febrero de 2008



/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

Dios: quien puso la sabiduría en el corazón, quien dio espíritu de inteligencia. Por que Él da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia. Job 38:36, Proverbios 2:6

Ing. Sergio V. Castañeda: por su dedicación y esfuerzo en el asesoramiento y elaboración del presente trabajo.

Al personal del laboratorio del Centro de Investigaciones de Ingeniería

DEDICATORIA

Mis padres: Roderico Irlando Martínez Cabrera
Elba Cristina Rosales Dubòn de Martínez
Gracias a su amor y ejemplo me fue posible alcanzar esta meta.

Mi esposa: Nilda Ivette Pineda Marroquín con amor.

Mi hijo: Jacobo Rodrigo, por ser la razón de mi vida.

Mis hermanos: Herberth Eduardo, Ingrid Edith, Cristina Fernanda Martínez Rosales.

Por que su apoyo y ejemplo ha sido importante en mi vida. Gracias.

Mis tíos y primos: con aprecio.

Mis amigos: Eduardo Oliva, Sergio Gómez, Elder Vásquez, Rodolfo Rosales, Gabriel Gonzalo, Edwin Ramírez con afecto especial.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. PUZOLANAS	1
1.1 Definición	1
1.2 Tipos	1
1.2.1 Puzolanas naturales	1
1.2.2 Puzolanas artificiales	3
1.2.3 Puzolanas mixtas o intermedias	5
1.3 Características	6
1.4 Ventajas en el uso de puzolanas como adiciones	7
1.5 Ceniza volante de carbón	7
1.5.1 Definición	7
1.5.2 Tipos	7
1.5.3 Características	10
1.5.4 Normativa existente	14
2. CEMENTOS MEZCLADOS HIDRÁULICOS	19
2.1 Definición	19
2.2 Tipos de cementos mezclados, de acuerdo a las normas ASTM	19
2.2.1 Cementos mezclados hidráulicos	19

2.2.2	Cementos de mampostería	19
2.3	Normativa aplicable	20
2.4	Ventajas	20
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	23
3.1	Muestreo de la ceniza volante	23
3.2	Determinación del carbón residual de la ceniza volante	23
3.3	Propuesta de cemento mezclado (cemento Portland tipo I + ceniza volante)	23
3.3.1	Materiales	23
3.4	Resultados	24
3.4.1	Caracterización de la ceniza volante como puzolana artificial de acuerdo a las normas ASTM C-311 y C-618	24
3.4.1.1	Física mecánica	24
3.4.1.2	Química	25
3.4.2	Evaluación cementos mezclados (norma ASTM C-595)	26
3.3.1.2	Física mecánica	26
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
4.1	Materiales	31
4.2	Ceniza volante (normas ASTM C-311, C-618)	31
4.2.1	Ensayos físico mecánicos	31
4.2.2	Ensayos químicos	32
4.3	Cemento mezclado $CCV_{70-30\%}$ (norma ASTM C-595)	32
4.3.1	Ensayos físico mecánicos	32

CONCLUSIONES	35
RECOMENDACIONES	37
REFERENCIAS	39
BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXOS	43

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Partículas ceniza volante	11
2.	Partículas ceniza volante	11
3.	Composición de puzolanas y materiales de construcción	15
4.	Partícula de carbón devolatilizado	19
5.	Resultados resistencia a compresión	30
6.	Resultados fineza tamiz No. 325 cementos CUGC, $CCV_{70-30} \%$	30
7.	Resultados densidad cementos CUGC, $CCV_{70-30} \%$	31
8.	Resultados Fraguado Vicat cementos CUGC, $CCV_{70-30} \%$	31
9.	Resultados fineza <i>Blaine</i> cementos CUGC, $CCV_{70-30} \%$	32
10.	Máquina universal ensayos resistencia mecánica	32
11.	Mesa de <i>flow</i> normalizada, control de trabajabilidad morteros	33

TABLAS

I. Propiedades físicas ceniza volante clase F	13
II. Composición química de cenizas volantes	13
III. Resultados físico mecánicos ceniza volante	27
IV. Resultados químicos ceniza volante	28
V. Resultados físico mecánicos cementos CCV _{70-30 %} , CUGC	29

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ACI	<i>American Concrete Institute</i> (Instituto Americano del Concreto)
Al₂O₃	Óxido de aluminio
CaO	Óxido de calcio
CCV 70-30 %	Cemento mezclado (70% cemento Portland tipo I + 30 % ceniza volante en masa)
CUGC	Cemento mezclado UGC
CP I	Cemento Portland tipo I
CO₂	Dióxido de carbono
°C	Grados celsius
Fe₂O₃	Óxido férrico
ISO	Organización internacional para la estandarización
kg	Kilogramo

km	Kilómetro
MC_{CUGC}	Mezcla control (100 % CUGC)
MCM_{CCV 70-30 %}	Mezcla cemento mezclado (CCV 70-30)
MgO	Óxido de magnesio
Na₂O	Óxido de sodio
SO₃	Trióxido de azufre
SiO₂	Dióxido de silicio
Σ	Sumatoria
σ	Esfuerzo
%	Porcentaje

GLOSARIO

Adición	Material mineral que es incorporado al cemento o al concreto en diferentes proporciones, a fin de mejorar o transformar algunas de las propiedades.
Álcalis	Nombre dado a los óxidos metálicos del cemento que, al ser solubles en el agua, pueden actuar como bases enérgicas.
ASTM	Siglas en inglés de la Sociedad Americana para el ensayo e inspección de los materiales (<i>American Society for Testing and Materials</i>).
Cemento mezclado	Mezcla íntima y uniforme de cemento Portland con distintos tipos de adición que desarrollan propiedades para usos especiales en la construcción.
Ceniza volante	Es el producto sólido y en estado de fina división, procedente de la combustión de carbón pulverizado en las centrales térmicas, que es arrastrado por los gases del proceso y recuperado de ellos, en los filtros.
Clinker	Componente principal del cemento constituido por silicatos de calcio obtenido por medio de la cocción hasta fusión parcial de una mezcla convenientemente

proporcionada y homogeneizada de materiales debidamente seleccionadas.

COGUANOR

Siglas de la Comisión Guatemalteca de Normas.

Fraguado

Reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de una mezcla de cemento y agua, la cual puede ser un concreto o mortero.

Mortero

Mezcla constituida por material cementante, agregado fino, agua, con o sin aditivos empleada para obras de albañilería, como material de pega, revestimiento de paredes, etc.

Norma

Documento, de aplicación voluntaria, aprobado por un organismo de normalización reconocido, que contiene especificaciones técnicas basadas en los resultados de la experiencia y del desarrollo tecnológico.

Puzolana

Material con alto contenido de silicio o silicio-aluminio, de origen natural o industrial, que una vez pulverizado en presencia de agua reacciona con el hidróxido de calcio del cemento, formando, a temperatura ambiente, compuestos con propiedades hidráulicas permanentemente insolubles y estables.

Relación a/c (w/c)

Es el resultado de dividir la masa del agua entre la masa del cemento utilizados en un concreto o mortero.

Reología	Estudio de la deformación y flujo de la materia, o bien, el estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos, es decir, la forma en la que un material responde a su fuerza.
Sílice	Existe normalmente como un óxido en forma soluble, insoluble y coloidal que se encuentra en casi todas las rocas, siendo el componente principal de la arena, arenisca, cuarcita, granito, etc.
Trabajabilidad	Característica de una mezcla o mortero en cuanto a la facilidad que presenta para ser colocado.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se evaluó la ceniza volante de carbón, generada durante los procesos de producción de energía eléctrica en la Planta San José *Power Station*, como puzolana artificial (ASTM C-311 y C-618), y como adición en cementos mezclados (ASTM C-595), actividad desarrollada en el Centro de Investigaciones de Ingeniería.

El muestreo se realizó en las instalaciones de la Planta San José *Power Station*, luego de trasladar la ceniza al Centro de Investigaciones de Ingeniería se preparó el cemento propuesto (70 % cemento portland y 30 % ceniza volante), fue caracterizada como puzolana artificial, evaluando sus principales características físico-mecánicas así como su composición química de acuerdo a las normas ASTM aplicables.

Los resultados obtenidos serán de utilidad principalmente en las comunidades cercanas a la planta, aunque se recomienda profundizar más en los estudios, en virtud de que las cenizas volantes son muy variables, lo que influye en la calidad del cemento mezclado.

OBJETIVOS

General

Evaluar la ceniza volante de carbón mineral, generada en la planta de Energía Eléctrica San José *Power Station*, como puzolana artificial de acuerdo a las normas ASTM aplicables.

