



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

**LA UTILIZACIÓN DE CÁSCARA DE ARROZ BAJO EL PROCESO DE
CALCINACIÓN CONTROLADA COMO PUZOLANA ARTIFICIAL EN EL
DISEÑO DE MORTEROS PARA ACABADOS**

Belcky María de los Angeles Juárez Quevedo

Asesorado por la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Guatemala, agosto de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**LA UTILIZACIÓN DE CÁSCARA DE ARROZ BAJO EL PROCESO DE
CALCINACIÓN CONTROLADA COMO PUZOLANA ARTIFICIAL EN EL
DISEÑO DE MORTEROS PARA ACABADOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

BELCKY MARÍA DE LOS ANGELES JUÁREZ QUEVEDO
ASESORADO POR LA INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy OlympoPaiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy OlympoPaiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Avila
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

LA UTILIZACIÓN DE CÁSCARA DE ARROZ BAJO EL PROCESO DE CALCINACIÓN CONTROLADA COMO PUZOLANA ARTIFICIAL EN EL DISEÑO DE MORTEROS PARA ACABADOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha mayo de 2011.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Belcky María de los Angeles Juárez Quevedo', written over a faint circular stamp.

Belcky María de los Angeles Juárez Quevedo



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



Guatemala, 9 de mayo de 2012

Ingeniero
Guillermo Francisco Melini Salguero
Área de Materiales y Construcciones Civiles
COORDINADOR

Ingeniero Melini

Me dirijo a usted para informarle, que he revisado el trabajo de graduación **LA UTILIZACIÓN DE CASCARA DE ARROZ BAJO EL PROCESO DE CALCINACIÓN CONTROLADA COMO PUZOLANA ARTIFICIAL EN EL DISEÑO DE MORTEROS PARA ACABADOS**, elaborado con la estudiante universitaria Belcky Maria de los Angeles Juárez Quevedo , quien contó con la asesoría de la suscrita.

Considerando que el trabajo desarrollado por la estudiante universitaria Juárez Quevedo, satisface los requisitos exigidos en el reglamento de graduación, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,

"Id y enseñad a todos"

Inga. Civil Dilma Yanet Mejicanos Jol
Col. 5947
ASESORA

Dilma Y. Mejicanos Jol
Ingeniera Civil
Col. 5947



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
11 de julio de 2012

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **LA UTILIZACIÓN DE CASCARA DE ARROZ BAJO EL PROCESO DE CALCINACIÓN CONTROLADA COMO PUZOLANA ARTIFICIAL EN EL DISEÑO DE MORTEROS PARA ACABADOS** desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Belcky María de los Angeles Juárez Quevedo, quien contó con la asesoría de la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

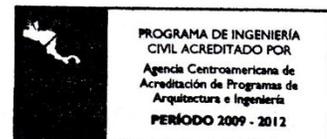
Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Cívicas
FACULTAD DE INGENIERIA
ÁREA DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Más de 130 Años de Trabajo Académico y Mejora Continua





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero al trabajo de graduación de la estudiante Belcky María de los Angeles Juárez Quevedo, titulado **LA UTILIZACIÓN DE CÁSCARA DE ARROZ BAJO EL PROCESO DE CALCINACIÓN CONTROLADA COMO PUZOLANA ARTIFICIAL EN EL DISEÑO DE MORTEROS PARA ACABADOS**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, agosto de 2012.

/bbdeb.

Más de 130 Años de Trabajo Académico y Mejora Continua

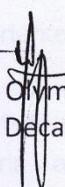




DTG. 403.2011

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: **LA UTILIZACIÓN DE CÁSCARA DE ARROZ BAJO EL PROCESO DE CALCINACIÓN CONTROLADA COMO PUZOLANA ARTIFICIAL EN EL DISEÑO DE MORTEROS PARA ACABADOS**, presentado por la estudiante universitaria **Belcky María de los Angeles Juárez Quevedo**, autoriza la impresión del mismo.

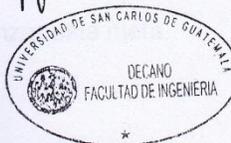
IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 28 de agosto de 2012

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

**Mi padre,
José Rodolfo
Juárez**

Gracias por tu ejemplo de lucha, por tus enseñanzas y por tu sacrificio día a día que me ha llevado a conseguir orgullosamente las metas que me he propuesto.

**Mi madre,
María Angela
Quevedo**

Gracias por tu infinito amor, ejemplo de lucha, por velar mis sueños y compartir mis ilusiones, sobre todo por tu entrega para mostrarme un nuevo amanecer.

Mis sobrinos

Lucia y Santiago, gracias por su amor, alegría y por enseñarme que en esta vida debo estar contenta sin motivo, a estar siempre ocupada y a saber exigir y luchar con todas mis fuerzas aquello que desee, ello me muestra que como niña todo lo puedo lograr.

Mis hermanas

Isabel y Nohelia, por su ejemplo que ha sido importante en mi vida.

**Tía
Bernarda Quevedo**

Por sus consejos, el enseñarme a luchar por la victoria aún pérdida la batalla impulsándome a alcanzar esta meta.

Ernesto Marroquín

Por ser parte de mi vida, por compartir los días entre juegos y risas, creando fantasías, curando el corazón, buscando sin descansar aquel lugar secreto que nos dé amor, por emprender un nuevo vuelo día a día y por hacer el tiempo de ti.

Kika Juárez Quevedo

Por ser mi mejor amiga.

AGRADECIMIENTOS A:

**Dios padre y
María Santísima**

Por concederme la sabiduría y tenacidad, por ser luz de mí camino y por su infinita misericordia.

**Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Por ser fuente de conocimiento y constructora de sueños.

Inga. Dilma Mejicanos Jol

Por su dedicación, asesoramiento y elaboración del presente trabajo, sobre todo por su amistad y confianza en mi persona.

**Centro de Investigaciones
de Ingeniería**

Especialmente a cada uno de los integrantes de la sección de agregados, concretos y morteros, por las enseñanzas e instrucción brindada, pero sobre todo por su amistad, apoyo, confianza y alegrías. Con cariño.

**Instituto del Cemento y
del Concreto ICCG**

Especialmente al Ing. Emilio Beltranena por su conocimientos y colaboración para la realización de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. PUZOLANAS	1
1.1. Origen e historia de las puzolanas	1
1.2. Definición	1
1.3. Clasificación de las puzolanas	2
1.4. Descripción de las puzolanas	4
1.4.1. Puzolanas naturales.....	4
1.4.2. Puzolanas artificiales.....	6
1.5. Propiedades de las puzolanas	9
1.6. Uso de las puzolanas.....	13
1.6.1. Adición mineral al cemento	13
1.6.2. Adición mineral al concreto o mortero	15
1.6.3. Otros usos.....	16
1.7. Ventajas del uso de puzolanas	17
1.7.1. Ventajas como una adición al cemento.....	17
1.7.2. Ventajas como una adición al concreto.....	18
1.7.3. Trabajabilidad.....	19
1.7.4. Resistencia.....	20
1.7.5. Durabilidad	21

1.8.	Cáscara de arroz	23
1.8.1.	Propiedades de la cáscara de arroz	24
1.9.	Producción de arroz en Guatemala	26
1.9.1.	Aspectos productivos.....	26
1.10.	Ceniza de cáscara de arroz.....	30
1.10.1.	Características.....	30
1.10.2.	Tipos.....	31
1.10.3.	Métodos de elaboración.....	33
1.10.4.	Normativa existente	39
2.	ANTECEDENTES DE LA UTILIZACIÓN DE PUZOLANA COMO ADICIÓN MINERAL DEL CEMENTO Y ADICIÓN MINERAL DEL CONCRETO Y MORTERO	43
2.1.	Definición.....	43
2.2.	Cementos con adiciones	44
2.3.	Adición mineral del cemento.....	46
2.3.1.	Normas de requisitos	46
2.3.2.	Normas de métodos de ensayos	47
2.4.	Adición mineral del concreto o mortero	47
2.4.1.	Normas de requisitos	47
2.4.2.	Normas de métodos de ensayos	47
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	55
3.1.	Muestreo de la cáscara de arroz	55
3.2.	Obtención de la ceniza de cáscara de arroz o puzolana artificial	56
3.3.	Calcinación de la cáscara de arroz.....	57
3.4.	Requisitos de la puzolana para su uso en cementos Portland adicionados de acuerdo a la Norma ASTM C 595.....	58

3.4.1.	Resultados	59
3.5.	Composición química de la ceniza de cáscara de arroz alrededor de varios países.....	62
3.6.	Especificación de la ceniza de cáscara de arroz como puzolana artificial para concreto o mortero, siguiendo los métodos de prueba a cenizas volantes o puzolanas naturales para uso en cemento Portland, para concreto ASTM C 618, ASTM C 311	63
3.6.1.	Resultados	64
3.7.	Especificaciones y propiedades mecánicas para las cenizas volantes y puzolanas para su uso con cemento ASTM C 311 y su uso con cal ASTM C 593.....	68
3.7.1.	Resultados	68
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	75
4.1.	Materiales.....	75
4.2.	Ceniza volante (Norma ASTM C 311, C 618)	75
4.2.1.	Ensayos químicos	75
4.2.2.	Ensayos físicos	76
4.3.	Cemento y puzolana artificial para su uso con cal en mortero para acabados (Norma ASTM C 593).....	77
4.3.1.	Ensayos físico mecánicos	77
	CONCLUSIONES	79
	RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFÍA.....	83
	ANEXOS	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Clasificación de los materiales puzolánicos	3
2.	Puzolanas naturales	5
3.	Trabajabilidad en mortero y concreto.....	20
4.	Resistencia en el concreto y mortero	21
5.	Durabilidad en el mortero y concreto	22
6.	Limpieza del arroz, residuo la cáscara de arroz.....	23
7.	Distribución de la producción de arroz a nivel nacional	28
8.	Principal procedencia y destino del comercio de arroz por volumen	28
9.	Cáscara de arroz en estado natural.....	32
10.	Cáscara de arroz parcialmente quemada	32
11.	Ceniza reactiva de color gris oscura a blanca.....	33
12.	Ceniza de cáscara de arroz después de la combustión controlada con un cierto porcentaje de carbono residual	33
13.	Horno de ladrillo para la calcinación de cáscara de arroz.....	36
14.	Calcinador de lecho fluido para cáscara de arroz	38
15.	Muestreo y almacenamiento de la cáscara de arroz.....	55
16.	Diagrama de flujo de la obtención de la ceniza.....	56
17.	Diagrama de las variables a considerar para la ceniza de cáscara de arroz.....	57
18.	Mufla utilizada para la calcinación de la cáscara de arroz	58
19.	Finura, retenido tamiz 45 μ m (No. 325)	60
20.	Índice de actividad puzolánica con cemento.....	61
21.	Índice de actividad puzolánica con cal.....	61

22.	Finura, retenido tamiz 45 μm (No. 325)	65
23.	Aumento de la contracción por secado de barras de mortero	66
24.	Resistencia a compresión, mezcla control.....	71
25.	Resistencia a compresión mezcla, cemento más puzolana y arena estándar.....	71
26.	Resistencia a compresión, mezcla cal más puzolana y arena estándar.....	72
27.	Resultados del desarrollo del índice de actividad puzolánica.....	73
28.	Resultados del desarrollo de la fuerza cal con puzolana.....	73
29.	Resultados resistencia a compresión de cubos.....	74

TABLAS

I.	Clasificación y composición de las adiciones	12
II.	Cantidad de ceniza por distintos cereales	24
III.	Composición química de la cáscara de arroz	25
IV.	Características físicas de la cáscara de arroz.....	25
V.	Producción de arroz paddy (con cáscara) a nivel nacional	27
VI.	Efecto de las condiciones de combustión en las propiedades que presenta la ceniza de cáscara de arroz	34
VII.	Principales aplicaciones de los cementos hidráulicos con adiciones	45
VIII.	Requisitos de la puzolana para su uso en cementos Portland adicionados	46
IX.	Clasificación de las puzolanas según Norma ASTM C 618	48
X.	Requerimientos químicos según la Norma ASTM C 618	49
XI.	Requerimientos físicos según la Norma ASTM C 618	50
XII.	Requerimientos suplementarios según Norma ASTM C 618.....	52

XIII.	Resultados y requisitos de los ensayos físicos y mecánicos que debe poseer la ceniza de cáscara de arroz calcinada para la adición al cemento	59
XIV.	Composición química representativa en países como Estados Unidos de Norte América, Bangkok, Kapur, Japón, de la ceniza de cáscara de arroz	63
XV.	Resultados de la composición química de la ceniza de cáscara de arroz calcinada (Guatemala).....	64
XVI.	Resultados de los análisis físicos de la ceniza de cáscara de arroz calcinada (Guatemala).....	65
XVII.	Resultados de los análisis físicos mecánicos de la ceniza de cáscara de arroz calcinada, desarrollo de la fuerza cemento puzolana	69
XVIII.	Resultados de los análisis físicos mecánicos de la ceniza de cáscara de arroz calcinada, desarrollo de la fuerza cal puzolana.....	69
XIX.	Resultados de peso, área y resistencia a compresión del índice de fuerza con puzolana.....	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C	Carbono
cm	Centímetro
SO₂	Dióxido de azufre u óxido de sílice
g	Gramo
kg	Kilogramo
lb	Libra
psi	Libra por pulgada cuadrada
MJ	Megajouls
µm	Micrómetro o micra
AL₂O₃	Óxido de aluminio
CaO	Óxido de calcio
P₂O₅	Óxido de fósforo
Fe₂O₃	Óxido de hierro
MnO	Óxido de manganeso
MgO	Óxido de magnesio
K₂O	Óxido de potasio
SiO₂	Óxido de silicio o contenido de sílice
Na₂O	Óxido de sodio
pulg	Pulgada
SO₃	Trióxido de azufre

GLOSARIO

ACI	American Concrete Institute (Instituto Americano del Concreto).
Actividad puzolánica	Capacidad de la adición para combinarse con el hidróxido de calcio producido durante la hidratación del clinker de cemento portland formando compuesto que son también cementantes.
Adición	Material mineral que es incorporado al cemento, concreto o mortero en diferentes proporciones, a fin de mejorar o transformar sus propiedades.
Aditivo	Sustancias o productos inorgánicos u orgánicos que incorporados al concreto o mortero antes del amasado o durante el mismo producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido.
Aluminosilicato	Es un mineral que contiene óxido de aluminio (Al_2O_3) y sílice (SiO_2).
Antracita	Es el carbón mineral de más alto rango y el que presenta mayor contenido en carbono, hasta un 95 por ciento.

Arroz en paddy	Es el arroz con cáscara, antes de la limpieza.
ARROZGUA	Asociación Guatemalteca del Arroz.
ASTM	American Society for Testing Materials (Sociedad Americana para Prueba de Materiales).
Calor de hidratación	Es el calor que se genera por la reacción entre el cemento y el agua, depende, primariamente, de la composición química del cemento, relación agua cemento, finura del cemento y temperatura de curado también son factores que intervienen.
Celulosa	Es el compuesto orgánico en el tejido vegetal de la cáscara de arroz, elementos que ayuda a su buen rendimiento como combustible.
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.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas.
CII	Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Clinker	Es la principal materia prima de la que se obtiene el cemento está constituido por una especie de bolas de color grisáceo de tamaño similar al diámetro de una pelota de golf, aunque en ocasiones son más pequeñas.
<i>Fly ash</i>	Cenizas volantes que son subproductos de centrales termo eléctricas que utilizan carbón pulverizado como combustible.
Mortero	Mezcla constituida de material cementante, agregado fino, agua, con o sin aditivos empleada para obras de albañilería, como material de pega, revestimiento de paredes.
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.
RHA	Ceniza de cáscara de arroz.
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.

