



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

**DESARROLLO Y APLICACIONES DE LOS CEMENTOS
MEZCLADOS HIDRÁULICOS**

Oscar Rodrigo Godoy Fernández

Asesorado por el Ing. Sergio Vinicio Castañeda Lemus

Guatemala, noviembre de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO Y APLICACIONES DE LOS CEMENTOS
MEZCLADOS HIDRÁULICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

OSCAR RODRIGO GODOY FERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

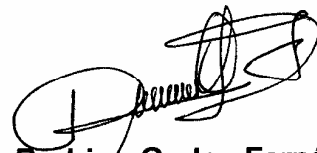
DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Jeovany Miranda Castañón
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DESARROLLO Y APLICACIONES DE LOS CEMENTOS MEZCLADOS HIDRÁULICOS,

tema que se me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, el 17 de agosto de 2006.



Oscar Rodrigo Godoy Fernández



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



Guatemala 17 de octubre de 2006

Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
Coordinador del área de materiales
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Quiñónez de la Cruz:


Me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **“Desarrollo y Aplicaciones de los Cementos Mezclados Hidráulicos”**, elaborado por el estudiante universitario **Oscar Rodrigo Godoy Fernández**, quien contó con mi asesoría.

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

Agradezco a usted la atención a la presente.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ing. Sergio Vinicio Castañeda Lemus
Asesor Trabajo de Graduación

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 27 de octubre de 2 006

Ing. Oswaldo Romeo Escobar Álvarez
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Escobar Álvarez.

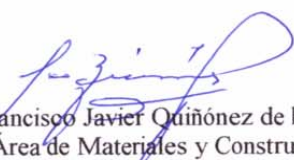
Me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **DESARROLLO Y APLICACIONES DE LOS CEMENTOS MEZCLADOS HIDRÁULICOS**, elaborado por el estudiante universitario **Oscar Rodrigo Godoy Fernández**, quien contó con la asesoría del Ingeniero Sergio Vinicio Castañeda Lemus.

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

Agradezco a usted la atención a la presente.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
Coordinador Área de Materiales y Construcciones Civiles



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Sergio Vinicio Castañeda Lemus y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación del estudiante Oscar Rodrigo Godoy Fernández, titulado DESARROLLO Y APLICACIONES DE LOS CEMENTOS MEZCLADOS HIDRÁULICOS, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

~~Ing. Oswaldo Romeo Esobar Álvarez~~



Guatemala, noviembre 2006.

/bbdeb.

"TODO POR TI CAROLINGIA MÍA"
Dr. Carlos Martínez Durán, 2006 centenario de su nacimiento

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.497.06

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: **DESARROLLO Y APLICACIONES DE LOS CEMENTOS MEZCLADOS HIDRÁULICOS**, presentado por el estudiante universitario **Oscar Rodrigo Godoy Fernández**, procede a la autorización de impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, noviembre de 2006

/cc

Todo por ti, Carolina Mía
Dr. Carlos Martínez Durán
2006: Centenario de su Nacimiento

AGRADECIMIENTO A:

**Dios Padre y
María Santísima**

Por infundir en mi vida sabiduría y fortaleza para encaminar mis pasos inmerso en la confianza de su infinita bondad y misericordia.

**Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Fuente de conocimiento y constructora de sueños.

**Facultad de
Ingeniería**

Con cariño y respeto.

**Ing. Sergio Vinicio
Castañeda Lemus**

Con aprecio, por colaborar y compartir conmigo sus conocimientos y tiempo para la realización de este trabajo de graduación.

ACTO QUE DEDICO A:

- Mi Padre,
Rafael** Gracias por la fortaleza con que has plasmado cada una de las huellas de tu inalcanzable vida, sacrificio y entrega, que orgullosamente me han encaminado en el exitoso sendero del hacer y el saber.
- Mi Madre,
Margarita** Gracias por ser en mi vida el eterno e infinito arcoiris de amor, que incansablemente ha sabido compartir y velar mis sueños batallando siempre por un hermoso despertar.
- Mi Hermano** José, gracias por siempre ser el valiente guerrero y guardián de cada una de mis luchas y sueños.
- Mi Hermano** Francisco, gracias por permitirme palpar en tus ser el más bello paisaje donde la luz de tu sonrisa trazan la humildad y nobleza junto a la que dichosamente me has permitido caminar.
- Mi sobrina** Mariandrea, por devolverme de nuevo al mundo de la ilusión y fantasía.
- Mi Tía** Estelita, gracias por la más sincera y persistente lucha que siempre ha buscado la realización de nuestros anhelos.