Específicos

1. Proponer una alternativa de reutilización para la ceniza volante de carbón, generada en la planta de energía eléctrica San José *Power Station*.
2. Presentar materiales alternativos a las comunidades cercanas a la planta de energía eléctrica San José *Power Station*.
3. Aplicar las normas ASTM C-311, C-618 para evaluar la ceniza volante de carbón.
4. Aplicar la norma ASTM C-595 para evaluar el cemento mezclado (70 % cemento portland + 30 % ceniza volante).
5. Continuar con la línea de investigación sobre cementos mezclados que actualmente se desarrolla en el Centro de Investigaciones de Ingeniería.

INTRODUCCIÓN

Desde que el cemento fue inventado, alrededor de 1870, el consumo de éste ha venido en aumento de manera constante, lo que ha generado un amplio desarrollo tecnológico en esta materia. Dentro de esto se puede mencionar el uso de puzolanas, ya sean de origen natural o artificial, teniendo Guatemala una amplia riqueza de puzolanas naturales y últimamente la generación de subproductos industriales, como los son los de la industria siderúrgica o la generación de energía eléctrica.

En el capítulo uno se incluyen aspectos teóricos sobre las adiciones naturales y artificiales, características, usos y ventajas. También se incluye material sobre las cenizas volantes tipos, características, normativa existente

El capítulo dos contiene conceptos teóricos sobre cementos mezclados, tipos, características y normativa aplicable. El desarrollo experimental se presenta en el capítulo tres, incluye el muestreo y preparación de la ceniza volante, así también los resultados obtenidos.

En el capítulo cuatro se presentan el análisis de los resultados, así como las recomendaciones y conclusiones planteadas en este documento. La utilización de la cenizas volantes, es actualmente una de las opciones de mitigación que apoya la industria aprovechándose sus propiedades puzolánicas en cementos mezclados, así como en otras aplicaciones estabilización de suelos, o tratamiento de aguas residuales, la información generada se espera que pueda ser de utilidad al sector de la construcción nacional.

1. PUZOLANAS

1.1 Definición

“Material con alto contenido de silicio o silicio-aluminio de origen natural o industrial, que una vez pulverizado en presencia de agua reacciona con el hidróxido de calcio del cemento formando a temperatura ambiente compuestos con propiedades hidráulicas permanentemente insolubles y estables.” (1)

“Son materiales naturales o productos artificiales que contienen minerales silíceos y aluminosos con escaso valor cementante, pero que una vez molidos finamente reaccionan en presencia de agua a temperatura ambiente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento Pórtland, formando compuestos de silicatos de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia.” (1)

1.2 Tipos

Si bien la denominación de puzolanas originalmente hacía referencia a los materiales naturales de origen volcánico que reaccionan con la cal, actualmente el término es aplicado a todos aquellos materiales que presentan un comportamiento similar, independientemente de su origen y composición. (1)

Recientemente las combinaciones de cemento Portland – puzolana han llegado a tener un importante reconocimiento como material cementante efectivo, estableciéndose que el uso de puzolanas de buena calidad y en proporciones adecuadas, permiten mejorar la calidad del cemento.

1.2.1 Puzolanas naturales

Se componen básicamente por materiales de origen volcánico o de características similares, pudiendo ser éstas rocas volcánicas de naturaleza diversa o también rocas de origen orgánico, de carácter fósil con naturaleza y composición a base de sílice activa. En su gran mayoría, las puzolanas naturales requieren de molienda para alcanzar un grado de finura que las haga adecuadas para su uso, además de hacer notar que no toda roca volcánica constituye por ende una puzolana natural.

1.2.1.1 Origen volcánico

Consisten de materiales vítreos de estructura incoherente o tufas compactadas que se forman por la deposición de polvo y cenizas volcánicas. Pueden surgir en la naturaleza en forma de rocas consolidadas y como estado fragmentado no consolidado.

Los cementos Portland con adición de puzolanas de origen volcánico han sido empleados en la elaboración de concreto para la construcción de esclusas, canales, sistemas de drenaje, puentes de ferrocarril y otras estructuras, sobretodo en Alemania, Holanda y Bélgica.

- Cenizas volcánicas

Se constituyen de fragmentos vítreos pulverizados que se mantienen suspendidos en la atmósfera como consecuencia de su bajo peso, siendo así arrastrados largas distancias por las corrientes de aire. Las cenizas volcánicas con contenidos altos de minerales cristalinos son mucho más estables y muestran poca o ninguna actividad puzolánica.

- Tobas volcánicas

Constituyen básicamente productos de origen volcánico que han sufrido un enfriamiento extremadamente rápido, caracterizándose por una alta superficie específica que les permite desarrollar gran afinidad a la reacción con la cal liberada del clinker, tendiendo a decrecer la actividad puzolánica como resultado del descenso en el contenido de sílice. Las tobas volcánicas se componen básicamente de zeolitas y material amorfo parcialmente zeolítico o de rocas con alto contenido de sílice que han sufrido en la naturaleza una alteración química.

1.2.1.2 Origen orgánico

- Tierra de diatomeas

Es un material polvoriento o de muy alta finura y superficie específica, así como un elevado contenido de sílice amorfa altamente reactiva. Poseen un aspecto macroscópico de roca fina y porosa, con un color que varía desde blanco brillante (en el caso de alta pureza), hasta rosa cuando se trata de un material calcinado, o bien gris cuando se encuentra sin calcinar.

Básicamente se constituyen por la acumulación de billones de restos de caparazones de algas marinas y de agua dulce formados básicamente de sílice, cuyos depósitos se encuentran frecuentemente mezclados con arenas y arcillas. En su estado natural, muchas de estas tierras tienen poco valor como puzolanas como consecuencia de un estado físico que requiere gran cantidad de agua para producir mezclas con la plasticidad deseada, lo que las hace ser de un escaso valor cementante. Se caracterizan por muy alta capacidad de absorber líquidos, volumen de muy baja densidad, capacidad abrasiva suave, siendo en general escasas y de costo elevado.

- Esquistos opalinos

Son rocas metamórficas constituidas de sílice pura producto de la cristalización de aguas, cuyos cristales se encuentran alineados en capas paralelas formando un gran número de exfoliaciones compactas y bien desarrolladas. Este tipo de rocas suelen romperse con facilidad por una laminación en placas finas parecidas a escamas.

1.2.1.3 Origen sedimentario

- Arcillas

Es un material procedente de la descomposición natural de rocas que contienen feldespato, como el granito. Físicamente se considera un coloide de partícula extremadamente pequeña y superficie lisa, caracterizándose por adquirir plasticidad al entrar en contacto con el agua, así como sonoridad y dureza al calentarla por encima de 800 °C.

- Zeolitas

Consiste en un material altamente reactivo similar a las tobas volcánicas, presentando un alto contenido de sílice amorfa con regular dureza.

1.2.2 Puzolanas artificiales

Son desechos y subproductos silícicos vítreos determinados, como el caso de las cenizas volantes y el humo de sílice, además de las arcillas naturales aptas para ser activadas por medio de tratamientos térmicos.

Cabe distinguir dos grupos básicos, uno de ellos el formado por materiales naturales silicatados de naturaleza arcillosa y esquistosa que adquieren el carácter puzolánico por sometimiento a procesos térmicos, y otro,

constituido por subproductos de determinadas operaciones industriales que en virtud de las transformaciones sufridas, adquieren propiedades puzolánicas.

1.2.2.1 Origen térmico

- Arcillas calcinadas

Las arcillas constituyen depósitos sedimentarios, generalmente de silicatos, aluminatos y sílico aluminatos hidratados, en los cuales el contenido de agua puede ser muy variable. Es importante destacar que no todas las arcillas presentan la misma aptitud para ser activadas por calcinación, ya que esto depende en un primer término del contenido de agua de composición. Las arcillas calcinadas han sido utilizadas en el pasado en la elaboración de morteros de cemento y concreto ante la falta de cemento Portland, sin embargo la irregularidad del proceso de producción de las mismas afectaba en forma directa la calidad del producto.

1.2.2.2 Origen residual

- Ceniza volante

Es un residuo finamente dividido producto de la combustión del carbón mineral pulverizado en las plantas generadoras de electricidad. Durante el proceso de combustión, las impurezas del carbón mineral (como la arcilla, el feldespato, cuarzo y la pizarra) se funden en suspensión y son retiradas de la cámara de combustión por el gas de escape; mientras transcurre el proceso, el material fundido se enfría y se solidifica formando partículas esféricas llamadas cenizas volantes, cuyas características dependerán del tipo de combustible y de las instalaciones de la central donde se originan.

Recientemente han sido llamadas cenizas de carbones pulverizados, las cuales provienen de la combustión de carbones antracíticos, bituminosos, sub-bituminosos o ligníticos, por orden de mayor a menor poder calorífico y de menor a mayor contenido de volátiles. En la elaboración de cementos mezclados, es preferible el uso de cenizas de carbones bituminosos, que son los que dejan mayor cantidad de residuos sólidos, mientras que las ligníticas no suelen ser empleadas por ser las menos adecuadas.