Trabajabilidad

Característica de una mezcla o mortero en cuanto a la facilidad que presenta para ser colocado.

UGC

Uso General en la Construcción.

RESUMEN

En la presente investigación se evaluó la ceniza de cascarilla de arroz calcinada, generada mediante el proceso de calcinación controlada, como puzolana artificial (ASTM C-311 y C-618), y como adición en cal para morteros plásticos y mezclas no plásticas, (ASTM C-593).

La cáscara de arroz fue homogenizada al momento del muestreo, luego se inicia el proceso de calcinación por medio de muflas, obteniendo la ceniza de cáscara de arroz caracterizada como una puzolana artificial que pasa por un proceso de molienda manual, luego se analizará y evaluará sus propiedades química, físicas y mecánicas, además de determinar el beneficio para las propiedades del cemento de acuerdo a las Normas ASTM y COGUANOR aplicables.

Los resultados obtenidos serán de utilidad para el uso de este desperdicio, aunque se recomienda profundizar más en los estudios, en virtud de que las propiedades de la ceniza volante es variable, dependiendo de factores de producción, y de la variación en el cultivo del arroz, lo que influye en la calidad del mortero que se utilice.

OBJETIVOS

General

Evaluar la cáscara de arroz calcinada como puzolana artificial en el mejoramiento del diseño de morteros para acabados, de acuerdo a las normas ASTM de referencia.

Específicos

1. Determinar el tipo de cultivo necesario para las plantaciones de arroz para que las propiedades químicas de la cáscara se encuentren entre el 1 y 5 por ciento.
2. Controlar la temperatura, a la cual se calcinará la cáscara de arroz para mejorar sus características y propiedades, como puzolana.
3. Llevar la cáscara de arroz a una fineza del 33 por ciento, según especificaciones de Norma ASTM C 595, para el uso como puzolana y determinación de la demanda de agua.
4. Comparar químicamente la composición de la cáscara de arroz calcinada con otros países consumidores en el área de la construcción.
5. Establecer la diferencia de resistencia de un mortero con adición puzolánica de cáscara de arroz respecto a un mortero control con arena estándar.

6. Determinar el contenido de carbón residual sin quemar, contenido en la cáscara de arroz calcinada para no perjudicar el desempeño de la puzolana y por utilizarse como una adición.
7. Analizar las propiedades mecánicas y físicas de los morteros con cal y puzolana, respecto al mortero control, para su trabajabilidad.
8. Diseñar morteros con puzolana y cemento UGC por ser el de mayor uso nacional, para mejorar sus propiedades.

INTRODUCCIÓN

La utilización del cemento desde su creación ha aumentado exponencialmente llevando a implementar nueva tecnología en la producción, en su forma básica, el cemento Portland es el principal material cementante en el concreto y mortero. Hoy en día la mayoría de las mezclas contienen adiciones al cemento, estos materiales son generalmente subproductos de otros procesos o materiales de origen natural, los cuales pueden ser o no procesados antes de ser utilizados.

Estos materiales son denominados puzolanas, que por sí mismos no tienen propiedades cementantes, pero cuando se utilizan con el cemento Portland, reaccionan para formar componentes cementantes, con mejores resultados de resistencia y adherencia.

Los morteros para recubrimientos y acabados forman parte de los materiales de construcción que se han venido utilizando desde la antigüedad. Desde este punto de vista, y debido a su impulso tecnológico, los morteros para acabados han sido fuente de estudio, con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas.

Siguiendo el avance de los conocimientos científicos y técnicos, se evaluará la cascarilla de arroz calcinada, analizando las propiedades químicas, físicas y mecánicas de dicha puzolana, obteniendo resultados que permitan conocer si dicha puzolana modifica las propiedades del mortero y características determinadas. Proporcionando así una utilidad más a la cascarilla de arroz.

1. PUZOLANAS

1.1. Origen e historia de las puzolanas

Los griegos, 400 A.C. fueron los primeros que emplearon puzolanas en morteros de cal. Más tarde, los romanos no sólo usaron piezas de cerámica, ladrillos y tejas pulverizadas para formar las primeras puzolanas artificiales, sino también descubrieron que algunos suelos volcánicos mezclados con cal eran excelentes para producir morteros hidráulicas (un mortero hidráulico fragua y endurece bajo el agua, siendo más duradero que un mortero corriente de cal). Tales suelos fueron encontrados en los alrededores de la población de Pozzuoli, cerca de Nápoles, y de aquí el nombre de puzolana.

El desarrollo del cemento hidráulico basado en una mezcla de puzolana y cal significó cambios radicales en el arte de la construcción de la era romana. El incremento de resistencia, sus propiedades hidráulicas, resistencia al agua del mar permitieron la construcción de arcos y bóvedas, así como estructuras marítimas. Mezclas de puzolana y cal sirvieron para dar impermeabilidad a baños, tanques y acueductos.

1.2. Definición

Las puzolanas son materiales naturales o artificiales que contienen sílice reactiva y/o aluminio, que tienen poca o ninguna calidad aglomerante, que mezcladas con cal en presencia de agua, fraguan y endurecen como un cemento. Asimismo, son ingredientes importantes en la producción de materiales alternativos al cemento Portland.

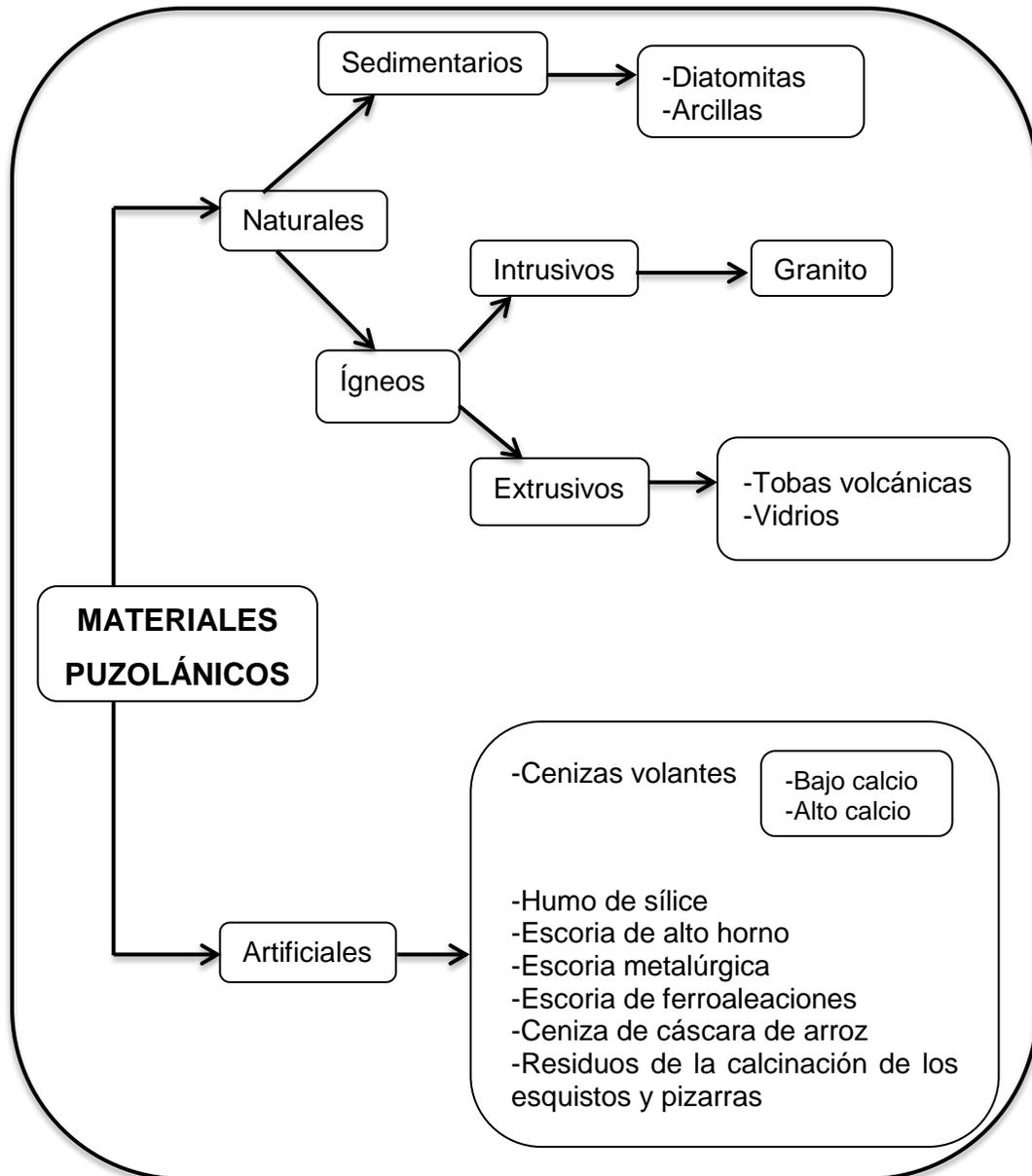
1.3. Clasificación de las puzolanas

Los materiales puzolánicos o adiciones activas de mayor interés en la industria del cemento pueden dividirse en dos grandes grupos: naturales y artificiales (subproductos industriales).

Al primer grupo pertenecen las verdaderas puzolanas y las tobas volcánicas, así como una serie de otros productos naturales, que tienen en común un comportamiento similar frente a la cal.

En el segundo grupo, están, principalmente, las escorias de horno alto, las cenizas volantes y las arcillas calcinadas. En la figura 1, puede verse una clasificación de dichos materiales.

Figura 1. Clasificación de los materiales puzolánicos



Fuente: elaboración propia.

1.4. Descripción de las puzolanas

Los materiales puzolánicos o adiciones activas de mayor puzolanidad se pueden dividir en dos grandes grupos: naturales (calcinados o no) y artificiales (subproductos industriales). En ambos grupos, existen productos que pueden tener un interés local más o menos grande. En el figura 1, puede observarse una clasificación de dichos materiales.

1.4.1. Puzolanas naturales

A este grupo pertenecen las verdaderas puzolanas y las tobas volcánicas, así como una serie de otros productos naturales, que tienen en común un comportamiento similar frente a la cal. Las puzolanas naturales son productos sialíticos, este nombre se debe al alto contenido en silicio y aluminio que contienen.

Las puzolanas naturales esencialmente son cenizas volcánicas de actividades volcánicas geológicamente recientes. El proceso de los materiales puzolánicos naturales incluye, usualmente, trituración, molienda y clasificación por tamaños, en algunos casos también se realiza una activación térmica, exceptuando las diatomitas todas las puzolanas naturales se derivan de rocas y minerales volcánicos.

Figura 2. **Puzolanas naturales**

- a. Piedra pómez y pumicita, es una materia prima; mineral de origen volcánico.
- b. Puzolana natural color roja



- c. Materiales puzolánicos después del proceso de molienda



Fuente: GÓMEZ, Gabriel. Materiales para ingeniería civil. Revista Universitaria. p. 42-50.

- **Cenizas volcánicas**

Se forman por erupciones de carácter explosivo, en pequeñas partículas que son templadas a temperatura ambiente, originando la formación del estado vítreo.

- Tufos o tobas volcánicas (zeolitas)

Producto de la acción hidrotermal sobre las cenizas volcánicas y de su posterior cementación diagenética.

- Tierras de diatomeas (diatomitas)

Es una puzolana de origen orgánico, formada por rocas porosas silíceas sedimentarias, en su mayor parte se forman por depósitos de caparzones o esqueletos silíceos procedentes de organismos unicelulares, tales como las algas acuáticas unicelulares (diatomeas) y los protozoos radiolarios.

Las tierras de diatomeas cuando son puras son materiales puzolánicos, sin embargo cuando están contaminadas con materiales arcillosos es necesario calcinarlas para mejorar su puzolanidad.

1.4.2. Puzolanas artificiales

Las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, generalmente como subproductos y materiales tratados térmicamente. Por ende se presenta un problema de almacenamiento produciendo un importante impacto medioambiental. De aquí el interés en que se utilicen como materia prima en otras industrias incrementando su consumo, lo que aporta las siguientes ventajas adicionales:

- Alargan la vida de los recursos naturales
- Rentabilización del residuo, mejorando el balance económico de la empresa generadora.

Se entra así en el concepto de gestión racional de las materias primas. Se pasa de un elemento contaminante a uno útil, lo que representa una acción regenerativa de la cual la técnica puede sentirse más satisfecha.

En este segundo grupo están, principalmente, las cenizas de la combustión de carbón, la sílice volatilizada (humo de sílice) durante ciertas operaciones metalúrgicas y escorias de alto horno granuladas de la metalurgia férrea y no férrea, las cenizas volantes, los residuos de la calcinación de los esquistos y pizarras (arcillas calcinadas) y ceniza de cascara de arroz (RHA).

- Humo de sílice (microsílice)

Es un subproducto de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico para la producción de silicio o aleaciones de ferrosilicio. El material que es extremadamente fino es colectado por filtración de los gases de escape del horno, en filtros de mangas. El humo de sílice puede ser mezclado con el clinker de cemento Portland en la cementera, o puede añadirse al hormigón.

- Cenizas volantes (fly ash)

Recientemente se les denomina cenizas de combustible pulverizadas (pulverised fuel ash PFA). Es un subproducto de centrales termoeléctricas que utilizan carbón pulverizado como combustible. Siendo un polvo fino constituido esencialmente de partículas esféricas.

Durante la combustión de carbón pulverizado cuando el carbón pasa por la zona de alta temperatura de la caldera (1500 ± 200 grados centígrados) el carbón y las materias volátiles se queman, mientras que la mayor parte de las

impurezas del carbón, como las arcillas, los feldespatos, etc., funden quedando como residuo.

Dependiendo del tipo de carbón de piedra, la cenizas de combustible pulverizada PFA contiene diversas proporciones de cal, la PFA de poca cal es puzolánica y la PFA con mucha cal tiene propiedades cementosas en si misma igual que en otras puzolanas, la cal liberada por la hidratación del cemento Portland se combina con la PFA para actuar como un material cementoso.

Las cenizas volantes de bajo calcio (Silico Aluminosas) tienen un elevado contenido en sílice y alúmina y consisten principalmente en partículas esféricas vítreas de aluminosilicatos, que contienen el hierro y los álcalis.

Las cenizas volantes de alto calcio (Silico Calcicas) contienen significantes cantidades de magnesia, álcalis y sulfatos y estructuralmente son más complejas que las de bajo calcio. La composición de la fase no cristalina es diferente de la de las de bajo calcio.

Las partículas esféricas, huecas, vidriosas de PFA tienen la misma finura que el cemento Portland, por lo que no es necesaria una mayor molienda. La adición de PFA genera un concreto fresco más trabajable (probablemente debido al efecto de cojinete de bolas de las partículas esféricas) y homogéneo (dispersando el cemento y distribuyendo uniformemente el agua).

La Norma ASTM C 618 define dos clases de cenizas volantes:

Clase F: Producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso, cenizas que poseen propiedades puzolánicas.

Clase C: Producidas por la calcinación de carbón subbituminoso o lignito. Esta clase de cenizas, además de tener propiedades puzolánicas, también tienen propiedades cementicias.

- Arcillas activas térmicamente

Las arcillas naturales no presentan actividad puzolánica a menos que su estructura cristalina sea destruida mediante un tratamiento térmico a temperaturas del orden de 600 a 900 grados centígrados.

- Ceniza de cáscara de arroz

Durante la operación de descascarillado del arroz se produce un material de baja densidad global y que, por tanto, representa un grave problema para su vertido o almacenamiento. Cada tonelada de arroz virgen produce 200 kilogramos de cascarilla, que después de su combustión produce aproximadamente 40 kilogramos de cenizas.

Si la combustión se realiza de forma incontrolada, las cenizas producidas están formadas, principalmente, por cristobalita y tridimita y deben de molerse muy finamente para que posean propiedades puzolánicas. Sin embargo, las cenizas producidas a baja temperatura contienen sílice en forma celular y no cristalina por consiguiente un producto altamente puzolánico.

1.5. Propiedades de las puzolanas

Las propiedades técnicas de los materiales con adiciones puzolánicas, se derivan, principalmente, de tres características de la reacción puzolánica:

- La primera: es una reacción lenta, al contrario que la reacción de hidratación del cemento que es rápida, por tanto, la velocidad de liberación del calor y el desarrollo de resistencias serán procesos más lentos.
- La segunda: es una reacción que consume hidróxido de calcio en vez de generarlo, lo que es importante para la durabilidad de las pastas hidratadas en ambientes ácidos.
- La tercera: es que al producirse en un tiempo posterior los productos de reacción rellenan, de forma muy eficiente, los espacios capilares que quedan después de la hidratación de los componentes del cemento, así se mejora la impermeabilidad y la resistencia mecánicas del sistema (menor porosidad).

Todas las puzolanas naturales y algunos subproductos industriales como todas las cenizas volantes de bajo contenido en calcio se adaptan a la definición dada de puzolana.

Sin embargo, algunos materiales de adición (por ejemplo, cenizas volantes silicocálcicas y escorias) tienen un elevado contenido en óxido de calcio (desde el 10 al 40 por ciento), parte de dicho calcio es disponible para la reacción puzolánica, obteniendo el material propiedades cementantes por sí mismo. Cuando esto ocurre, el material no debe de ser considerado simplemente como una puzolana, sino que es más apropiado denominarlo “puzolánico y cementante”.

Basándose en dicho criterio, características puzolánicas y/o cementantes, se ha propuesto una clasificación de los materiales de adición, que puede verse

en la tabla I, en dicha tabla se da la composición química y mineralógica ya que sus propiedades y no la procedencia del material determinan la influencia de la adición sobre el comportamiento del cemento, concreto u mortero que lo contiene.

Los ensayos químicos, no son suficientes para determinar la actividad o reactividad puzolánica. Por otra parte, el conocimiento separado de las propiedades de los constituyentes no permite prever el comportamiento de las mezclas, por lo que el problema es complejo. Sólo los resultados de los ensayos mecánicos (evolución de las resistencias mecánicas con el tiempo) permitirán sacar conclusiones.

Todos los materiales llamados puzolanas no poseen forzosamente esta propiedad de actividad o reactividad puzolánica, entonces en ciertos casos se puede activar dicha propiedad, para ello los procedimientos de activación pueden ser:

- Adición de productos químicos (activación química)
- Molienda a una finura más elevada (activación mecánica)
- Tratamiento térmico (activación térmica)

Tabla I. **Clasificación y composición de las adiciones**

Clasificación	Composición química y mineralógica
<p><u>I. Cementantes y puzolánicos</u> a. Escorias de alto horno granuladas.</p> <p>b. Cenizas volantes de alto calcio.</p>	<p>La mayoría de los silicatos cristalinos contienen principalmente calcio, magnesio, sílice y aluminio. Componentes cristalinos del grupo de la mellita pueden estar presentes en pequeñas cantidades.</p> <p>La mayoría de los silicatos cristalinos contienen principalmente magnesio, calcio álcalis y aluminio. La pequeña cantidad de fase cristalina presente consiste generalmente en cuarzo y C₃A; cal libre.</p>
<p><u>II. Puzolanas Altamente activas</u> a. Humo de sílice condensado.</p> <p>b. Céniza de cáscara de arroz.</p>	<p>Constituido esencialmente por sílice pura en forma no cristalizada.</p> <p>Constituido esencialmente por sílice pura en forma no cristalizada.</p>
<p><u>III. Puzolanas normales</u> a. Cenizas volantes de bajo calcio.</p> <p>b. Materiales naturales.</p>	<p>La mayoría de los silicatos cristalinos contienen principalmente aluminio, hierro y álcalis. La pequeña cantidad de fase cristalina presente consiste generalmente en mullita, hematites, silimanita, cuarzo y magnetita.</p> <p>Entre los cristales de aluminosilicatos, puzolanas naturales contienen cuarzo, mica feldespatos, mica.</p>
<p><u>IV. Puzolanas débiles</u> a. Escorias de alto horno de lento enfriamiento; cenizas de fondo.</p>	<p>Constituido esencialmente por silicatos minerales cristalinos, y solo una pequeña parte de fase vítrea, no cristalizada.</p>

Fuente: elaboración propia.

1.6. Uso de las puzolanas

El deterioro de nuestro planeta por la contaminación de la atmosfera y la no planeación de procesos o productos sustentables ha impulsado a que la industria cementera y producción de concreto o mortero a la búsqueda de una mejora continua, utilizando complementos cementantes ya sean naturales o artificiales.

1.6.1. Adición mineral al cemento

Los cementos de mezclas se obtienen agregando al cemento Portland normal otros componentes como la puzolana. El agregado de estos componentes le da a estos cementos nuevas características que lo diferencian del Portland normal.

Hoy en día, existen múltiples usos que pueden darse a la Puzolana, si bien de entre todos ellos destaca la fabricación de cemento pòrtland puzolánico. Las puzolanas pueden reemplazar de 15 a 40 por ciento del cemento pòrtland, y hasta un 55 por ciento si es cemento puzolánico. Sin reducir significativamente la resistencia del concreto.

- **Cemento puzolánico**

Es un aglomerante hidráulico, producido por la mezcla íntima de un material conocido como puzolana y el hidrato de cal, finamente molido. Este aglomerante alcanza baja resistencia mecánica, y su fraguado es algo más lento que el del cemento Portland. Por esta razón, puede ser considerado como un cemento para aplicaciones de albañilería.

El cemento puzolánico se produce a partir de mezclar íntimamente y moler hasta obtener un polvo fino una mezcla de hidrato de cal y puzolana, con una proporción promedio de 70 por ciento de puzolana y 30 por ciento de cal. El material producido requiere tener una finura similar a la del cemento Portland ordinario (250-300 metro cuadrado sobre kilogramo, ensayo Blaine).

Las ventajas que ofrece el cemento puzolánico se definen a continuación:

- Mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros
- Mayor resistencia frente al agua de mar
- Aumento de la impermeabilidad ante la reducción de grietas en el fraguado
- Reducción del calor de hidratación
- Incremento en la resistencia a la compresión
- Incrementa la resistencia del acero a la corrosión
- Aumenta la resistencia a la abrasión
- Aumento en la durabilidad del cemento
- Disminuye la necesidad de agua.

La base de todas estas mejoras es el denominado Efecto Puzolánico en el cemento. Los aluminosilicatos presentes en la puzolana, reaccionan con el hidróxido de calcio, liberando la hidratación del cemento Pórtland, esto se realiza en una reacción lenta (que disminuye el calor), consumiendo el hidróxido de calcio (lo que mejora su resistencia frente a ambientes ácidos), y al realizarse la reacción rellenan los espacios resultantes de la reacción de hidratación del cemento (lo que aumenta la impermeabilidad y la resistencia mecánica).

- **Cemento Portland con escoria granulada de alto horno**

Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland, escoria granulada de alto horno y usualmente contiene sulfato de calcio.

- **Cemento Portland compuesto**

Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland que usualmente contiene sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza, ésta puede ser componente único.

- **Cemento Portland con humo de sílice**

Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland, humo de sílice y, usualmente, sulfato de calcio.

- **Cemento con escoria granulada de alto horno.**

Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland, escoria granulada de alto horno y, usualmente, sulfato de calcio.

1.6.2. Adición mineral al concreto o mortero

La adaptación de un concreto a las exigencias técnicas particulares de cada aplicación tiene un límite. Cuando ya no se puede jugar con la elección del cemento, los agregados y de la proporción de mezcla, se recurre a

productos que aportan mejoría a las características o propiedades deseadas para cada aplicación particular o a la adaptación deseada del concreto. Estos productos son las adiciones minerales y los aditivos.

La sustitución de una parte del clinker por otros constituyentes minerales ha sido investigada por razones económicas y ecológicas. Estos constituyentes, calificados como secundarios, pueden ser casi inertes, como la caliza o la sílice, o reactivos, como las puzolanas naturales, las cenizas volantes, las escorias de alto horno y más.

La utilización de las propiedades puzolánicas y cementantes de estos productos, incorporándolos como componentes del cemento Portland como adiciones minerales del cemento o bien directamente como adición mineral del concreto o mortero, representa una aplicación de gran valor.

1.6.3. Otros usos

Además de los ya señalados, existen otras aplicaciones ya que existen diferentes tipos de puzolanas que tienen actividad puzolánica en mayor o menor medida.

- Fabricación de hormigones de baja densidad
- Drenaje natural en campos de fútbol e instalaciones deportivas
- Filtro natural de líquidos por su elevada porosidad
- Absorbente (en el caso del agua del 20 al 30 por ciento del peso de árido seco) y preparación de tierras volcánicas olorosas
- Aislante térmico (0,21 Kcal / Hm²C)
- Sustrato inerte para cultivos hidropónicos
- Jardinería: en numerosas rotondas, jardines. Sustituto eficaz del césped

en zona con carencia de agua de riego

- Arqueología: protector de restos arqueológicos de baja densidad para conservación por construcción sobre ellos o con carácter temporal.

1.7. Ventajas del uso de puzolanas

Las puzolanas pueden ser utilizadas para el mejoramiento de las propiedades del cemento y el desempeño del concreto o mortero en su estado fresco y endurecido.

1.7.1. Ventajas como una adición al cemento

Básicamente las ventajas que aporta a los cementos adicionados se puede resumir así:

- Representan una economía importante en la producción del cemento, puesto que representan ahorro de combustible y generalmente son subproductos industriales, con poco o ningún costo de obtención. Existe un sobre costo mínimo, comparado con el cemento sin adiciones, al tener que ser más finamente molidos (mayor tiempo de molienda) para cumplir con requisitos mínimos de resistencia.
- Mejoran una cantidad importante de propiedades en hormigones y morteros hechos con esos cementos. Se destacan especialmente la mejoría en la trabajabilidad, durabilidad, el menor calor de hidratación liberado, la menor tendencia a la exudación y sangrado, y las mayores resistencias mecánica a largo plazo (más allá de 28 días).
- Representan un beneficio ecológico importante, puesto que emplean

subproductos industriales que no son usados los cuales generan contaminación del aire, el agua y el suelo. Mediante la realización de (perfiles ecológicos) de varios materiales de construcción, los cuales Toman en cuenta parámetros como la deforestación necesaria para producirlos, la contaminación causada y las emisiones de SO₂.

1.7.2. Ventajas como una adición al concreto

Son principalmente utilizadas para mejorar:

- La trabajabilidad
- La resistencia
- La durabilidad

Estos materiales le permiten al productor de concreto y mortero diseñar y modificar la mezcla para satisfacer la aplicación deseada.

Las mezclas con elevados contenidos de cemento Portland son susceptibles a la fisuración y a una mayor generación de calor. Estos efectos pueden ser controlados en alguna medida mediante la utilización de adiciones al cemento.

Los materiales cementantes suplementarios tales como las cenizas volantes, las escorias y el humo de sílice le permiten a la industria del concreto utilizar toneladas de subproductos que de otra forma serían vertidos en algún terreno como desechos.

Por otro lado su utilización reduce el consumo de cemento Portland por unidad de volumen de concreto. El cemento Portland tiene un elevado consumo

de energía y de emisiones asociadas con su producción, este consumo energético se disminuye cuando se reduce la cantidad de cemento Portland utilizada en el concreto o mortero.

1.7.3. Trabajabilidad

En general, las adiciones al cemento mejoran la consistencia y la trabajabilidad del concreto fresco, porque se le añade un volumen adicional de finos a la mezcla.

El concreto con humo de sílice es utilizado típicamente con bajos contenidos de agua, estas mezclas tienden a ser cohesivas y más viscosas que el concreto corriente. Las cenizas volantes y las escorias generalmente reducen la demanda de agua para el asentamiento (revenimiento) requerido del concreto.

El tiempo de fraguado del concreto puede ser retardado con algunas adiciones utilizadas en porcentajes elevados. Esto puede ser beneficioso en clima caliente. El retardo es eliminado en invierno reduciendo el porcentaje de las adiciones al cemento en el concreto.

Debido a los finos adicionales, la cantidad y la tasa de la exudación (sangrado) en estos concretos es frecuentemente bajo. Esto es especialmente significativo cuando se utiliza humo de sílice. Una exudación baja, conjuntamente con el retardo del fraguado pueden causar fisuración por retracción plástica y por esto se pueden hacer necesarias algunas precauciones especiales durante el vaciado y el acabado.

Figura 3. **Trabajabilidad en mortero y concreto**

a. **Trabajabilidad en mortero**



Fuente: Laboratorio de Morteros CII/USAC, 19 de septiembre de 2011.

b. **Trabajabilidad en concreto**



Fuente: Laboratorio de Concretos CII/USAC.

1.7.4. **Resistencia**

Las mezclas de concreto pueden ser dosificadas para producir la resistencia requerida y la velocidad de ganancia de resistencia que sea requerida para la aplicación.

Con las adiciones que no sean humo de sílice, la velocidad de ganancia de resistencia puede ser más baja inicialmente, pero la ganancia de resistencia continuada por un período de tiempo más largo comparado con las mezclas que sólo poseen cemento Portland, lo que frecuentemente da como resultado resistencias últimas más elevadas.

El humo de sílice es comúnmente utilizado para producir resistencias por encima de las 10 000 libras por pulgada cuadrada (70 MPa). El concreto que contiene adiciones generalmente necesita consideraciones adicionales para el curado tanto para el ensayo de los cilindros de ensayo como de la estructura para asegurar que sean alcanzadas las propiedades esperadas.

Figura 4. **Resistencia en el concreto y mortero**



Fuente: Laboratorios de Morteros y Concretos CII/USAC.

1.7.5. Durabilidad

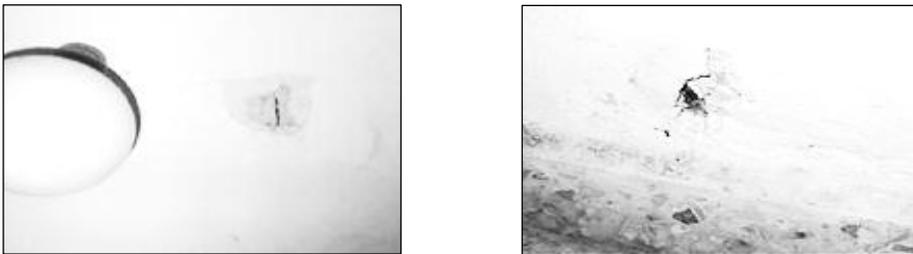
Las adiciones al cemento pueden ser utilizadas para reducir el calor asociado con la hidratación del cemento y reducir el potencial de fisuración térmica en elementos estructurales masivos. Estos materiales modifican la microestructura del concreto y reducen su permeabilidad por lo que

consecuentemente reducen la penetración de agua y sales disueltas en el concreto.

La impermeabilidad del concreto reducirá varias formas de deterioro del mismo, tales como la corrosión del acero de refuerzo y el ataque químico. La mayoría de las adiciones al cemento reducen la expansión interna del concreto debido a reacciones químicas tales como la reacción árido álcali y el ataque de sulfatos.