Las cenizas volantes Clase F y Clase C de acuerdo con la Norma ASTM C-618, son comúnmente empleadas como aditivos puzolánicos para el concreto. Los materiales Clase F generalmente se constituyen de cenizas volantes con bajo contenido de calcio, presentando contenidos de carbono inferiores a 5%, mientras que los materiales Clase C son frecuentemente cenizas volantes de contenido elevado de calcio cuyos contenidos de carbono usualmente son menores que 2%.

- Humo de sílice

Conocido también como micro sílice o humo de sílice condensado, es un material en forma de polvo producto de la reducción de cuarzo muy puro con carbón mineral durante la manufactura del silicio o de aleaciones de ferro silicio. El humo de sílice asciende como vapor oxidado de los hornos para posteriormente enfriarse, condensarse y ser recolectado a fin de someterle a un proceso en el que son retiradas las impurezas y controlado el tamaño de las partículas.

El humo de sílice ha sido empleado como reemplazo parcial del cemento, o bien, como una adición al mismo en cantidades que varían entre el 5 y 10%, llegando hasta el 30% en peso del material cementante total.

1.2.3 Puzolanas mixtas o intermedias

1.2.3.1 Ceniza de cascarilla de arroz

Básicamente consiste en un desecho agrícola de sílice pura en forma no cristalina. En el proceso de producción de arroz cada tonelada produce 200 kg de cascarilla, que posteriormente originan 40 kg de cenizas que pueden ser obtenidas por combustión a campo abierto o combustión controlada. Alrededor del año 1973, aparecen técnicas enfocadas en el control de la combustión de este desecho agrícola, obteniendo como resultado una ceniza altamente reactiva que puede ser producida por combustión controlada cuidando que la sílice sea producida en forma no cristalina y en estructura celular, necesitándose para ello una incineración controlada de 500 a 700 grados centígrados que permita obtener una ceniza altamente puzolánica.

1.2.3.2 Ceniza de caña de azúcar

Estudios recientes han mostrado que los desechos de la industria azucarera consistentes en ceniza de paja de caña (SCSA) y ceniza de bagazo de caña (SCBA), presentan una actividad puzolánica como consecuencia de un alto contenido de sílice encontrada en este material. En países productores de azúcar, el bagazo de caña obtenido como residuo del proceso de producción ha tenido diferentes usos, sirviendo en ocasiones como combustible en los generadores de vapor y en otras industrias, para la obtención de pulpa para papel y/o en planchas de aglomerado para la fabricación de muebles. Sin embargo, la obtención de éstas cenizas es un proceso aún carente de investigación a nivel general.

1.3 Características

Para poder evaluar las características de una puzolana a emplear en la construcción deberán de aplicarse los requerimientos y especificaciones de las

normas ASTM aplicables, los principales parámetros físico-mecánicos necesarios de evaluar son:

- Fineza.
- Expansión o contracción al autoclave.
- Tiempos de Fraguado.
- Actividad Puzolanica.
- Requerimientos de Agua.
- Calor de Hidratación.
- Reactividad álcali-agregado.
- Resistencia a los sulfatos.

1.4 Ventajas en el uso de puzolanas como adiciones

- reemplazan una buena porción del cemento Portland del 20 al 40%, disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más barata que el clinker y más económica de moler.
- reducen el calor generado durante la hidratación, la cual es una reacción exotérmica.
- evitan el agrietamiento del concreto por la acción expansiva de la cal al hidratarse y compresiva al secarse.
- rebajan en cierto porcentaje los aluminatos que son inestables en medios sulfatados y absorben álcalis, los cuales normalmente entran a reaccionar de manera perjudicial con los agregados para el concreto.
- con el correr del tiempo, el concreto con puzolanas se hace menos permeable y más compacto que el elaborado usando cemento común.

- para el medio ambiente, el uso de puzolanas reduce la emanación de dióxido de carbono.
- aumento de la durabilidad de las estructuras de concreto.

1.5 Ceniza volante de carbón

1.5.1 Definición

Según la definición de la norma UNE 83-415, la ceniza volante es el producto sólido y en estado de fina división, procedente de la combustión de carbón pulverizado en los hogares de centrales térmicas, que es arrastrado por los gases del proceso y recuperado de ellos, en los filtros. Es utilizada para la fabricación de vidrio, cerámica, ladrillos, para capas de firmes de carreteras, para cama de tubos, y elaboración de hormigones.

1.5.2 Tipos

Los combustibles fósiles se utilizan en plantas eléctricas para producir energía. Sin embargo, los grandes volúmenes de cenizas que genera este proceso pueden causar problemas al medio ambiente. Una alternativa que se vislumbra es destinarlas a la producción de materiales para la construcción, lo cual ya se hace en varios países. Las cenizas volantes del carbón según especialistas conservan energía, con lo cual se puede reducir la demanda de ésta en la elaboración de materiales como pavimento, cal, cemento y piedra. También pueden sustituir a la arcilla, arena, piedra caliza y la grava, lo cual representa un ahorro en los costos de energía derivados de la extracción, tienen propiedades cementantes, debido entre otros factores, a su contenido de óxidos (sílice, alúmina y hierro) que están por arriba del 70 por ciento.

Las características químicas de las cenizas volantes están ligadas al tipo de carbón que las originan, así como también a las transformaciones que se ocasionan mediante la combustión de los mismos a diversas temperaturas.

Actualmente China e India juntas producen aproximadamente 200 millones de toneladas de ceniza de carbón cada año, Rusia y los países europeos, principalmente Polonia y la antigua Checoslovaquia, Rumania, Alemania, España y el Reino Unido, generan alrededor de 250 millones de toneladas de ceniza de carbón por año. Casi un 90% de la ceniza de carbón y de la escoria metalúrgica que se producen actualmente terminan finalmente en aplicaciones de poco valor. El Banco Mundial ha advertido que hacia el 2015, en la India se necesitará un metro cuadrado por persona para almacenar todas las cenizas volantes que se habrán producido. Canadá, Estados Unidos y Alemania son pioneros a nivel mundial en la utilización de cenizas para la industria de la construcción, Colombia y México realizan estudios al respecto y ya han obtenido resultados alentadores. De acuerdo a la norma ASTM C-618 existen dos clases de cenizas volantes, se diferencian en la composición del material.

1.5.2.1 Clase F

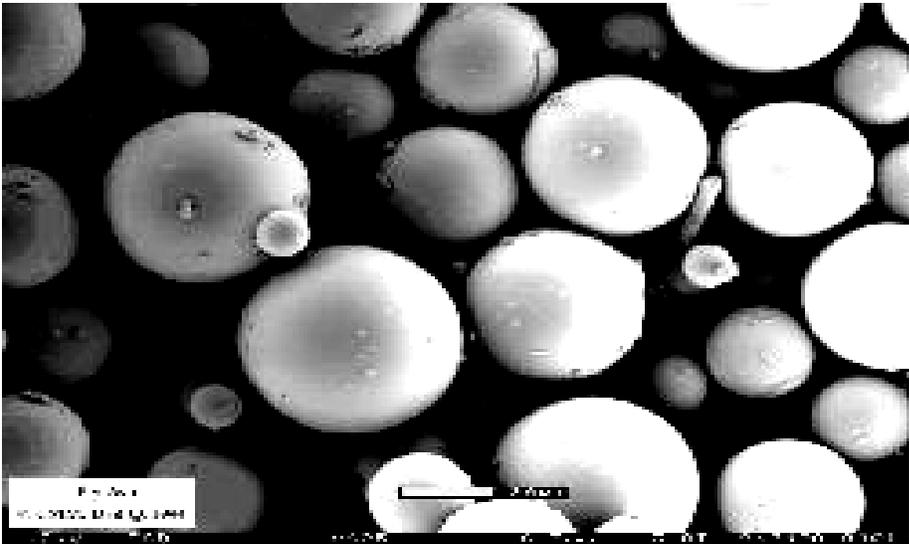
Son las más abundantes, tienen menos de un 15% de cal y contienen un porcentaje alto de la combinación de sílice, alúmina y óxido de hierro (superior al 70%), se producen normalmente en la combustión de la antracita o carbón bituminoso, poseen propiedades puzolánicas.