Figura 5. Durabilidad en el mortero y concreto

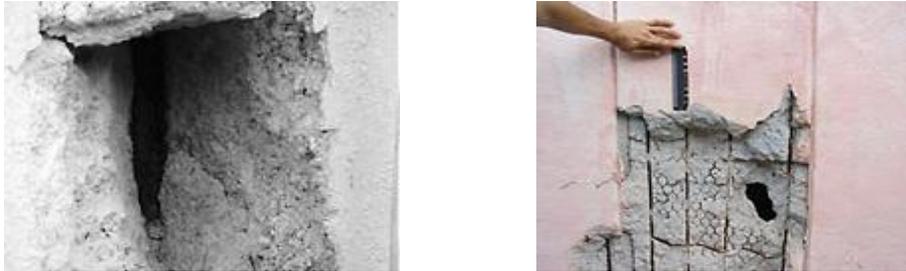
a. Acciones físicas y químicas agresivas al mortero



Fuente: artículo del VI Congreso Internacional Sobre Patología y Recuperación de Estructuras CINPAR 2010, Córdoba, Argentina.

Continuación de la figura 5.

b. Acciones físicas y químicas agresivas al concreto



Fuente: artículo del VI Congreso Internacional Sobre Patología y Recuperación de Estructuras CINPAR 2010, Córdoba, Argentina.

1.8. Cáscara de arroz

La cáscara de arroz, también denominada pajilla, se obtiene del proceso de pilado, en el cual la cáscara se separa del grano haciendo pasar el arroz en cáscara entre rodillos, luego de una operación previa de limpieza, como se observa en la figura 6.

Figura 6. **Limpieza del arroz, residuo, la cáscara de arroz**



Fuente: arrocera Los Corrales, el 20 de julio del 2011.

La cáscara de arroz posee una superficie áspera y abrasiva, es muy resistente a la degradación natural y debido a su bajo contenido de proteínas no es apropiada para forraje de animales, hechos que dificulta su aprovechamiento económico.

Tabla II. **Cantidad de ceniza por distintos cereales**

Cosecha	Parte de la planta	Ceniza (porcentaje en peso)
maíz	hoja	12
arroz	cáscara	20
arroz	paja	14
sorgo	hoja	12
caña de azúcar	bagazo	15
girasol	hoja y tallo	11
trigo	hoja	10

Fuente: Mehta, P.K.

1.8.1. Propiedades de la cáscara de arroz

La cáscara del arroz ha demostrado tener la potencialidad máxima por las siguientes razones:

- Es disponible en grandes cantidades en varias partes del mundo
- Cuando es quemada produce bastante ceniza (una tonelada por cinco de cáscara)
- Típicamente contiene un 90 por ciento de sílice que hace que sea una excelente puzolana.

La composición química promedio de la cáscara de arroz se muestra a continuación en la tabla III.

Tabla III. **Composición química de la cáscara de arroz**

Componente	Fórmula	Composición (en porcentaje)
Celulosa: polímero de glucosa	$C_5H_{10}O_5$	50
Lignina: polímero de fenol	$C_7H_{10}O_3$	30
Sílice: componente primario de ceniza	SiO_2	20

Fuente: Mehta, P.K.

La lignina y la celulosa presentes en la cáscara de arroz pueden ser eliminadas por combustión controlada. El alto contenido de ceniza y lignina presente en la cáscara la descalifica para hacer productos de celulosa.

Se cree que la sílice en la cáscara de arroz existe en forma opalina (una forma amorfa e hidratada de sílice). Aparentemente la sílice es tomada del suelo y es transportada a la planta de arroz como ácido monosilícico, el cual llega a concentrarse en la cáscara por evaporación y finalmente polimeriza a la forma de membrana sílico-celulosa. Las características físicas de la cáscara de arroz se presentan en la tabla IV.

Tabla IV. **Características físicas de la cáscara de arroz**

Características	g/cm³
Densidad real	0,780
Densidad global sin compactar	0,108
Densidad global compactado	0,143

Fuente: GONZALES DE LA COTERA, M. VÁSQUEZ Rosaura, Las cenizas de cáscara de arroz, adición puzolánica en cemento y concreto. p. 4.

1.9. Producción de arroz en Guatemala

Los principales departamentos productores de acuerdo con el IV censo nacional agropecuario 2003, la producción nacional se encuentra distribuida de la siguiente forma: Izabal (21 por ciento), Alta Verapaz (15 por ciento), Jutiapa (15 por ciento), San Marcos (11 por ciento), Petén (10 por ciento), Chiquimula (8 por ciento), Quezaltenango (6 por ciento) y los demás departamentos de la república suman el (13 por ciento) restante.

El 87 por ciento de la superficie cultivada se encuentra concentrada en 7 departamentos: Jutiapa (18,5 por ciento), Izabal (16,9 por ciento), San Marcos (13,3 por ciento), Alta Verapaz (13,2 por ciento), Petén (10,4 por ciento), Chiquimula (9,6 por ciento) y Quetzaltenango (5,1 por ciento).

1.9.1. Aspectos productivos

Área, producción y rendimiento en paddy (con cáscara), como se muestra en la tabla V.

Tabla V. **Producción de arroz en paddy (con cáscara) a nivel nacional**

Año agrícola	Área cosechada (hectáreas)	Producción (toneladas métricas)	Rendimiento (toneladas/ hectáreas)
2006/07	9 085,65	22 407,46	2,47
2007/08	7 687,86	21 683,20	2,82
2008/09	7 841,61	23 974,52	3,06
2009/10	9 924,32	28 701,75	2,89
2010/11 p/	9 163,92	29 592,45	3,23
2011/12 e/	9 805,40	30 386,54	3,10

Fuente: PROARE-DIPLAN-MAGA con datos de BANGUAT. Asociación Guatemalteca del Arroz (ARROZGUA), Instituto Nacional de Comercialización Agrícola (INDECA 1984/85 - 1992/93); y Banco de Guatemala.

Año agrícola, se refiere desde mayo un año a abril del siguiente

Área cosechada, se refiere al grano en granza.

p/ Cifras preliminares.

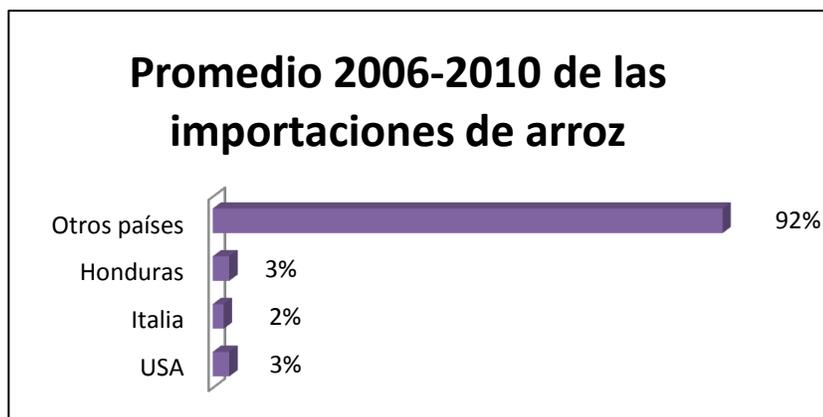
e/ Cifras estimadas.

Figura 7. **Distribución de la producción de arroz a nivel nacional**

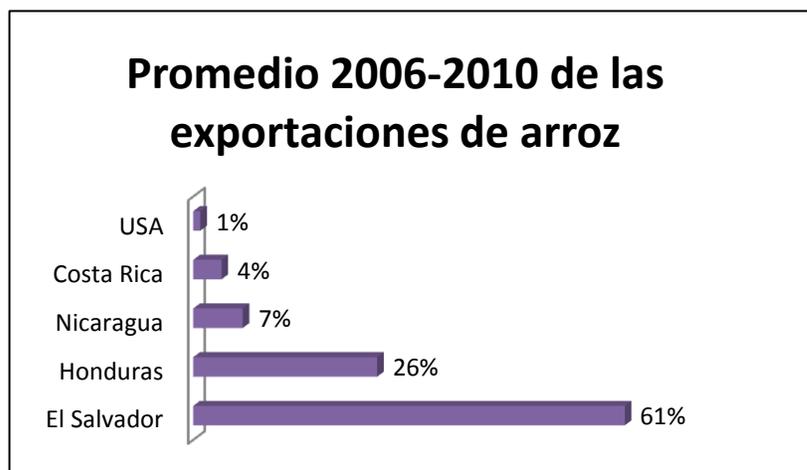


Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Principal procedencia y destino del comercio de arroz por volumen**



Continuación de la figura 8.



Fuente: IMEX-DIPLAN-MAGA, con datos de BANGUAT;
DIPLAN-MAGA con datos del INE

Arrozgua informa que anualmente se producen una cantidad no menor a 35 000 toneladas métricas de arroz que no alcanzan para cubrir la demanda nacional por lo que se importan 83 000 toneladas en paddy (con cáscara).

Mientras el consumo per cápita de arroz es de 15,7 libras anuales, algunas organizaciones de la sociedad civil guatemalteca, crean campañas y programas para mejorar la producción de arroz, pretendiendo incrementar el consumo de estos granos básicos y mejorar la producción nacional.

En el país hay más de 20 000 productores y una cuarta parte de ellos necesita inversión en tecnología para aumentar el rendimiento de los cultivos.

1.10. Ceniza de cáscara de arroz

Es el residuo de la calcinación de la cáscara de arroz; para hacerla altamente puzolánica es necesario tener control en la quema de la misma. La temperatura no debe pasar de 700 grados centígrados, si no la sílice se cristaliza y pierde su grado de reactividad.

Sin embargo, sólo la sílice amorfa (no cristalino) posee estas propiedades, es por esta razón que la temperatura y duración de la combustión son importantes en la producción de la ceniza de cáscara de arroz (RHA).

1.10.1. Características

Actividad puzolánica: la actividad puzolánica o propiedad puzolánica consiste en la capacidad de la adición para combinarse con el hidróxido de calcio producido durante la hidratación del clinker de cemento Portland, formando compuestos que son también cementantes.

Aquí radica una de sus principales características: una adición (o puzolana) necesita de la presencia del hidróxido de calcio (es decir de clinker de cemento hidratado), para desarrollar sus propiedades cementantes; por sí sola no puede desarrollar esa actividad puzolánica o lo hará a unas velocidades irrelevantes desde el punto de vista práctico.

La mayoría tienen como característica tener un alto de contenido de sílice (SiO_2) y una estructura interna vítrea amorfa (cristales en desorden, en contraste con la cristalina donde los cristales se encuentran en orden), como también estar finamente molidos, lo que les confiere una gran superficie específica.

1.10.2. Tipos

La cascarilla de arroz como se observa en la figura 9, luego de la combustión puede tener como resultado, cenizas totalmente quemada, puede ser gris, morada o blanca, dependiendo de las impurezas presentes y las condiciones de combustión. En la quema al aire libre o en ambientes de combustión no controlada, las cenizas se mantendrán en su mayoría no reactivas debido a la composición mineralógica desfavorable.

La ceniza de cascarilla de arroz parcialmente quemada contiene carbono, y por lo tanto es negra. Si se utiliza en grandes cantidades, se puede convertir concreto casi negro, como se observa en la figura 10.

La ceniza reactiva es de color gris oscura a blanca, como se observa en la figura 11, dependiendo del carbón residual en ella, que no tiene efecto negativo si es menor de 10 por ciento, como se observa en la figura 12.

Para mejorar su reactividad, la ceniza puede ser pulverizada en un molino de bolas por aproximadamente una hora, o más si contiene sílice cristalina. La ceniza puede reemplazar hasta 30 por ciento del cemento en un concreto. Alternativamente, puede ser mezclada con 30 a 50 por ciento de cal hidratada para ser empleada como cemento en morteros, enlucidos y concreto en masa.

Figura 9. **Cáscara de arroz en estado natural**



Fuente: Laboratorio de Química Industrial del CII/USAC,
19 de agosto de 2011.

Figura 10. **Cáscara de arroz parcialmente quemada**



Fuente: Laboratorio de Química Industrial del CII/USAC,
2 de septiembre de 2011.

Figura 11. **Ceniza reactiva de color gris oscura a blanca**



Fuente: Laboratorio de Química Industrial del CII/USAC,
13 de septiembre de 2011.

Figura 12. **Ceniza de cáscara de arroz después de la combustión controlada con un cierto porcentaje de carbono residual**



Fuente: Laboratorio de Química Industrial CII/USAC,
13 de septiembre de 2011.

1.10.3. Métodos de elaboración

Los diferentes estudios experimentales han mostrado que cuando la temperatura de calcinación de la cáscara de arroz es baja y la duración de la exposición a esta temperatura se mantiene en un tiempo relativamente corto, la sílice en las cenizas retenidas muestra un carácter amorfo, como se muestra en la tabla VI.

Además, los materiales que contienen partículas de sílice en la fase no cristalina, no se consideran un peligro para la salud. Con el aumento de la temperatura de combustión y tiempo, la sílice en RHA se transforma en formas cristalinas, como la cristobalita y tridimita.

La ceniza que consiste principalmente de sílice cristalina muestra mucha menos actividad puzolánica, y también se considera peligroso para la salud humana.

Tabla VI. **Efecto de las condiciones de combustión en las propiedades que presenta la ceniza de cáscara de arroz**

Temperatura de combustión (°C)	Tiempo de Combustión	Propiedades de entorno	Propiedades de la ceniza	
			Cristalización	Área superficial m ² /s
500 – 600	1 min	moderadamente oxidante	no cristalina	122
500 – 600	30 min	moderadamente oxidante	no cristalina	97
500 – 600	2 h	moderadamente oxidante	no cristalina	76
700 – 800	15 min – 1 h	moderadamente oxidante	no cristalina	100
700 – 800	15 min – 1 h	altamente oxidante	parcialmente cristalina	6 – 10
> 800	> 1 h	altamente oxidante	cristalina	< 5

Fuente: Mehta, P.K.

La ceniza de cáscara de arroz puede ser obtenida a través de diferentes técnicas de calcinación, entre las cuales tenemos:

- Calcinación a campo abierto (o en pilas)
- Calcinación en hornos (circulares o cuadrados)
- Calcinación en lecho fluido

A continuación se describe brevemente cada una de las técnicas de calcinación señaladas:

- Calcinación a campo abierto (o en pilas)

Es una técnica sencilla de reducción de cáscara a ceniza. La calcinación a campo abierto se realiza en recintos circulares de ladrillo de hasta 16 metros de diámetro, con pilas de cara de 2,5 metros de altura. La cáscara calcinada es extraída cada cierto tiempo obteniéndose una ceniza de color blanco a blanco-negro.

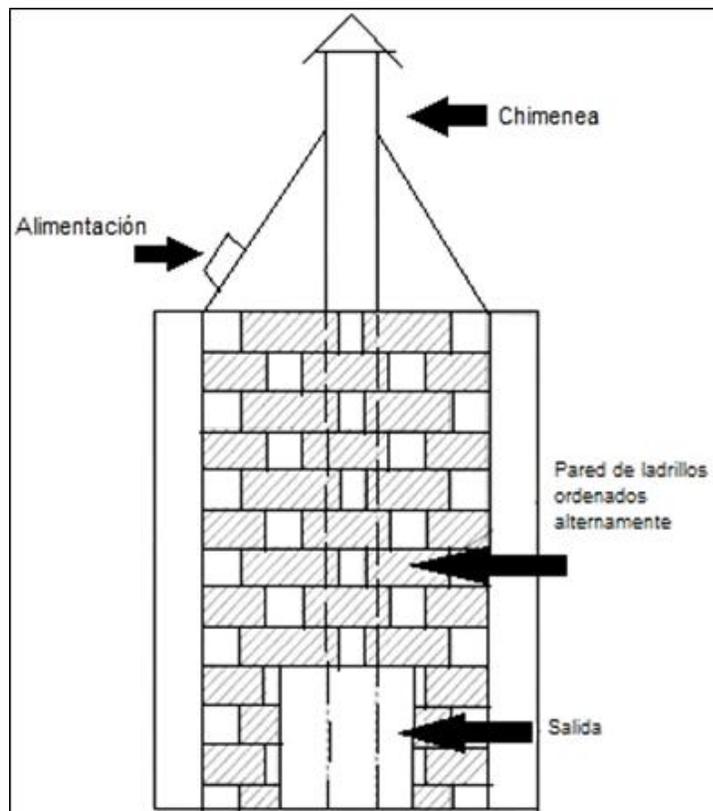
Durante esta técnica de calcinación la temperatura no puede ser controlada. Asimismo, debido a la alta temperatura alcanzada y a la formación resultante de estructuras silíceas altamente cristalinas (cristobalita y tridimita), la calcinación a campo abierto es asociada con puzolanas de bajo índice de reactividad.

- Calcinación en hornos (circulares o cuadrados)

Esta técnica ha sido utilizada en plantas piloto e industriales en la India, Pakistán y Nepal. Los hornos tienen paredes de ladrillos los cuales se disponen alternadamente de tal manera que se permita el acceso del aire hacia el interior.

La chimenea se extiende hasta la base del horno y está elaborada con una malla fina de alambre que permite que el aire fluya y evita el ingreso de ceniza. Asimismo, las paredes interiores están revestidas con una malla de alambre con la finalidad de retener la cáscara, la cual se carga por la cubierta del horno y se descarga por la base, como se muestra en la figura 13.

Figura 13. **Horno de ladrillo para la calcinación de cáscara de arroz**



Fuente: elaboración propia.

Esta técnica de calcinación produce una ceniza de color blanco, altamente activa, de naturaleza amorfa y con presencia minoritaria de cuarzo cristalino.

- Calcinación en lecho fluido

La cámara de combustión es de acero inoxidable y para el lecho fluidizado (partículas no combustibles) se emplea arena con tamaño de partícula de 297 a 590 micras. El aire es suministrado a través de un plato perforado ubicado en la base de la cámara de combustión.

El lecho fluido es precalentado a 500 grados centígrados por medio de un dispositivo eléctrico y posteriormente se inicia la alimentación de la cáscara a través de un alimentador de tornillo.

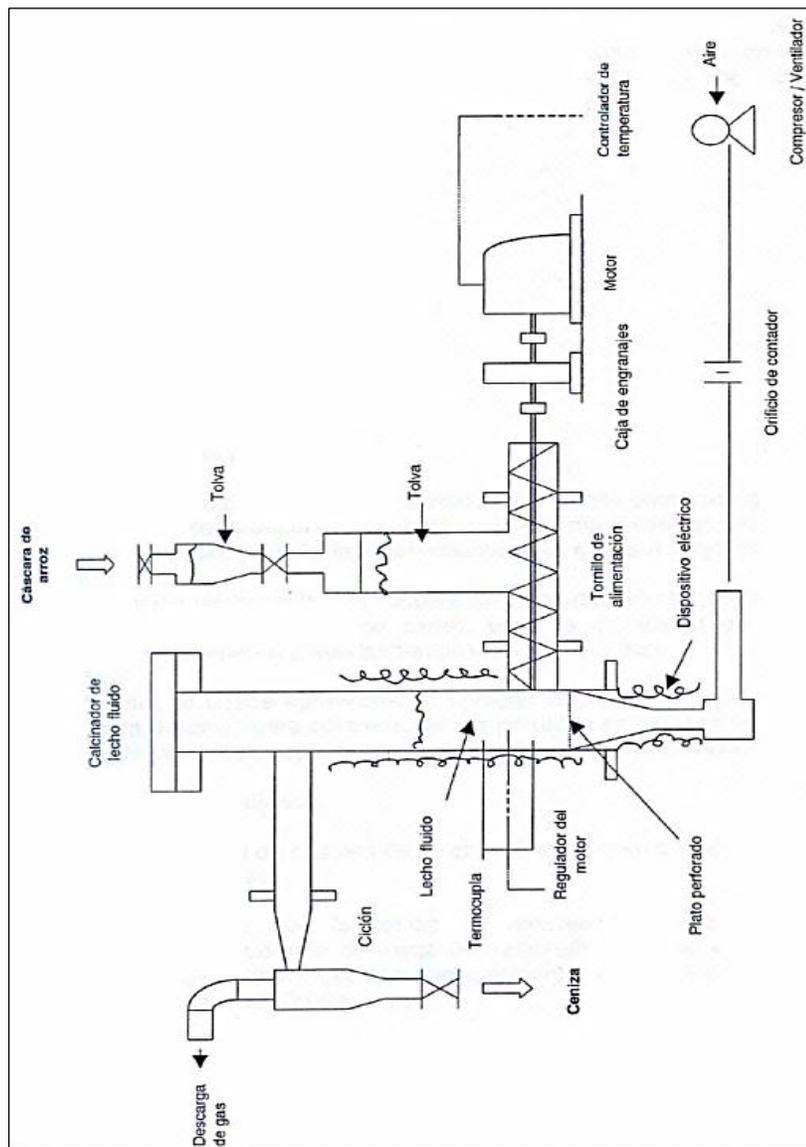
Una vez obtenida la ceniza cesa el calentamiento por medio del dispositivo eléctrico. La temperatura de combustión que es monitoreada en el lecho fluido se controla mediante la velocidad de alimentación de la cáscara de arroz. El suministro de aire se fija a una velocidad de 15 centímetros sobre segundo. El tiempo de retención de la ceniza en la cámara de combustión es de sólo unos pocos segundos y posteriormente ésta es colectada a través de un ciclón, en la figura 14, se muestra el esquema de un horno de lecho fluido.

La calcinación controlada de la cáscara de arroz por medio de este tipo de calcinador proporciona una ceniza consistente en sílice amorfa con un alto contenido de SiO_2 y una elevada área superficial. La actividad puzolánica de la ceniza es excelente y proporciona una buena resistencia a la compresión.

Por otra parte, la cáscara de arroz representa una fuente valiosa de energía. El valor energético de la cáscara de arroz es aproximadamente 14 Mega Jouls sobre kilogramo lo cual significa que una tonelada de cáscara de arroz es equivalente a 0,5 toneladas de carbón o 0,35 toneladas de petróleo.

En el proceso Mehta-Pitt se aprovecha el calor de la combustión de la cáscara de arroz, en un horno de lecho fluido, para producir vapor o electricidad.

Figura 14. **Calcinador de lecho fluido para cáscara de arroz**



Fuente: Mehta, P.K.

La sílice en las cenizas de cáscara de arroz puede ser amorfa o cristalina, dependiendo de la forma en que se quema y se enfría. Si la ceniza se forma en la quema al aire libre o en ambientes de combustión no controlada, mantendrá una gran proporción de sílice reactivo en forma de cristobalita y tridimita, y requeriría una molienda fina para desarrollar la actividad puzolánica (Metha, 1986).

Los estudios han demostrado que la quema de cáscara de arroz a 600 grados centígrados produce una ceniza con la composición óptima de material puzolánico (Mazlum y Uyan, 1992). Mehta (1986) estima que cada tonelada de cáscara de arroz produce 40 kilogramos de ceniza de cáscara de arroz.

1.10.4. Normativa existente

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

- 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 593: Standard Specification for Fly Ash and other Pozzolans for use with Lime.

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.

- 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

- 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

- 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 Pozzolanic pulverised fuel ash cement

- Guatemala

NGO 41 04:87 “Muestreo y métodos de análisis de cenizas volantes de carbón y puzolanas naturales, empleadas como aditivo mineral al hormigón (concreto) de cemento Portland”

NGO 41 003 h 22 “cementos hidráulicos, determinación de la finura usando un tamiz No. 325 (45 µm)”

2. ANTECEDENTES DE LA UTILIZACIÓN DE PUZOLANA COMO ADICIÓN MINERAL DEL CEMENTO Y ADICIÓN MINERAL DEL CONCRETO Y MORTERO

2.1. Definición

En términos generales, se emplea la palabra cemento para designar a una sustancia que tiene propiedades conglomerantes. Se define al cemento como un material pulverizado que además de óxido de calcio contiene sílice alumina y óxido de hierro, y que por adición de una cantidad apropiada de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire. Excluyendo las cales hidráulicas, las cales aéreas y los yesos.

Además el cemento posee dos propiedades muy importantes:

- Hidráulica
- Puzolánica

La propiedad hidráulica (propiedad química), se define como la aptitud de un material pulverizado de fraguar y endurecer en presencia de agua y de formar compuestos estables.

La propiedad puzolánica se define como la aptitud de un material pulverizado de reaccionar químicamente en presencia de agua con hidróxido de calcio a la temperatura ambiente, formando compuestos que poseen propiedades hidráulicas.

Es importante definir los términos más empleados en tecnología del cemento: clinker y puzolana.

- Clinker: es un componente del cemento en forma granulada, constituido principalmente por silicatos, aluminatos y ferro aluminatos de calcio y que se obtiene por la cocción, hasta fusión parcial (clinkerización), de una mezcla convenientemente proporcionada y homogenizada de materiales debidamente seleccionados.
- Puzolana: es un material sílico o sílico-aluminoso que posee propiedades puzolánicas. Puede ser en estado natural (tierra de diatomeas, rocas opalinas, esquistos, cenizas volcánicas, pumitas), de material calcinado (los nombrados anteriormente y algunos como las arcillas y esquistos más comunes) o de material artificial (óxido de silicio precipitado y cenizas volantes).

2.2. Cementos con adiciones

Los cementos con adiciones han ganado cada vez más terreno dentro de la tecnología del concreto. De hecho el futuro apunta a que reemplazaran casi en su totalidad a los cementos normales o Portland, puesto que presentan una serie importante de ventajas sobre ellos. La mayoría de cementos contienen adiciones de naturaleza diferente, con objetivos a que el fabricante, como el consumidor aproveche las ventajas que estas adiciones le suministren.

El cemento Portland adicionado, es el producto que se obtiene de la pulverización conjunta del clinker Portland y otros materiales arcillosos, calcáreos, sílico-aluminosos, calcinados o no que poseen propiedades hidráulicas o puzolánicas.

Se suele confundir, o emplear indistintamente el término puzolana como adición al cemento. La puzolana es una de las posibles adiciones que pueden agregarse al cemento y la propiedad puzolánica es realmente una propiedad que debe ser inherente a una adición para que pueda considerarse activa. En otras palabras, a pesar que la adición puede ser activa o inerte, cuando se habla de adición generalmente se está pensando en una adición activa.

La aplicación de un determinado tipo de cemento mezclado estará siempre en función de la obra para la cual se desea emplear, ya que el tipo de adición contempla una variabilidad de propiedades que afectan en forma directa el desempeño de la estructura final, estas aplicaciones se poder observar en la tabla VII.

Tabla VII. **Principales aplicaciones de los cementos hidráulicos con adiciones**

Tipos de Cemento	Aplicaciones	Requerimientos de obra
Cemento con ceniza volante Cemento con humo de sílice	-Obras marítimas -Obras en contacto con suelos y drenajes - Canalizaciones y drenajes -Cimentaciones -Muros de contención -Obras subterráneas	Resistencia al ataque químico
Cemento con ceniza volante Cemento con escoria Cemento con humo de sílice	-Presas -Canales y puentes -Concretos masivos	Bajo calor de hidratación
Cemento con ceniza volante Cemento con escoria Cementos con materiales inertes	-Concretos inyectados -Morteros de albañilería -Acabados	Trabajabilidad
Cemento con ceniza volante Cemento con escoria Cemento con humo de sílice	-Elementos prefabricados -Concretos con agregados reactivos	Reactividad con cal – álcalis

Fuente: CETEC (Centro Tecnológico de Cementos Progreso).

Para su uso en el concreto, las adiciones al cemento, algunas veces son referidos como adiciones minerales individualmente o en combinación en el concreto. Estos pueden ser o no ser procesados antes de ser utilizados en los concretos y morteros. Estas necesitan cumplir los requerimientos de las normas establecidas. Estos pueden ser utilizados como:

2.3. Adición mineral del cemento

Pueden ser añadidas a la mezcla de concreto como un cemento que contenga la adición, utilizando las puzolanas como adición mineral del cemento.

2.3.1. Normas de requisito

ASTM C 595: “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements” (especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados).

Tabla VIII. **Requisitos de la puzolana para su uso en cementos Portland adicionados**

Puzolana	Requisitos
Finura: Retenido malla 45 μm (N°325), máx., por ciento	20,0
Índice de actividad puzolánica: con cemento Portland, 28 días, mín., por ciento	75,0
Índice de actividad puzolánica: método de la cal, resistencia a la compresión a los 7 días, MPa, mín.	5,5

Fuente: Norma ASTM C 595.

2.3.2. Normas de métodos de ensayos

ASTM C 595: “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements” (especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados).

2.4. Adición mineral del concreto o mortero

Complemento como un ingrediente dosificado separadamente, por ejemplo, puede ser una puzolana natural, cruda o calcinada, puzolana artificial y ceniza volante.

Puzolanas como adición al concreto o mortero:

2.4.1. Normas de requisitos

ASTM C 618 “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Concrete” (especificación estándar para cenizas volantes de carbón y de puzolana natural cruda o calcinada para el concreto).

2.4.2. Normas de métodos de ensayo

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”

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” (métodos de prueba estándar para el muestreo y pruebas de cenizas volantes o puzolanas naturales para uso en Portland cemento).

ASTM C 593: “Standard Specification for fly ash and other pozzolans for use with lime” (especificación estándar para las cenizas volantes y puzolanas otros para su uso con cal).

Tabla IX. **Clasificación de las puzolanas según Norma ASTM C 618**

Clase de adición mineral	Descripción
N	Puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tobas y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias.
F	Ceniza volante que se produce por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Esta clase de cenizas volante poseen propiedades puzolánicas.
C	Ceniza volante producida por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza volante, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene propiedades cementantes.

Fuente: Norma ASTM C 618.

Tabla X. **Requerimientos químicos según la Norma ASTM C 618**

Composición química	Clase de adición mineral		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO ₂) Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃), min., por ciento.	70,0	70,0	50,0
Trióxido de azufre (SO ₃) máx., por ciento.	4,0	5,0	5,0
Contenido de humedad, máx., por ciento.	3,0	3,0	3,0
Pérdida por ignición, máx., por ciento.	10,0	6,0	6,0

Fuente: Norma ASTM C 618.

Nota: Se puede utilizar puzolana clase F que contenga hasta un 12,0 por ciento de pérdida por ignición puede ser aprobada por el usuario si bien los registros de rendimientos o pruebas de laboratorio son aceptables.

Tabla XI. **Requerimientos físicos según la Norma ASTM C 618**

	Clase de adición mineral		
	N	F	C
Finura: Cantidad retenida cuando está mojado tamiz de 45 µm (No. 325), máx., por ciento.	34	34	34
Fuerza índice de actividad: ^B Con el cemento Portland, a los 7 días, min, por ciento de la de control.	75 ^C	75 ^C	75 ^C
Con cemento Portland, a los 28 días, min, por ciento de la de control.	75 ^C	75 ^C	75 ^C
Requerimiento de agua, máx., por ciento de la mezcla de control	115	105	105
Solidez: ^D Autoclave de expansión o contracción, máx., por ciento	0,8	0,8	0,8
Requisitos de uniformidad: La densidad y la finura de las muestras individuales no debe variar respecto a la media establecida por las diez pruebas anteriores, o por todas las pruebas anteriores, si el número es inferior a diez, en más de:			
La densidad, la máxima variación de la media, por ciento.	5	5	5
Retenido en 45µm (No. 325), la variación máxima, puntos porcentuales de media, por ciento.	5	5	5

Fuente: Norma ASTM C 618.