1.5.2.2 Clase C

Tienen un porcentaje alto de cal, muchas veces superior al 30% producto de la combustión de la lignita o carbón subbituminoso, además de las

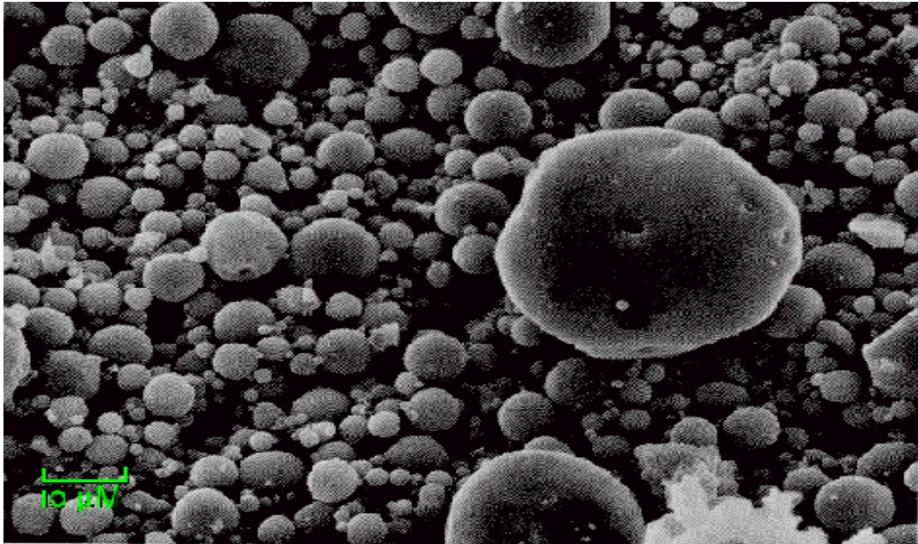
propiedades puzolánicas, poseen propiedades cementicias por si mismas. Al exponerse al agua, muchas de estas cenizas se hidratan y endurecen en menos de 45 minutos.

Figura 1 Partículas ceniza volante



Fuente (2)

Figura 2 Partículas ceniza volante



Fuente (2)

1.5.3 Características

Entre las características más importantes de las cenizas volantes, se pueden mencionar las siguientes:

- Contenido de carbón.
- SO₃.
- NH₃.
- Índice de esponja relacionado con el contenido de aire.
- Reactividad álcali-agregado.
- Fineza.
 - 45 um
 - Tamaño de partícula
- Densidad.
- Color.
- Aceites.
- Hidraulicidad.
- Actividad Puzolànica.
- Requerimientos de Agua.
- Resistencia a los sulfatos.

La ceniza volante tiene propiedades cementantes, debido, entre otros factores, a su contenido de óxidos (sílice, alúmina y fierro) arriba del 70%. Esta característica, junto a la forma esférica de sus partículas, contribuye al sellado del poro de los morteros y concretos elaborados con adiciones de ceniza volante, produciendo un material menos permeable y por lo tanto más resistente al paso del agua. Las mezclas de concreto que contienen cenizas volantes o escorias granuladas de alto horno molidas, casi siempre requieren menos agua

(10 %) para obtener un cierto revenimiento que los concretos que solo contienen cemento Portland. (ver figura 3)

**Tabla I Propiedades físicas
ceniza volante clase F**

Propiedades físicas ceniza volante	
Contenido de humedad	<1 % para ceniza seca
	5-40 % para ceniza del fondo
	50-110 % para ceniza del depósito
Humedad optima	13-30% proctor modificado
Densidad máxima seca	75-105 % proctor modificado
Gravedad especifica	2.2-2.6 g/cm ³
Tamaño de partícula	0.5 a 250 micrómetros/esferoidal

Fuente (2)

Tabla II Composición química, cenizas volantes

Composición química cenizas volantes				
Compuesto (%)	Clase F		Clase C	
	Contenido de hierro bajo	Contenido de hierro alto	Contenido de calcio alto	Contenido de calcio bajo
SiO ₂	46-57	42-54	25-42	46-59
Al ₂ O ₃	18-29	16.5-24	15-21	14-22
Fe ₂ O ₃	6-16	16-24	5-10	5-13
CaO	1.8-5.5	1.3-3.8	17-32	8-16
MgO	0.7-2.1	0.3-1.2	4-12.5	3.2-4.9
K ₂ O	1.9-2.8	2.1-2.7	0.3-1.6	0.6-1.1
Na ₂ O	0.2-1.1	0.2-0.9	0.8-6.0	1.3-4.2
SO ₃	0.4-2.9	0.5-1.8	0.4-5.0	0.4-2.5
LOI	0.6-4.8	1.2-5.0	0.1-1.0	0.1-2.3
TiO ₂	1-2	1-1.5	<1	<1

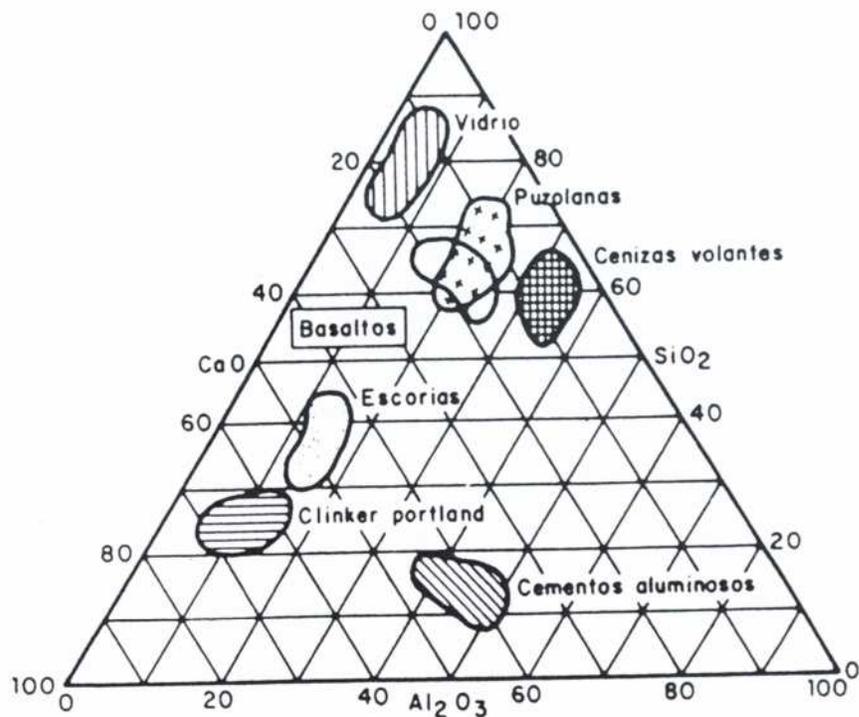
Fuente (2)

Algunos criterios que justifican el uso de las cenizas volantes son:

- se puede reducir la demanda de cementos en la elaboración de materiales como pavimento, cal, cemento y piedra.
- pueden sustituir a la arcilla, arena, piedra caliza y la grava, lo cual representa un ahorro en los costos de energía derivados de la extracción.
- disminución de gases contaminantes que inciden en el efecto invernadero.
- las inclusiones de ceniza volante en concretos sin aire incluido generalmente reduce la cantidad de aire atrapado.
- generalmente mejoran la trabajabilidad de los concretos de igual resistencia y revenimiento.
- los concretos en los que se emplea ceniza volante por lo general muestran menos segregación y sangrado que los concretos simples, este efecto hace a la ceniza volante particularmente valiosa en los concretos fabricados con agregados que presentan deficiencias en su contenido de finos.
- el uso de cenizas volantes reducen la cantidad de calor que se forma en una estructura de concreto debido a su menor calor de hidratación, característica especialmente favorable en los concretos usados en estructuras masivas.
- generalmente provocan retardos en el tiempo de fraguado del concreto.
- generalmente mejoran el desempeño de los concretos ante el ataque de los sulfatos, contribuyen a la adquisición de resistencia.
- se han utilizado cenizas volantes especialmente en la producción de concreto de alta resistencia entre 400 y 1000 kg/cm².

- las cenizas volantes generalmente reducen la permeabilidad del concreto aun cuando el contenido de cemento sea relativamente bajo.
- la absorción de un concreto con ceniza volante casi es la misma de uno sin ceniza. (pueden reducirla en un 20 %)

Figura 3 Composición de puzolanas y materiales de construcción



Fuente: (3) pág. 17

1.5.4 Normativa existente

A continuación se presentan algunas normas sobre la ceniza volante en varios países, lo que manifiesta la importancia que este material tiene en la industria de la construcción.

1.5.4.1 Estados Unidos

- ASTM

- ASTM C 618: *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*
- ASTM C 311: *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete*
- ASTM D 5239: *Standard Practice for Characterizing Fly Ash for Use in Soil Stabilization*
- ASTM E 850: *Standard Practice for Use of Inorganic Process Wastes as Structural Fill*
- ASTM E 1861: *Standard Guide for Use of Coal Combustion By-products in Structural Fills*
- ASTM D 5370: *Standard Specification for Pozzolanic Blended Materials in Construction Applications*
- ASTM C 1240: *Standard Specification for Silica Fume for Use in Hydraulic-Cement Concrete and Mortar*

- IDOT (Illinois Dept. of Trans. Springfield, IL USA)

- 306.01: *Special Provision for Fly Ash Modified Soils*
- 308.01: *Special Provision for Fly Ash Stabilized Soil Mixture Subbase*
- *Special Provision for Cement-Fly Ash-Aggregate Mixture (CFAM) Base Course*
- *Special Provision for Pozzolanic Base Course, Type A*
- *Special Provision for Use of Fly Ash in P.C.C. Pavement, Base Course, Base Course Widening.*

- AASHTO

- AASHTO *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*

1.5.4.2 Canada

- CAN/CSA A23.5-97 *Canadian Specification for Supplementary Cementing Materials(includes fly ash)*

1.5.4.3 Australia

- *Portland Cement* -AS 3972-1991,
- *Fly ash* AS 3582.1-1991, and A.S. 1129 *Fly Ash Specification Ground*
- *Granulated Blast Furnace Slag* -AS 3582.2.

1.5.4.4 Normas europeas

- BS 3892 Part 1 *Fly Ash standard*; Part 2 *Fly Ash for Use as a Type II Addition*
- BS EN 450 *European Standard for Fly Ash*
- BS EN 197 *European Standard for Multiple Binders (fly ash, cement, silica fume) Allowed in Concrete*

1.5.4.5 Alemania

- *Deutsches Institut für Normung-Berlin*

- DIN 1164-1 *German Cement standard*
- DIN 1045 *Reinforced Concrete Structures; Design and Construction*
- DIN EN 450 *Fly Ash In Concrete-Definition, Demands and Quality control.*
- ENV 206:1990 (CEN/TC 104) *Beton - Eigenschaften, Herstellung, Verarbeitung und Gütenachweis*
- EN 445:1996 (CEN/TC 104) *Einpreßmörtel für Spannglieder – Prüfverfahren*

- EN 446:1996 (CEN/TC 104) *Einpreßmörtel für Spannglieder - Einpreßverfahren*
- EN 447:1996 (CEN/TC 104) *Einpreßmörtel für Spannglieder - Anforderungen für üblichen Einpreßmörtel*
- EN 450:1994 (CEN/TC 104) *Flugasche für Beton - Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung*
- EN 451-1:1994 (CEN/TC 104) *Prüfverfahren für Flugasche - Teil 1: Bestimmung des freien Calciumgehalts*
- EN 451-2:1994 (CEN/TC 104) *Prüfverfahren für Flugasche - Teil 2: Bestimmung der Feinheit durch Naßsiebung*

1.5.4.6 Holanda

- NEN 3550 *Dutch cement standard*

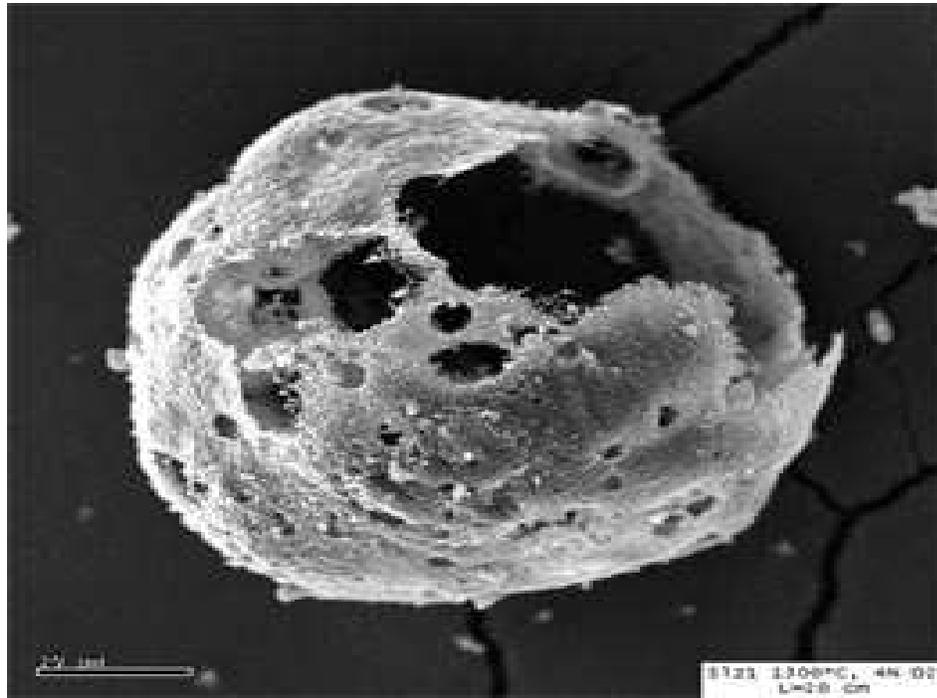
1.5.4.7 Inglaterra

- *British Standards Institution- London*
 - *B.S. 3892 PFA as a separate constituent in OPC*
 - *B.S. 6588 Blended cement containing PFA*
 - *B.S. 6610 Pozzolanitic pulverised fuel ash cement*

1.5.4.8 Guatemala

- NGO 41 044 87 “Muestreo y métodos de análisis de cenizas volantes de carbón y puzolanas naturales empleadas como aditivo mineral al hormigón (concreto) de cemento portland”.

Figura 4 Partícula de carbón devolatilizado



Fuente (2)

2. CEMENTOS MEZCLADOS HIDRÁULICOS

2.1 Definición

Un cemento mezclado hidráulico es aquel en el cual parte del clinker es sustituido básicamente por un material puzolánico, que una vez pulverizado fija hidróxido de calcio a temperatura ambiente formando compuestos con propiedades hidráulicas al entrar en contacto con la cal y el agua, de acuerdo a la Norma COGUANOR 41 001, Cementos Definiciones y Nomenclatura.

2.2 Tipos de cementos mezclados, de acuerdo a las normas ASTM

2.2.1 Cementos mezclados hidráulicos

En la norma ASTM C-595 “*Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*” (Especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados) se definen los siguientes tipos:

- Cemento Portland de Escoria de Alto Horno
- Cemento Portland Puzolánico
- Cemento de Escoria
- Cemento Portland Puzolánico Modificado
- Cemento Portland de Escoria Modificado

2.2.2 Cementos de mampostería

Al final de la década de los 20, los fabricantes de cemento Portland de Estados Unidos, empezaron a formular combinaciones especiales de cemento y plastificantes para la industria de la mampostería. En la norma ASTM C-91 "*Standard Specification for Masonry Cement*" (Especificación estándar para cemento de mampostería), se definen los siguientes tipos:

- Tipo M
- Tipo N
- Tipo S

2.3 Normativa aplicable

- **ASTM C-595** "*Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*" (Especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados).
- **ASTM C-91** "*Standard Specification for Masonry Cement*" (Especificación estándar para cemento de mampostería).
- **COGUANOR 41001**, Cementos Definiciones y Nomenclatura.

2.4 Ventajas

Los cementos mezclados producen un menor calor de hidratación, sin embargo, hay quienes afirman que la elaboración de los mismos complican los procesos de transporte, dosificación, molienda y almacenaje, además de presentar el producto final un fraguado tardío y una variabilidad tanto física como química, lo cual ha creado un prejuicio en el consumidor que ha limitado la expansión del producto dentro del mercado.

La trabajabilidad de los concretos elaborados a base de cementos mezclados es sin duda mejor que la obtenida con cemento Portland, hecho que resulta importante en los concretos pobres, reduciendo al mismo tiempo el módulo de elasticidad y el deslavado que minimizan el agrietamiento. De la misma forma, el tiempo de fraguado tiende a ser mayor en los cementos mezclados al desarrollarse las reacciones hidráulicas con menor rapidez, sobretodo en el caso de la arena volcánica y la escoria, hecho que puede ser contrarrestado con un aumento en la finura del cemento.

La mayor resistencia que presentan los cementos puzolánicos al ataque de agentes químicos en general, es atribuible a la eliminación de hidróxido de calcio constituido durante la hidratación del cemento por los compuestos formados en la reacción con la puzolana.

El aumento de resistencia a la compresión y de impermeabilidad en los cementos mezclados, encuentra su origen en la formación de fases menos densas, así como de poros de menor tamaño, hecho que permite alcanzar mayor durabilidad y mejorar la resistencia al ataque de sulfatos, sobretodo en cementos con adición de escoria de alto horno. Sin duda alguna las ventajas más grandes que presentan los cementos mezclados en la construcción radican en:

- incremento en la capacidad de producción con inversiones limitadas y realización rápida.
- reducción de los costos de energía necesaria para la cocción del *clinker*.
- utilización óptima de materia primas.
- mayor resistencia al ataque de medios agresivos.