Nota: ^ADebe tener cuidado para evitar la retención de las aglomeraciones de material extremadamente fino.

^B El índice de actividad de la fuerza con cemento Portland no debe ser considerado una medida de la resistencia a la compresión del concreto que contiene las cenizas volantes o puzolana natural de la masa de cenizas volantes o puzolanas naturales específica para la prueba para determinar el

índice de actividad de la fuerza con cemento Portland es no se considera la proporción recomendada para el hormigón que se utiliza en el trabajo. La cantidad óptima de cenizas volantes o puzolana natural para cualquier proyecto es determinada por las propiedades requeridas de los componentes de hormigón y otros de lo concreto y debe ser establecido por las pruebas. Índice de fuerza de actividad con cemento Portland es una medida de la reactividad con un cemento dado y pueden variar en cuanto a la fuente tanto de la ceniza volante o puzolana natural y el cemento.

^C El ensayo de los 7 días o 28 días de actividad índice de fuerza indicará el cumplimiento de las especificaciones.

^D Si la ceniza volante o puzolana natural constituyen más del 20 por ciento en peso del material de cemento en el diseño de la mezcla de proyectos, los especímenes de prueba, para la expansión de autoclave deberán contener el porcentaje previsto. La expansión excesiva de autoclave es muy importante en los casos en que el agua de ceniza volante o puzolana natural y las raciones de cemento son bajas, por ejemplo, en bloque o mezclas de hormigón proyectado.

Tabla XII. **Requerimientos suplementarios según Norma ASTM C 618**

	Clase de adición mineral		
	N	F	C
Múltiples factores, como el producto de la pérdida por ignición (calcinación) y finura cantidad retenida cuando está mojado, se tamiza en 45 µm (No. 325) máx., por ciento. ^A	255
Aumento de la contracción por secado de barras de mortero de 28 días, máximo, la diferencia, en por ciento, sobre el control. ^B	0,03	0,03	0,03
Requisitos de Uniformidad: Cuando se utilice incorporador de aire en el concreto se especifica la cantidad de agente incorporado de aire necesaria para producir un contenido de aire de 18,0 vol. por ciento de mortero no variará respecto a la media establecida por las diez pruebas anteriores, o por todas las pruebas anteriores o si es menor de diez pruebas, por ciento.	20	20	20
Eficacia en el control de la reacción álcali-sílice:^C Expansión de la mezcla del ensayo como porcentaje de control de cemento bajo contenido de álcalis, a los 14 días, máx., por ciento.	100	100	100
Eficacia para contribuir a resistencia a los sulfatos:^D Procedimiento A: Expansión de la mezcla de prueba: Para la exposición moderada de sulfatos después de 6 meses de exposición, máx., por ciento.	0,10	0,10	0,10
Para la exposición alta de sulfatos después de 6 meses de exposición, máx., por ciento.	0,05	0,05	0,05
Procedimiento B: Expansión de la mezcla del ensayo como un porcentaje de control de sulfato de cemento de resistencia después de al menos 6 meses de exposición, máx., por ciento.	100	100	100

Fuente: Norma ASTM C 618.

Nota: estos requisitos opcionales se aplican sólo cuando se solicite expresamente.

^A Aplicable sólo para las cenizas volantes clase F ya que las limitaciones de quema predominan para la clase C.

^B Determinación de cumplimiento o incumplimiento de los requisitos relativos al aumento de la contracción por secado se hará a petición del comprador.

^C Las cenizas volantes o puzolanas naturales cumpliendo este requisito se consideran eficaces para controlar las reacciones álcali agregado como el uso del cemento de control de bajo contenido de álcalis utilizados en la evaluación. Sin embargo, la ceniza volante o puzolana natural se considerará efectiva sólo cuando se usa en porcentajes en peso del total del material cementicio igual o superior a la utilizada en las pruebas y cuando el contenido de álcali del cemento a utilizar no sea superior a la utilizada en las pruebas en más de un 0.05 por ciento.

^D La ceniza volante o puzolana natural se considerará efectiva sólo cuando la ceniza volante o puzolana natural se utiliza porcentajes en peso del total del material cementicio dentro del 2 por ciento de la mezcla de ensayo, o entre dos porcentajes que tienen éxito, y cuando el contenido de C_3A del cemento a utilizar es inferior o igual a lo que fue utilizado en la mezcla de prueba.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Muestreo de la cáscara de arroz

Se realizó en las instalaciones de la empresa arrocera Los Corrales, misma que se dedica a la distribución de arroz y otros comestibles, ubicada da en la zona 1 de Villa Nueva, lugar donde se realiza el proceso de limpieza del arroz y almacenamiento de la cáscara en bodegas, como se observa en la figura 15; luego fue trasladada al CII, USAC. Para su preparación y evaluación, se realizaron los ensayos necesarios para calificarla como puzolana artificial, de acuerdo a las Norma ASTM C-311, C-618, C-595, y C-593.

Figura 15. Muestreo y almacenamiento de la cáscara de arroz



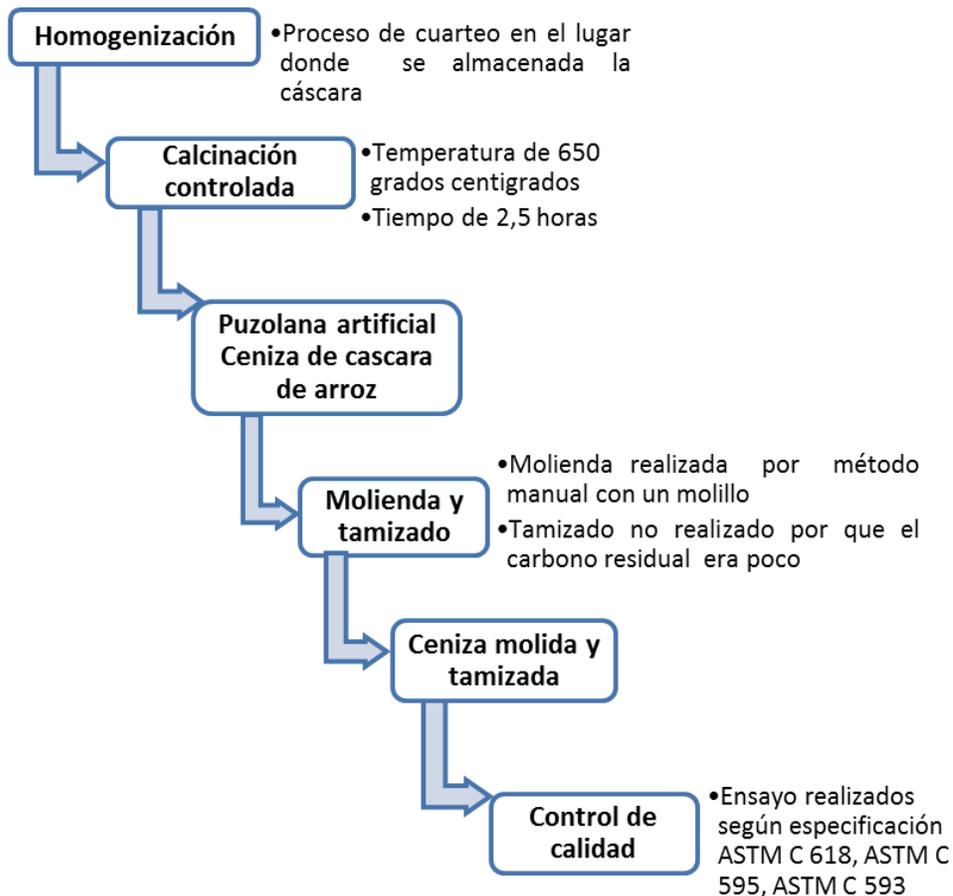
Fuente: arrocera Los corrales 20 de julio de 2011.

Previamente a los ensayos la muestra fue homogeneizada y reducida mediante cuarteos sucesivos.

3.2. Obtención de la ceniza de cáscara de arroz o puzolana artificial

La puzolana artificial se obtuvo a partir de la calcinación controlada de la cáscara de arroz, según parámetros comparativos en otros países. En la figura 16, se presenta el diagrama de flujo del proceso de obtención de la ceniza de cáscara de arroz.

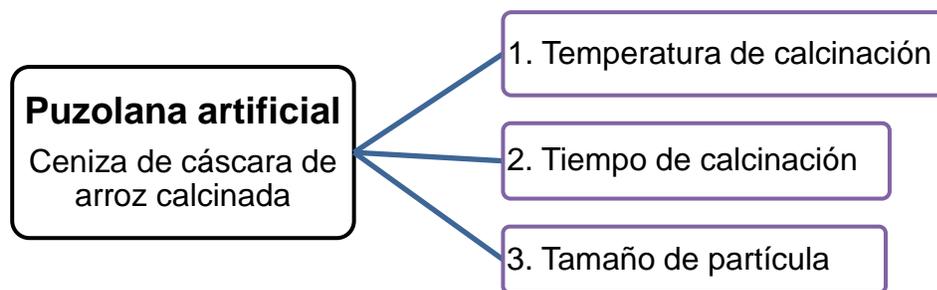
Figura 16. Diagrama de flujo de la obtención de la ceniza



Fuente: elaboración propia.

Para obtener la ceniza de cáscara de arroz se consideran las siguientes variables que muestra la figura 17.

Figura 17. **Diagrama de las variables a considerar para la ceniza de cáscara de arroz**



Fuente: elaboración propia.

3.3. **Calcinación de la cáscara de arroz**

Para la quema controlada de la cáscara de arroz, se utilizan muflas como se observa en la figura 18, llevando control de los parámetros de tiempo y temperatura en la operación de combustión, hecho posible para producir una ceniza altamente puzolánica.

Figura 18. **Mufla utilizada para la calcinación de la cáscara de arroz**



Fuente: Laboratorio de Química Industrial CII/USAC.

Se considera que la temperatura de mantenimiento de combustión de la cáscara de arroz será de 650 grados centígrados, durante períodos de 2,5 horas (hasta que la mayor parte del carbono se elimine por oxidación).

3.4. Requisitos de la puzolana para su uso en cementos Portland adicionados de acuerdo a la Norma ASTM C-595

La puzolana que se mezclara con cemento se ensayara en el mismo estado en el que será mezclado. La puzolana se ajustara a los requisitos de fineza y al requisito de la actividad puzolánica de la tabla VIII.

Tal puzolana que se integrará con clinker de cemento Portland, antes de analizar sus propiedades químicas, se trabaja en el laboratorio a una fineza semejante a la del cemento terminado. Es responsabilidad del fabricante decidir sobre la finura en la que las pruebas se llevarán a cabo.

3.4.1. Resultados

En la tabla XIII se presentan los resultados y los requisitos de los ensayos físicos y mecánicos como lo especifica la Norma ASTM C 595 que debe tener la ceniza para ser usada como una adición al cemento.

Tabla XIII. **Resultados y requisitos de los ensayos físicos y mecánicos que debe poseer la ceniza de cáscara de arroz calcinada para la adición al cemento**

Parámetro	Resultados	Especificaciones ASTM C 595
Finura: Retenido malla 45 mm (N°325), por ciento	36	Máximo 20
Índice de actividad puzolánica: con cemento Portland, 28 días, por ciento	108,82	Mínimo 75
Índice de actividad puzolánica: método de la cal, resistencia a la compresión a los 7 días, MPa	9,76	Mínimo 5,5

Fuente: elaboración propia, según resultados de análisis.

Figura 19. **Finura, retenido tamiz 45 μ m (No. 325)**

a. Muestra cemento SRM 114



b. Muestra de ceniza



c. Presión en la boquilla
a $10 \pm 0,5$ psi



d. Residuo de la muestra de cemento



Fuente: Laboratorios de Química Industrial y Morteros CII/USAC,
12 de septiembre de 2011.

Figura 20. **Índice de actividad puzolánica con cemento**

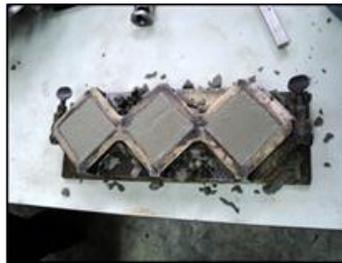
a. Cemento, puzolana y arena



b. Trabajabilidad en la mesa de *flow*



c. Cubos de mezcla



Fuente: Laboratorio de Morteros CII/USAC, 19 de septiembre de 2011.

Figura 21. **Índice de actividad puzolánica con cal**

a. Cemento, puzolana y arena



b. Trabajabilidad en la mesa de *flow*



Continuación de la figura 21.

c. Cubos de mezcla



Fuente: Laboratorio de Morteros CII/USAC, 20 de septiembre de 2011.

3.5. Composición química de la ceniza de cáscara de arroz alrededor de varios países

Los análisis químicos de muestras de ceniza de cáscara de arroz de varios países alrededor del mundo muestran que los rangos de contenido de sílice entre el 90 y el 95 por ciento. Los óxidos de potasio (K_2O) y sodio (Na_2O), se producen como impurezas principales. El contenido de K_2O de una muestra de RHA puede variar entre 1 y 5 por ciento, dependiendo del tipo y la cantidad de fertilizantes que se utilizan para el cultivo del arroz. Las impurezas como los óxidos de calcio (CaO), magnesio (MgO), y fósforo (P_2O_5), se encuentran en cantidades más pequeñas (es decir, menos del 1 por ciento) de cada una de estas.

Los estudios realizados a la cáscara de arroz por varios países como Estados Unidos de Norte América (Berkeley, Universidad de California), Bangkok (Instituto Asiático de Tecnología), Kapur, Japón, han demostrado que el material puede ser comparable a otras puzolanas.

Las aplicaciones de ceniza de cáscara de arroz en cementos pueden ser específicas para el trabajo en función de las características físico-químicas de la ceniza que muestre en su disponibilidad. Una composición química típica de ceniza cáscara de arroz se da en la tabla XIV.

Tabla XIV. Composición química representativa en países como Estados Unidos de Norte América, Bangkok, Kapur, Japón, de la ceniza de cáscara de arroz

Composición química	Porcentaje
Óxido de silicio (SiO_2)	90,0
Óxido de aluminio (Al_2O_3)	0,1
Óxido de calcio (CaO)	0,4
Óxido de magnesio (MgO)	0,3
Óxido de potasio (K_2O)	2,41
Óxido de hierro (Fe_2O_3)	0,4
Óxido de manganeso (MnO)	0,11
Carbono	2,7
Pérdida por ignición	4,2

Fuente: Mehta, P.K.

3.6. Especificación de la ceniza de cáscara de arroz como puzolana artificial para concreto o mortero, siguiendo los métodos de prueba a cenizas volantes o puzolanas naturales para uso en cemento Portland para concreto ASTM C-618, ASTM C-311

Estas especificaciones cubren las cenizas volantes de carbón y otro tipo de puzolanas naturales crudas y calcinadas, así como los procedimientos de muestreo y pruebas de ensayos para su uso en el cemento Portland para concreto y mortero, donde se muestre la acción puzolánica, u otras propiedades que se atribuyen normalmente a las cenizas volantes o puzolanas.