La elaboración de cementos mezclados constituye además una intersección con la energía, economía y ecología, ya que hasta la fecha en muchos países es apreciable la reducción de la cantidad de energía consumida para la cocción del *clinker*, sobretodo en Estados Unidos y Canadá; obteniéndose de igual forma mejoras en algunas de las propiedades del cemento a través de una considerable disminución de problemas ambientales derivados de las emisiones emitidas durante el proceso de fabricación del material.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Muestreo de la ceniza volante

Se realizó en las instalaciones de la empresa San José Power Station, ubicada en la Autopista Escuintla Puerto Quetzal km 76, donde se produce electricidad por medio de la quema de carbón mineral; luego fue trasladada al Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC. para su preparación y evaluación. Se realizaron los ensayos necesarios para calificarla como puzolana artificial, de acuerdo a las norma ASTM C-311 y C-618.

3.2 Determinación del carbón residual de la ceniza volante

Según la información proporcionada por la empresa San José Power Station, se considera que la ceniza volante puede tener algún remanente de contenido de carbón sin quemar, por lo cual se evaluó este parámetro. Se determina la pérdida por ignición en base seca, el resultado se expresa en porcentaje. (ver anexo 2)

3.3 Propuesta de cemento mezclado CCV₇₀₋₃₀ (cemento Portland tipo I + ceniza volante)

Los materiales fueron mezclados en un molino de bolas por treinta minutos, con el propósito de lograr un material homogéneo, para lo cual se prepararon bolsas de 22 kg con las siguientes proporciones en masa:

- 70 % cemento Portland Tipo I.
- 30 % ceniza volante.

3.3.1 Materiales

- Cemento mezclado (CCV 70-30 %).
- Cemento Portland Tipo I.
- Cemento mezclado UGC .
- Mezcla control (MCccug 100 % CUG).
- Mezcla cemento mezclado (MCM_{CCV 70-30 %}).

3.4 Resultados (ver anexos 1 y 2)

3.4.1 Caracterización de la ceniza volante como puzolana artificial (ASTM C-311 y C-618)

3.4.1.1 Física mecánica

Tabla III Resultados físico mecánicos ceniza volante

Resultados caracterización ceniza volante,			
Parámetro	Resultados	Especificaciones ASTM C-618	
		Clase C	Clase F
Fineza (%máx. retenido tamiz No. 325)	28.4	34	34
Índice de actividad de resistencia con cemento portland	42.0	75	75
Estabilidad volumen (%)	1.0	0.8	0.8
Expansión, contracción al autoclave (%)	0.9	0.8	0.8
Gravedad específica g/cm³	2.31 g/cm ³	No específica	No específica

3.4.1.2 Química

Tabla IV Resultados químicos ceniza volante

Parámetro (%)	Resultado	Especificaciones ASTM C-618
Dióxido de silicón	--	No especifica
Trióxido de azufre	0.48	Máximo 3.0
Óxido de calcio	0.42	No especifica
Óxido de magnesio	0.60	No especifica
Óxido de aluminio	4.59	No especifica
Volátiles a 80 °C	0.47	No especifica
Contenido de humedad (%)	0.5	Máximo 2.0
Pérdida por ignición (%)	10.5	Máximo 3.0
Fracción soluble	1.24	No especifica

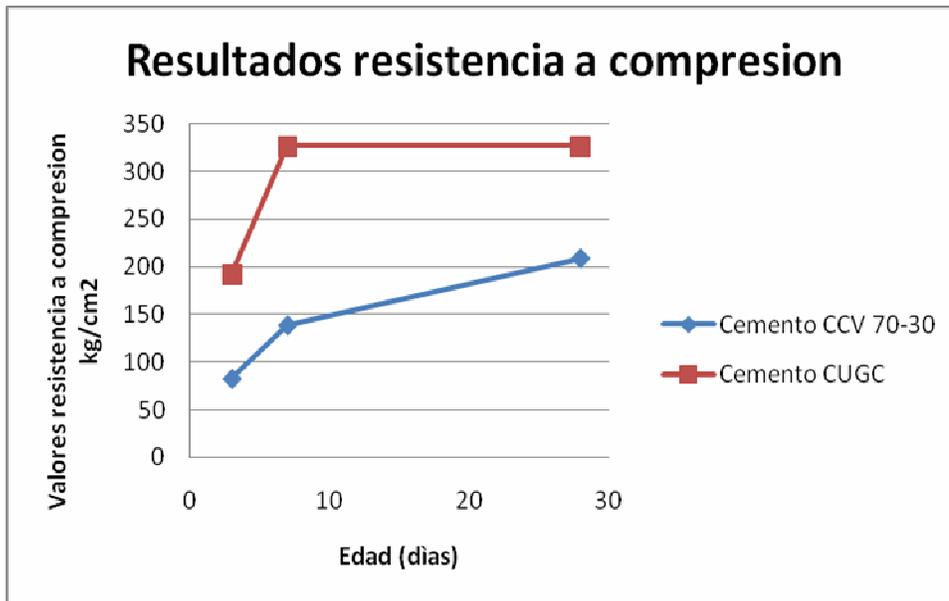
3.4.2 Evaluación cementos mezclados (norma ASTM C-595)

3.4.3 Física mecánica

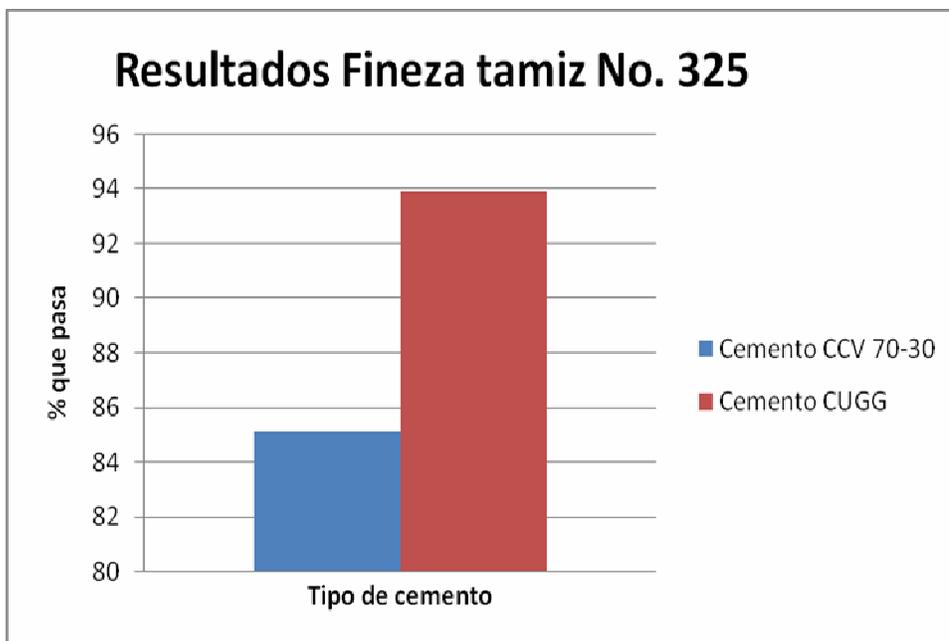
Tabla V Resultados físico mecánicos, cementos CCV 70-30 %, CUGC

Parámetro	CCV _{70-30%}	CUGC	Especificaciones ASTM C-595	
Fineza por Tamiz No. 325 (% pasa)	85.13	93.92	No especifica	
Expansión en Autoclave (%)	0.29	0.10	No especifica	
Superficie Específica Blaine (cm ² /g)	2666.0	3900.0	No especifica	
Consistencia Normal (%)	34.0	27.0	10 ± 1 mm de penetración	
Fraguado Vicat (min.)	Inicial: 335	Inicial: 212	Inicial: No menos de 45 min. Final: No más de 7 horas	
	Final: 450	Final: 324		
Peso Específico (g/cm ³)	2.61	2.86	No especifica	
Contenido de Aire en mortero (%)	4.5	-	Máximo 12.0	
Resistencia a la compresión kg/cm ²	3 días	82.0 kg/cm ²	192.0 kg/cm ²	Mínimo 133 kg/cm ²
	7 días	138.2 kg/cm ²	326.6 kg/cm ²	Mínimo 204 kg/cm ²
	28 días	208.6 kg/cm ²	326.6 kg/cm ²	Mínimo 255 kg/cm ²
Contracción de secado (%)	2.2	-	No especifica	