3.6.1. Resultados

A continuación se presentan los resultados de los análisis químicos, físicos y mecánicos realizados a la cáscara de arroz, según lo requieren las especificaciones.

- Análisis Químico

Los resultados obtenidos son dependientes del proceso de cultivo del arroz, por ello sus características químicas se diferencian entre un país y otro. En la tabla XV se muestra la composición química que tiene la cascara de arroz en Guatemala.

Tabla XV. **Resultados de la composición química de la ceniza de cáscara de arroz calcinada (Guatemala)**

Parámetro	Resultados Porcentaje
Óxido de Calcio (CaO)	1,177 ± 0,12
Óxido de Magnesio (MgO)	0,715 ± 0,07
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	0,572 ± 0,14
Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	<0,001
Trióxido de azufre (SO ₃)	0,183 ± 0,036
Densidad (gr/cm ³)	2,0868
Humedad	5,99
Pérdida por Ignición	7,73 ± 0,68

Fuente: elaboración propia, según resultados de análisis.

- **Análisis físicos**

Los resultados obtenidos son dependientes del proceso de calcinación de la cáscara y la molienda de la ceniza. En la tabla XVI se muestran los parámetros evaluados y los respectivos resultados que posee la ceniza de cáscara de arroz calcinada.

Tabla XVI. Resultados de los análisis físicos de la ceniza de cáscara de arroz calcinada (Guatemala)

Parámetro	Resultados
Densidad (gr/cm ³)	2,09
Finura tamiz 325 (45 μm), por ciento	55,61
Aumento de la contracción por secado de barras de mortero, por ciento	0,01
Requerimiento de agua, por ciento	140,50

Fuente: elaboración propia, según resultados de análisis.

Figura 22. Finura, retenido tamiz 45 μm (No. 325)

a. **Muestra de ceniza**



Continuación de la figura 22.

b. Colocación de la muestra tamiz No. 325
tamiz No. 325



c. Lavado de la muestra
 69 ± 4 KPa



Fuente: Laboratorios de Química Industrial y Morteros CII/USAC, 14 de septiembre de 2011.

Figura 23. **Aumento de la contracción por secado de barras de mortero**

a. Cemento, puzolana y arena



b. Trabajabilidad en la mesa de *flow*



Continuación de la figura 23.

d. Flujo en la mesa de *flow*



d. Moldes para barras de mortero



e. Aumento de contracción por secado de barras de mortero.



Fuente: Laboratorio de Morteros CII/USAC, 21, 28 de septiembre y 6 de octubre del 2011.

3.7. Especificaciones y propiedades mecánicas para las cenizas volantes y puzolanas para su uso con cemento ASTM C 311 y su uso con cal ASTM C 593

Esta especificación cubre las cenizas volantes, puzolanas artificiales y naturales en estado crudo o calcinado, evaluando así las puzolanas que contienen cal disponible para su uso con cal en morteros plásticos, mezclas no plásticas y otras mezclas que afectan a la reacción puzolánica.

3.7.1. Resultados

Se presenta el índice de actividad de la fuerza con cemento Portland y desarrollo de la fuerza cal puzolana, estos ensayos respectivos a evaluar la propiedad físico mecánica que aporta la puzolana al mortero de cemento y cal.

- **Análisis físicos mecánicos**

Los resultados de los ensayos físico mecánicos son dependientes de la temperatura y la duración de la combustión para poder desarrollar la sílice en estado amorfo (no cristalino) y la molienda para que la actividad puzolánica se desarrolle al momento de unirla con cemento y cal.

En la tabla XVII se observa los resultados de los análisis físicos mecánicos de la ceniza de cáscara de arroz calcinada en su desarrollo de la fuerza cemento puzolana, y en la tabla XVIII los análisis físicos mecánicos de la ceniza de cáscara de arroz calcinada en su desarrollo de la fuerza cal puzolana.

Tabla XVII. **Resultados de los análisis físicos mecánicos de la ceniza de cáscara de arroz calcinada, desarrollo de la fuerza cemento puzolana**

Resistencia a la compresión	Resultados (psi)
A los 8 días	1 858,85 1 909,90
Promedio	1 884,38
A los 28 días	3 363,95 3 492,77
Promedio	3 428,36

Fuente: elaboración propia, según resultados de análisis.

Tabla XVIII. **Resultados de los análisis físicos mecánicos de la ceniza de cáscara de arroz calcinada, desarrollo de la fuerza cal puzolana**

Resistencia a la compresión	Resultados (psi)
A los 7 días	1 722,11 1 110,57
Promedio	1 416,34
A los 14 días	1 760,23 1 737,29
Promedio	1 748,76
A los 28 días	2 155,00 2 187,34
Promedio	2 171,17

Fuente: elaboración propia, según resultados de análisis.

Tabla XIX. **Resultados de peso, área y resistencia a compresión del índice de fuerza con puzolana**

Mezcla control				
Edad	Peso g	Área cm²	Resistencia kg/cm²	Resistencia lb/pulg²
8	275,10	26,010	142,25	2 023,29
8	277,55	25,908	139,34	1 981,85
28	280,10	26,112	222,12	3 159,25
28	281,80	25,806	220,88	3 141,60
Mezcla cemento, puzolana y arena				
Edad	Peso g	Área cm²	Resistencia kg/cm²	Resistencia lb/pulg²
8	262,10	26,781	130,69	1 858,85
8	265,20	26,884	134,28	1 909,90
28	265,20	26,214	236,51	3 363,95
28	264,60	26,266	245,57	3 492,77
Mezcla cal, puzolana y arena				
Edad	Peso g	Área cm²	Resistencia kg/cm²	Resistencia lb/pulg²
7	221,50	25,604	121,08	1 722,11
7	227,10	25,806	78,08	1 110,57
28	236,40	25,806	151,51	2 155,00
28	235,90	26,010	153,79	2 187,34

Fuente: elaboración propia, según resultados de análisis.

Se observa en la tabla XIX que no hay mayor cambio en el volumen de los cubos de la mezcla control y las diferentes mezclas, esto se debe a que la puzolana se amalgama bien con el cemento y la cal produciendo una leve expansión que no afecta.

Figura 24. **Resistencia a compresión, mezcla control**

a. Almacenamiento de las muestras



b. Resistencia a compresión



Fuente: Laboratorio de Morteros CII/USAC, 21 y 28 de septiembre de 2011.

Figura 25. **Resistencia a compresión mezcla, cemento más puzolana y arena estándar**

a. Almacenamiento de las muestras



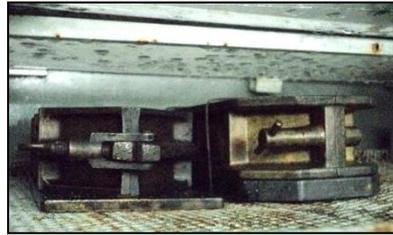
b. Resistencia a compresión



Fuente: Laboratorios de Morteros CII/USAC, 22 y 29 de septiembre de 2011.

Figura 26. **Resistencia a compresión, mezcla cal más puzolana y arena estándar**

a. Almacenamiento de las muestras

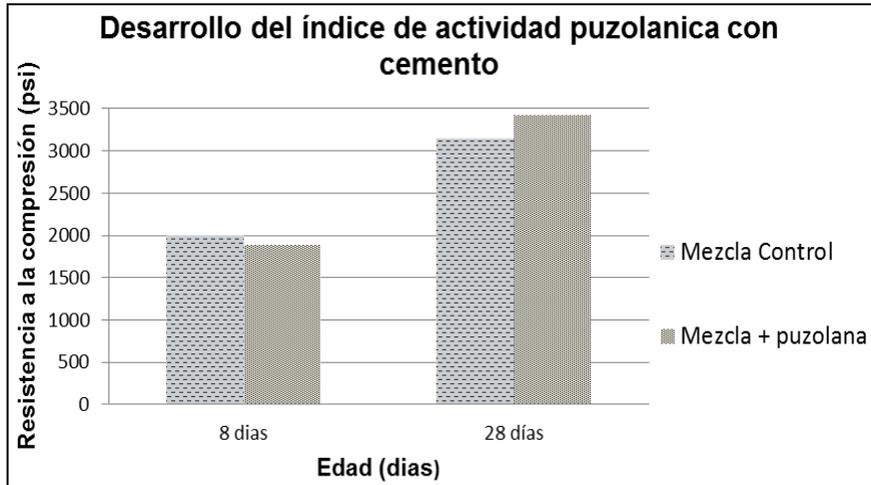


b. Resistencia a compresión 7, 14 y 28 días



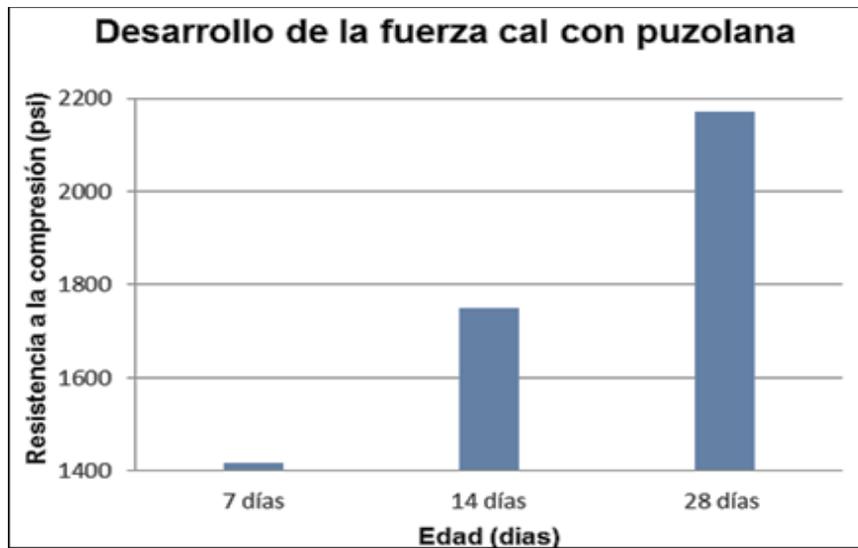
Fuente: Laboratorios de Morteros CII/USAC, 6 de octubre de 2011.

Figura 27. **Resultados del desarrollo del índice de actividad puzolánica**



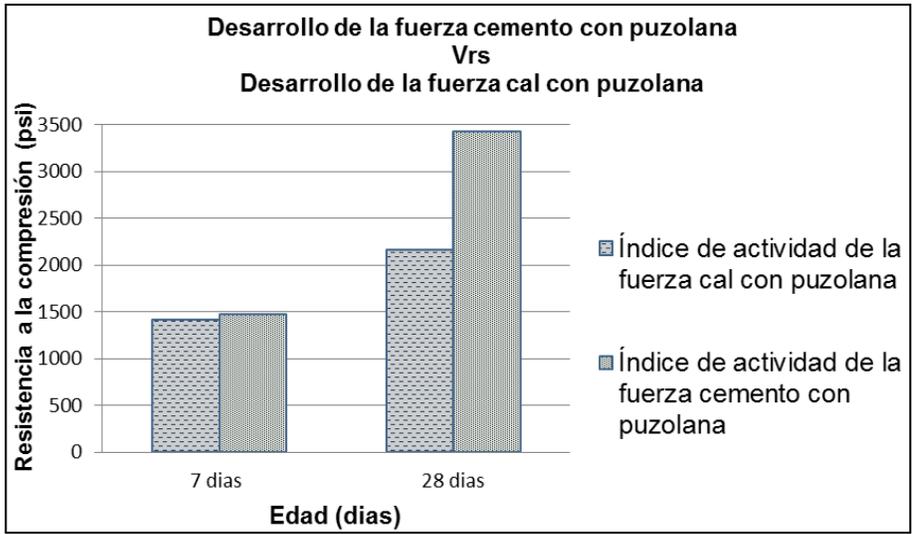
Fuente: elaboración propia, según resultados de análisis.

Figura 28. **Resultados del desarrollo de la fuerza cal con puzolana**



Fuente: elaboración propia, según resultados de análisis.

Figura 29. **Resultados resistencia a compresión de cubos**



Fuente: elaboración propia, según resultados de análisis.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Materiales

- Cemento mezclado UGC

Cumple con lo indicado en la Norma ASTM C-595, por lo que se puede utilizar para preparar cementos mezclados.

- Cal hidratada

La cal deberá cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 207.

- Arena

La arena de grado estándar como se requiere por la Norma ASTM C 109.

4.2. Ceniza volante (Normas ASTM C-311, C-618)

Al obtener los resultados de los ensayos químicos, físicos se procede analizarlos para verificar el desempeño puzolánico de la ceniza volante con el cemento.

4.2.1. Ensayos químicos

- La ceniza presenta niveles inferiores al 2 por ciento en sus componentes químicos como lo son el óxido de calcio, aluminio, magnesio y hierro.

- El resultado de la pérdida por ignición es alto, lo que evidencia un contenido de carbón residual en ella.
- La densidad de la ceniza de cáscara de arroz es de 2,0868 gramos por centímetro cúbico típicamente alrededor del mundo la densidad aparente de la ceniza es de 0,2 gramos por centímetro cúbico, lo que indica la ceniza de cáscara de arroz en estudio es más densa que la relativamente aparente.

4.2.2. Ensayos físicos

- Fineza: el resultado del tamiz No. 325 obtenido, se encuentra fuera de las especificaciones para el uso como puzolana adicionada con cemento Portland.
- Índice de actividad puzolánica con cemento: el resultado obtenido se encuentra dentro de las especificaciones para el uso como puzolana adicionada con cemento.
- Aumento de la contracción por secado de barras de mortero: el resultado obtenido se encuentra dentro de las especificaciones para el uso como puzolana adicionada con cemento.
- Densidad aparente: este parámetro no se encuentra especificado, únicamente se indica sobre la variabilidad que puede existir entre los resultados obtenidos en el laboratorio.
- Requerimiento de agua: la cantidad de agua requerida para una mezcla

de cemento y arena, para un flujo de 56, es de 242 mililitros, mientras que para la mezcla cemento, puzolana y arena, para un flujo de 56 ± 5 es de 340 mililitros, obteniendo un requerimiento de agua de 140,50 en porcentaje de la mezcla de control (cemento y arena).

4.3. Cemento y puzolana artificial para su uso con cal en mortero para acabados (Norma ASTM C 593)

Al obtener los resultados de los ensayos físicos mecánicos se procede analizarlos para verificar el desempeño y reacción puzolánica de la ceniza volante con el mortero de cemento y cal.

4.3.1. Ensayos físico mecánicos

- Requerimiento de agua: la cantidad de agua requerida para una mezcla De cemento, puzolana y arena, para un flujo de 56, es de 242 mililitros, mientras que para la mezcla cal, puzolana y arena, para un flujo de 65 es de 700 mililitros.
- El cemento se estabiliza con el uso de la puzolana mientras que el peso en los especímenes de ensayo se mantiene, la cal no se estabiliza con la puzolana ya que el peso es variable en cada uno de los especímenes.
- Los especímenes a ensayar en resistencia a compresión referida a la ASTM C 109 presentan diferencia, obteniendo en la unión de cemento y puzolana más área efectiva que en la unión cal y puzolana, lo que indica que hay expansión, como se había previsto en el aumento de la contracción por secado de barras de mortero.

- La resistencia a la compresión: en el índice del desarrollo de actividad puzolánica de la mezcla control (cemento más arena estándar) se mantiene, mientras, que la mezcla prueba (cemento más puzolana y arena estándar), se compensa y sobre pasa a los 28 días la resistencia de la mezcla patrón.
- La resistencia a compresión del desarrollo de la fuerza cal puzolana a las edades de 7, 14 y 28 días, presentan un aumento del 35 por ciento en su resistencia a 28 días, mientras que la fuerza cemento puzolana a las edades de 8 y 28 días presenta un aumento del 45 por ciento en su resistencia a 28 días.
- La trabajabilidad del mortero cemento y puzolana es menor con un flujo de 57 y la del mortero de cal y puzolana un flujo de 65; lo que hace mejor la fluidez de este mortero.