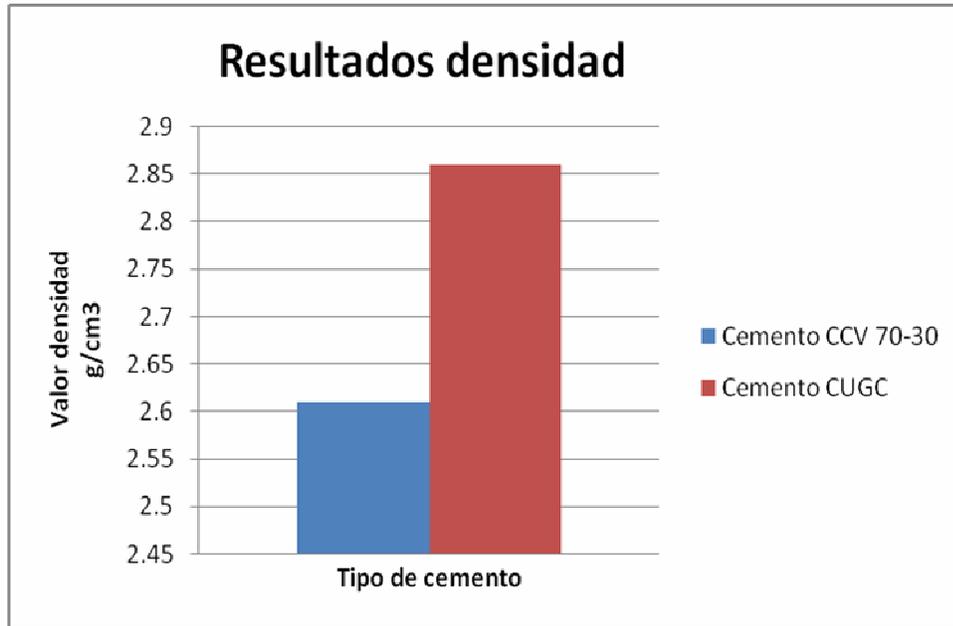
**Figura 5 Resultados resistencia a compresión
cementos CUGC, CCV₇₀₋₃₀ %**



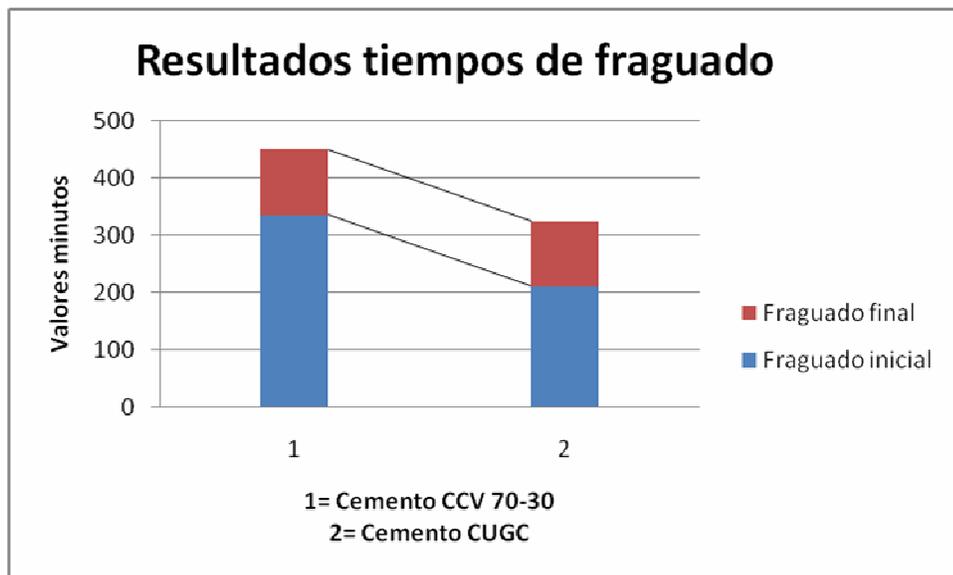
**Figura 6 Resultados fineza tamiz No. 325
cementos CUGC, CCV₇₀₋₃₀ %**



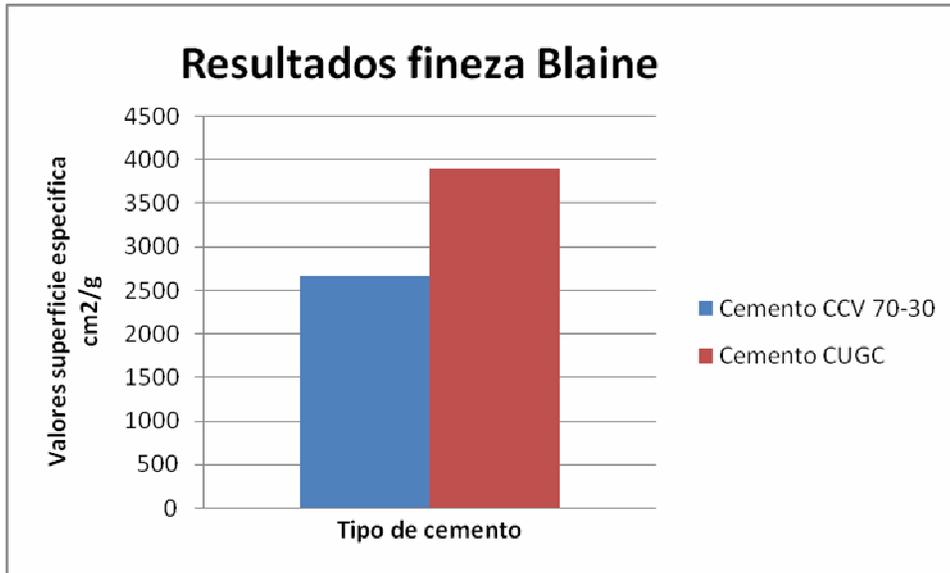
**Figura 7 Resultados densidad
cementos CUGC, CCV₇₀₋₃₀ %**



**Figura 8 Resultados fraguado Vicat
cementos CUGC, CCV₇₀₋₃₀ %**



**Figura 9 Resultados fineza Blaine
cementos CUGC, CCV₇₀₋₃₀ %**



**Figura 10 Máquina universal,
ensayos resistencia mecánica**



**Figura 11 Mesa de flow normalizada,
control trabajabilidad morteros**



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Materiales

4.1.1 Cemento Portland tipo I

Cumple con lo indicado en la norma ASTM C-150, por lo que se puede utilizar para preparar cementos mezclados.

4.1.2 Cemento mezclado UGC

Cumple con lo indicado en la norma ASTM C-595, sirve de referencia para los resultados de la caracterización del cemento CCV_{70-30%}.

4.2 Ceniza volante (normas ASTM C-311, C-618)

4.2.1 Ensayos físico mecánicos

- Fineza: el resultado obtenido se encuentra dentro de las especificaciones para cenizas volantes indicadas en la norma.
- Índice de actividad puzolánica: el resultado obtenido se encuentra fuera de las especificaciones para cenizas volantes indicadas en la norma.
- Estabilidad del volumen: el resultado obtenido se encuentra fuera de las especificaciones para cenizas volantes indicadas en la norma.
- Expansión o contracción al autoclave: el resultado obtenido se encuentra fuera de las especificaciones para cenizas volantes indicadas en la norma.

- Gravedad específica: este parámetro no se encuentra especificado en esta norma, únicamente se indica sobre la variabilidad que puede existir entre los resultados obtenidos en el laboratorio.

4.2.2 Ensayo químicos

No se pudieron evaluar todos los parámetros indicados en las especificaciones de la norma, los valores de los óxidos de interés (sílice, aluminio y hierro), están bajos lo cual influye en su comportamiento mecánico, así mismo el resultado de la pérdida por ignición es alto, lo que evidencia un contenido de carbón residual no adecuado para su uso como puzolana artificial.

4.3 Cemento mezclado CCV_{70-30} % (norma ASTM C-595)

4.3.1 Ensayos físico mecánicos

- Fineza
 - Tamiz No. 325: este parámetro no se encuentra especificado en esta norma, el valor del CUGC es mayor al CCV_{70-30} %. (ver Figura No. 6)
 - Superficie específica *Blaine*: el resultado obtenido se encuentra fuera de las especificaciones para cementos mezclados indicadas en esta norma, el valor del CUGC es mayor al CCV_{70-30} %. (ver Figura No. 8)
- Expansión en autoclave: el resultado obtenido se encuentra fuera de las especificaciones para cementos mezclados indicadas en la norma el valor del CUGC es menor al CCV_{70-30} %.
- Consistencia normal: el resultado obtenido se encuentra fuera de las especificaciones para cementos mezclados indicadas en la norma, el valor del CUGC es menor al CCV_{70-30} %.