CONCLUSIONES

1. Es necesario que la cáscara de arroz tenga un origen de cultivo adecuado, debido a que las propiedades químicas como lo son la sílice SiO_2 , potasio K_2O , y sodio Na_2O pueden ser del 1 al 5 por ciento, dependiendo del tipo y cantidad de fertilizante utilizado en el cultivo.
2. Es preciso que la ceniza artificial tenga un proceso adecuado de calcinación, a una temperatura de 650 grados centígrados durante 2 horas, para su aprovechamiento como adición, pues si esto sobrepasa lo establecido se cristalizará el material.
3. Debido a que la fineza de la cáscara de arroz no cumple, es necesario llevarla a un proceso de molienda hasta alcanzar una fineza de 33 por ciento según Norma ASTM C 595, logrando una fineza de 55 por ciento y 140,5 por ciento de requerimiento de agua.
4. La composición química, según comparación con resultados obtenidos en países como Estados Unidos de Norte América, Bangkok, Kapur, y Japón se mantiene como referencia para Guatemala.
5. La resistencia de la mezcla con adición de cáscara de arroz es lenta respecto a la mezcla control en los primeros días, sin embargo a los 28 días sobrepasa a la resistencia de la mezcla control.
6. El porcentaje de contenido de carbón residual sin quemar en la ceniza de

cáscara de arroz, no tiene efecto negativo si es menor del 10 por ciento, siendo adecuado su uso como puzolana artificial, si este sobrepasara sería perjudicial en su desempeño como adición en cementos o en mortero.

7. La trabajabilidad del mortero, cemento y puzolana es menor que la del mortero de cal y puzolana; lo que hace mejor la fluidez de este mortero dándole un adecuado uso para acabados, siendo aún más baja su resistencia a compresión.
8. La adición de puzolana artificial, como la cáscara de arroz, determino resultados satisfactorios de las propiedades físico mecánicas de morteros, utilizando cemento UGC.

RECOMENDACIONES

1. Se debe llevar un control estricto en el uso de fertilizantes para el cultivo del arroz, para no alterar las propiedades químicas de la cáscara de arroz que se vaya a utilizar como puzolana artificial.
2. Al calcinar la cáscara de arroz, se debe considerar la temperatura y tiempo requerido, ya que de lo contrario no se tendrán las propiedades para su uso como puzolana activa.
3. Se debe implementar un proceso de molienda que reduzca el tamaño de partículas para obtener la fineza adecuada y similar a la del cemento.
4. Mantener un monitoreo con los países productores de arroz, para determinar homogeneidad en las propiedades químicas y establecer el adecuado uso de la cáscara de arroz como puzolana artificial.
5. Se debe diseñar, diferentes proporciones de materiales para alcanzar, resistencia y trabajabilidad en morteros de cal y cemento, de acuerdo a su aplicación.
6. Es necesario tener control del contenido de carbón en la puzolana debido a que si excede el 10 por ciento afecta el desempeño del mismo.
7. Diseñar morteros con adiciones en otros tipos de cemento para verificar y mejorar las propiedades de uso.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Asociación Guatemalteca del Arroz (ARROZGUA)* [en línea]
www.asociación.guatemaltecadelarroz.gt.com. [Consulta: 24 de enero de 2012]
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 de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2000, p. 110.
3. COOK, D. J. *Rice husk ash, cement replacement materials*. Guildford, United Kingdom. Surrey University Press, Swammy R, vol 3. 1986, p. 171-196.
4. GODOY FERNÁNDEZ, Oscar Rodrigo. *Desarrollo y aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006, p 156.
5. *International Plant Nutrition Institute (IPNI) Northern Latin America* [en línea].
<http://www.ipni.net/>. [Consulta: 12 de diciembre de 2011].

6. MARTINEZ ROSALES, Edgar Jacob. *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 de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. p.70.
7. MÉNDEZ MARIANO, Roberto Román. *Determinación de la reactividad puzolánica de adiciones minerales de origen natural con el cemento Portland*. Tesis Maestro en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional, centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional, Oaxaca México, 2008. p. 93.
8. METHA, P.K, *Properties of blended cements made from rice husk ash*. Tomo 9. vol. 74. J. Amer. Con. Inst., 1977, p. 440-442.
9. _____. *Technology alternatives for the use of rice husks*. Tomo 4 vol. 9. J. Amer. Con. Inst., 1983, p 7-9.
10. _____. FOLLIARD, K.J. *Rice husk ash unique supplementary cementing material and durability aspects: advances in concrete technology*. *Proceedings Second CANMET/ACI International Symposium*, American Concrete Institute Las Vegas, Nevada, USA, 1995. p 531-542.
11. *Ministerio de Alimentación y Ganadería (MAGA)* [en línea]. www.maga.gob.gt. [Consulta: 25 de enero de 2012]

12. ZHANG, Min-Hong; MALHOTRAV, Mohan. *High-performance Concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing materials* 6^a ed. vol. 93. American Concrete Institute Materials Journal (United States) 1996. p 629-636.

ANEXOS



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



Nº 17162

O.T. No. 28653

No. Informe QUINDLAFIQ 62-11

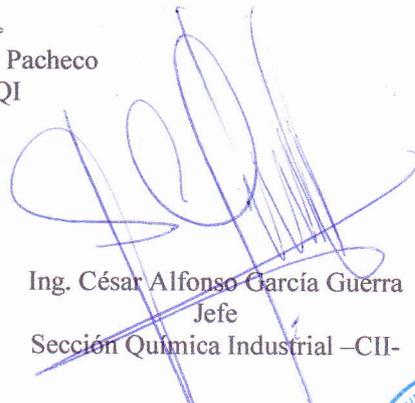
Interesado: **Beicky María de los Ángeles Juárez Quevedo**
Muestra: Puzolana Artificial
Fecha: Guatemala, 26 de Agosto de 2011

Evaluación de la composición química de la puzolana Artificial por métodos complexométricos.

Parámetro*	Resultados
% Calcio	1.177 ± 0.12
% Magnesio	0.715 ± 0.07
% Hierro	0.572 ± 0.14
% Aluminio	< 0.001
% Trióxido de Azufre (SO ₃)	0.183 ± 0.036
Densidad (g/cm ₃)	2.0868
Humedad (%)	5.99
Perdida por ignición (%)	7.73 ± 0.68

* Muestra proporcionada por el interesado


M.Sc. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
Coordinadora de LAFIQ-QI


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


Vo. Bo. Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora
Centro de Investigaciones de Ingeniería CII/USAC





**FINURA RETENIDO TAMIZ 325 (45µm)
NORMA ASTM C-311**

INFORME No. S.C. - 069

HOJA 1/1

O.T. No. **28648**

INTERESADO: Belcky Maria de los Angeles Juarez Quevedo, Carnet: 200515916
PROYECTO: Trabajo de graduación "La utilización de cascara arroz bajo el proceso de calcinación controlada como puzolona artificial en el diseño de mortero para acabados"
DIRECCIÓN: Ciudad Guatemala
FECHA: 15 de febrero de 2012

MUESTRA	% FINURA	Especificaciones de norma ASTM C - 595	Especificaciones de norma ASTM C - 618
Ceniza de cascarilla de arroz	55.61	Máximo 20 %	Máximo 34 %
Fecha de ensayo	19/9/2011		

Observaciones: I. Muestra proporcionada por el interesado

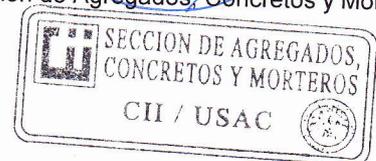
ATENTAMENTE,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros



E.R.



**AUMENTO DE CONTRACCIÓN POR BARRAS DE MORTERO
NORMAS ASTM C-311 Y C-157**

INFORME No. S.C. - 071

HOJA 1/1

O.T. 28648

INTERESADO: Belcky Maria de los Angeles Juarez Quevedo, Carnet: 200515916
PROYECTO: Trabajo de graduación "La utilización de cascara arroz bajo el proceso de calcinación controlada como puzolona artificial en el diseño de mortero para acabados"
DIRECCION: Ciudad Guatemala
FECHA: 15 de febrero de 2012

BARRA MEZCLA CONTROL	LECTURAS RELATIVAS			% DE EXPANSIÓN	
	Lectura comparación 15 min.	Lx			
		7 Dias	28 Dias		
1	2.26	2.27	2.27		0.00
2	2.11	2.13	2.13		0.00
				PROMEDIO	0.00

BARRA MEZCLA + PUZOLANA	LECTURAS RELATIVAS			% DE EXPANSIÓN	
	Lectura comparación 15 min.	Lx			
		7 Dias	28 Dias		
1	4.42	4.45	4.46		0.01
2	2.98	3.01	3.03		0.01
3	4.04	4.06	4.08		0.01
				PROMEDIO	0.01

Aumento de expansión por secado	0.01 %
---------------------------------	--------

OBSERVACIONES: Materiales proporcionados por el interesado.
 Las barras se expandieron.
 Cemento UGC Cementos Progreso

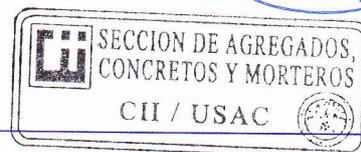
ATENTAMENTE,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
 Directora CII/USAC



[Signature]
 Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
 Jefa Sección Agregados, Concretos y Morteros



E.R.



ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLANICA CON CEMENTO

ASTM C-311

INFORME No. S.C. - 75

HOJA 1/2

O.T. No. 28648

INTERESADO:

PROYECTO:

FECHA:

Belcky Maria de los Angeles Juárez Quevedo, Carnet: 200515916
Trabajo de graduación "La utilización de cascara arroz bajo el proceso de calcinación controlada como puzolona artificial en el diseño de mortero para acabados"
16 de febrero de 2012

Resultados tabla 1: mezcla control

No. CUBO	FECHA DE FUNDICION	EDAD en días	PESO en gr	AREA en cm ²	CARGA en Kg.	RESISTENCIA kg/cm ²	RESISTENCIA lb/plg ²
1	20/09/2011	8	275.10	26.010	3,700	142.25	2023.29
2	20/09/2011	8	277.55	25.908	3,610	139.34	1981.85
3	20/09/2011	28	280.00	26.112	5,800	222.12	3159.25
4	20/09/2011	28	281.80	25.806	5,700	220.88	3141.60

Resultados tabla 2: mezcla + puzolana

No. CUBO	FECHA DE FUNDICION	EDAD en días	PESO en gr	AREA en cm ²	CARGA en Kg.	RESISTENCIA kg/cm ²	RESISTENCIA lb/plg ²
1	20/09/2011	8	275.10	26.781	3,500	130.69	1858.85
2	20/09/2011	8	277.55	26.884	3,610	134.28	1909.90
3	20/09/2011	28	280.00	26.214	6,200	236.51	3363.95
4	20/09/2011	28	281.80	26.266	6,450	245.57	3492.77

Porcentaje de indice de actividad puzolanica con cemento a los 8 dias:

94

Porcentaje de indice de actividad puzolanica con cemento a los 28 dias:

108.82



ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLANICA CON CEMENTO

ASTM C-311

INFORME No. S.C. - 75

HOJA 2/2

O.T. No. 28648

INTERESADO:

PROYECTO:

Belcky Maria de los Angeles Juárez Quevedo, Carnet: 200515916
Trabajo de graduación "La utilización de cascara arroz bajo el proceso de calcinación controlada como puzolona artificial en el diseño de mortero para acabados"

FECHA:

16 de febrero de 2012

Porcentaje requerimiento de agua para el indice de actividad puzolanica:

140.50

Observaciones tabla 1:

- I. Flujo de muestra: 56 %
- II. Relación agua/cemento: 0,48
- III. Representativo de la Fundición:
Mezcla patrón

Observaciones tabla 2:

- I. Flujo de muestra: 57 %
- II. Relación agua/(cemento+puzolana): 0,68
- III. Cantidad de puzolana: 100 gr
- IV. Cantidad de agua requerida: 340 ml
- VI. Representativo de la Fundición:
Mezcla + puzolana

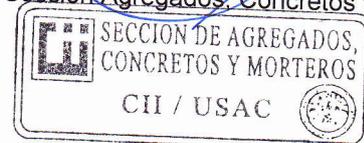
Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección Agregados, Concretos y Morteros



E.R.



DESARROLLO DE LA FUERZA CAL PUZOLANA

ASTM C-593

INFORME No. S.C. - 76

O.T. No. 28648

INTERESADO: Belcky Maria de los Angeles Juarez Quevedo, Carnet: 200515916
 PROYECTO: Trabajo de graduación "La utilización de cascara arroz bajo el proceso de calcinación controlada como puzolona artificial en el diseño de mortero para acabados"

FECHA: 16 de febrero de 2012

Resultados:

No. CUBO	FECHA DE FUNDICION	EDAD en días	PESO en gr	AREA en cm ²	CARGA en Kg.	RESISTENCIA kg/cm ²	RESISTENCIA lb/plg ²
1	29/09/2011	7	221.50	25.604	3,100	121.08	1722.11
2	29/09/2011	7	227.10	25.806	2,015	78.08	1110.57
3	29/09/2011	14	234.00	25.857	3,200	123.76	1760.23
4	29/09/2011	14	235.50	25.503	3,115	122.14	1737.29
5	29/09/2011	28	236.40	25.806	3,910	151.51	2155.00
6	29/09/2011	28	235.90	26.010	4,000	153.79	2187.34

- OBSERVACIONES :
- I. Flujo de muestra: 65
 - II. Relación agua/(cal+puzolana): 1,30
 - III. Cantidad de cal hidratada: 180 gr
 - IV. Porcentaje de puzolana con respecto ala cal: 2
 - V. Representativo de la Fundición:
Mezcla + puzolana

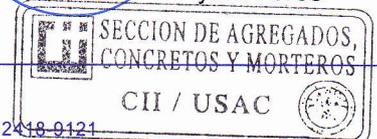
Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
 Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
 Jefa Sección Agregados, Concretos y Morteros



E.R.



ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLANICA CON CEMENTO

ASTM C-311

INFORME No. S.C. - 75

HOJA 2/2

O.T. No. 28648

INTERESADO:

PROYECTO:

FECHA:

Belcky Maria de los Angeles Juárez Quevedo, Carnet: 200515916
Trabajo de graduación "La utilización de cascara arroz bajo el proceso de calcinación controlada como puzolona artificial en el diseño de mortero para acabados"
16 de febrero de 2012

Porcentaje requerimiento de agua para el indice de actividad puzolanica: 140.50

Observaciones tabla 1:

- I. Flujo de muestra: 56 %
- II. Relación agua/cemento: 0,48
- III. Representativo de la Fundición:
Mezcla patrón

Observaciones tabla 2:

- I. Flujo de muestra: 57 %
- II. Relación agua/(cemento+puzolana): 0,68
- III. Cantidad de puzolana: 100 gr
- IV. Cantidad de agua requerida: 340 ml
- VI. Representativo de la Fundición:
Mezcla + puzolana

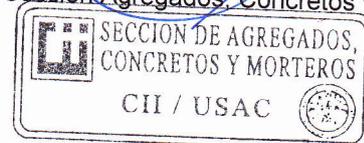
Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección Agregados, Concretos y Morteros



E.R.