- Fraguado Vicat: el resultado obtenido para el fraguado inicial cumple las especificaciones, no así el fraguado final que se encuentra fuera de las especificaciones indicadas en la norma para cementos mezclados, los valores del CUGC son menores a los del $CCV_{70-30} \%$. (ver Figura No. 7)
- Peso específico: este parámetro no se encuentra especificado en esta norma, el valor del CUGC es menor al $CCV_{70-30} \%$.
- Contenido de aire en mortero: el resultado obtenido cumple las especificaciones para cementos mezclados indicadas en la norma.
- Resistencia a la compresión: los resultados obtenidos en las tres edades se encuentran fuera de las especificaciones para cementos mezclados indicadas en la norma, la tendencia observada en el $CCV_{70-30} \%$ es ganar resistencia conforme la edad aumenta, los valores del CUGC son mayores a los del $CCV_{70-30} \%$ en todas las edades ensayadas. (ver Figura No. 6)
- Contracción de secado: este parámetro no se encuentra especificado en esta norma.

CONCLUSIONES

1. Es necesario que la ceniza volante tenga como origen un proceso adecuado, que permita obtener las mejores características para su aprovechamiento como adición.
2. Debido a la variabilidad en la composición de las cenizas volantes, deberán de realizarse estudios previos, de laboratorio, para cada caso en particular.
3. La ceniza volante evaluada no cumple con lo indicado en la norma ASTM C-618, por lo que su uso como puzolana es limitado.
4. El valor de la fineza de la ceniza volante evaluada, cumple con la especificación de la norma ASTM C-618.
5. Los resultados del índice de actividad de resistencia con cemento Portland; la estabilidad del volumen, al igual que la expansión o contracción al autoclave de la ceniza volante, no cumplen con las especificaciones de la norma ASTM C-618.
6. Los resultados de la composición química de la ceniza volante, principalmente, en lo que se refiere a los óxidos de interés no son adecuados.
7. El cemento mezclado evaluado $CCV_{70-30\%}$, no cumple con las especificaciones de la norma ASTM C-595.

8. El porcentaje de carbón residual sin quemar en las cenizas volantes, perjudica su desempeño como adición en cementos o concretos.

9. El color de las cenizas varía de acuerdo al tipo de carbón y procesos de combustión utilizados, esto puede influir en la presentación del cemento o concreto.

RECOMENDACIONES

1. Impulsar la investigación y reutilización de los subproductos con características de materiales puzolanicos, que se generan en la industria.
2. Impulsar el estudio y uso de cementos mezclados con cenizas volantes, como una alternativa de mitigación del impacto ambiental producido por la obtención de este material y la producción de cementos tradicionales.
3. Evaluar otras aplicaciones de las cenizas volantes en procesos constructivos como mezclas de concretos, morteros o elementos prefabricados.
4. Evaluar otras aplicaciones de las cenizas volantes en distintas áreas, como relleno, tratamiento de algunos desechos peligrosos, etc.
5. Evaluar la alternativa de utilizar la ceniza volante con un contenido menor de carbón residual, que cumpla con lo indicado en la norma ASTM C-618.
6. Incrementar la fineza del material y evaluar sus uso en estas condiciones, como adición a cementos o concretos.

7. Evaluar una proporción de cemento mezclado UGC con ceniza volante, que cumpla los requisitos de la norma ASTM C-595.

REFERENCIAS

1. Godoy Fernández, Oscar Rodrigo. Desarrollo y actualidad de los cementos mezclados hidráulicos". Trabajo de Graduación Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006.
2. [www.Fly ash research center.org](http://www.Flyashresearchcenter.org).
3. <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/2095/altbgn3.htm>
4. Alonso, M.C, y M. P. Luxán. **Aplicaciones de las cenizas volantes en el Campo de la construcción.** Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar Rivas Roberto Alejandro, **Metalurgia Básica**, Ministerio de Energía y Minas Dirección de Energía Nuclear. INTECAP, Guatemala, C.A., mayo 1986.
2. Castañeda Lemus, Sergio Vinicio. Evaluación de admixturas para concreto de acuerdo a la norma COGUANOR NGO 41 0044 87 “muestreo y métodos de análisis de cenizas volantes de carbón y puzolanas naturales empleadas como aditivo mineral al hormigón (concreto) de cemento Portland”. Trabajo de Graduación Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2000.
3. Molina Escobar, Kenneth Alejandro. Evaluación de morteros para albañilería y revestimientos elaborados a base de cementos mezclados con escorias de horno. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2006.
4. Caballeros García Carlos Estuardo. Relación entre la composición elemental en Barras No. 3 de Acero Grado 40 y su módulo de elasticidad. Trabajo de Graduación Ingeniero Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala 1997.

5. Godoy Fernández, Oscar Rodrigo. Desarrollo y actualidad de los cementos mezclados hidráulicos. Trabajo de Graduación Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006.

5. **Valorización de las cenizas volantes en la industria cementera.**
WWW.gem.materiales/document/document/g05/d05201/d05201.htm

6. **WWW.moxie-intl.com/glossary.htm**

ANEXOS

1. Informe Sección de Aglomerantes y Morteros, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC. 2007
2. Informe Sección de Química Industrial, Centro de Investigaciones de Ingeniería. 2006



Orden de Trabajo No. 20933

Informe No. 010/2007 S. AM

Interesado: Jacobo Martínez
Proyecto: Trabajo de graduación "Evaluación de la ceniza volante producida por la combustión de carbón, en la planta generadora San José Power Station para utilizarse como puzolana artificial"
Asunto: Caracterización Físico-Mecánica de Puzolanas.
Fecha: 30 de Agosto de 2007.

- 1. Generalidades:** el interesado proporcionó una bolsa de Ceniza Volante, Cemento Portland Tipo I y una bolsa de Cal Hidratada.
- 2. Procedimiento:** se trabajó de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM C-311.
- 3. Resultados:**

3.1 Ceniza Volante

RESULTADOS CARACTERIZACIÓN CENIZA VOLANTE. ASTM C-311			
Parámetro	Ceniza volante	Especificaciones ASTM C-618	
		Clase C	Clase F
Fineza (% máx. Retenido tamiz No. 325)	28.4 %	34	34
Índice de actividad de resistencia con cemento portland	*	75	7508
Estabilidad volumen (%)	1.0	0.8	0.8
Expansión o contracción al autoclave (%)	0.9 %	0.8	0.8
Gravedad específica (g/cm ³)	2.31 g/cm ³	No especifica	No especifica

* No fue posible evaluar.



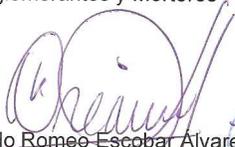
3.2 Cemento Mezclado (70 % Cemento Pórtland + 30 Ceniza Volante y Cemento Portland UGC Tipo I)

Parámetro	CCV 70-30	CUGC	Especificaciones ASTM C-595	
Fineza por Tamiz No. 325 (% retenido)	85.13	93.92	No especifica	
Expansión en Autoclave (%)	0.29	0.10	No especifica	
Superficie Especifica Blaine (cm ² /g)	2666.0	3900.0	No especifica	
Consistencia Normal (%)	34.0	27.0	10 ± 1 mm de penetración	
Fraguado Vicat (min)	Inicial: 335	Inicial: 212	Inicial: No menos de 45 min. Final: No más de 7 horas	
	Final: 450	Final: 324		
Peso Especifico (g/cm ³)	2.61	2.86	No especifica	
Contenido de Aire en mortero (%)	4.5	*	Máximo 12.0	
Resistencia a la compresión kg/cm ²	3 días	81.78	191.45	Mínimo 133 kg/cm ²
	7 días	137.98	245.37	Mínimo 204 kg/cm ²
	28 días	208.28	326.08	Mínimo 255 kg/cm ²
Contracción de secado (%)	2.2	*	No especifica	

* No fue posible evaluar.

Atentamente,


Inga. Dilma Yanet Mejicanos-Jol
Jefa Sección Aglomerantes y Morteros


Vo. Bo. Ing. Oswaldo Romeo Escobar Alvarez
Director Centro de Investigaciones de Ingeniería





CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



O.T. No. 20916
Inf. Lab. 15-07

Interesado: Jacobo Martínez
Muestra: 1 bolsa de ceniza de carbón mineral.
Fecha: Guatemala, 9 de abril de 2007

Determinación de volátiles, pérdida por ignición, contenido de humedad, trióxido de azufre utilizando métodos gravimétricos y óxido de aluminio, óxido de calcio, óxido de magnesio utilizando métodos complejométricos.

Parámetro*	Resultado (%)
Óxido de Calcio	0.42
Óxido de Magnesio	0.60
Trióxido de azufre	0.48
Óxido de Aluminio	4.59
Volátiles a 80 °C	0.47
Contenido de humedad	0.50
Pérdida por ignición	10.52
Fracción Soluble	1.24

* Muestra proporcionada por el interesado.

Ing. César Alfonso García Guerra
Jefe
Sección Química Industrial - CH



Vo. Bo. Ing. Oswaldo Romeo Escobar Alvarez
Director
Centro de Investigaciones de Ingeniería