Mi Tío

Rodolfo, te agradezco con profundo amor donde quiera que estés el haberme enseñado a luchar por la victoria aún perdida la batalla.

Mis amigos

Maydelis, Lizzi, Guby, Jose, Isabel, Ximena, Billy, Majo, Javier, Astrid, Dina, Otto C., Dany, Wilder, Pepe y Amílcar.

**Mi Padre Dios
y mi Santísima
Madre María**

Por sobre toda las cosas, sentido de mi vida y esencia de mi existencia, por la dicha de haberme regalado a cada uno de ustedes, invaluables tesoros que hacen única e incomparable mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1 ANTECEDENTES	1
2 CEMENTOS MEZCLADOS HIDRÁULICOS	9
2.1 Definición	9
2.2 Generalidades	9
2.3 Tipos - de acuerdo a Norma ASTM C-91 y C-595 -	11
2.3.1 Cementos de mampostería	11
2.3.1.1 Tipo N	12
2.3.1.2 Tipo S	12
2.3.1.3 Tipo M	12
2.3.2 Cementos mezclados hidráulicos	12
2.3.2.1 Cemento Pórtland de escoria de alto horno	12
2.3.2.2 Cemento Pórtland puzolánico	13
2.3.2.3 Cemento de escoria	14
2.3.2.4 Cemento Pórtland puzolánico modificado	14
2.3.2.5 Cemento Pórtland de escoria modificado	14

2.4	Propiedades y ventajas	15
2.4.1	Propiedades	15
2.4.1.1	Calor de hidratación	15
2.4.1.2	Contracciones por secado y fluencia	16
2.4.1.3	Finura	16
2.4.1.4	Permeabilidad	16
2.4.1.5	Reactividad álcali-agregado	17
2.4.1.6	Requerimiento de agua	17
2.4.1.7	Resistencia mecánica	18
2.4.1.8	Resistencia al ataque de sulfatos	19
2.4.2	Ventajas	19
2.5	Usos de los cementos mezclados hidráulicos	21
2.6	Normativa existente	22
2.6.1	Internacional	23
2.6.2	Regional	25
2.6.2.1	Norte América	25
2.6.2.2	Sur América	26
2.6.2.3	Centro América	30
2.6.3	Nacional	31
2.7	Ensayos aplicables a cementos mezclados hidráulicos	32
2.7.1	Ensayos químicos	33
2.7.2	Ensayos físico-mecánicos	33
2.7.2.1	Resistencia a la compresión	33
2.7.2.2	Expansión en autoclave	34
2.7.2.3	Demanda de agua	34
2.7.2.4	Densidad	34
2.7.2.5	Tiempo de fraguado	34
2.7.2.6	Superficie específica	34
2.7.2.7	Porcentaje de finura	34

3 ADICIONES EMPLEADAS EN LOS CEMENTOS

MEZCLADOS HIDRÁULICOS	35
3.1 Definición	35
3.2 Tipos	36
3.2.1 Materiales cementantes	37
3.2.1.1 Cal hidráulica hidratada	37
3.2.1.2 Escoria de alto horno	38
3.2.2 Materiales puzolánicos	41
3.2.2.1 Puzolanas naturales	42
3.2.2.1.1 Origen volcánico	42
3.2.2.1.1.1 Ceniza volcánica	43
3.2.2.1.1.2 Toba volcánica	44
3.2.2.1.2 Origen orgánico	44
3.2.2.1.2.1 Tierras de diatomeas	44
3.2.2.1.2.2 Esquistos opalinos	46
3.2.2.1.3 Origen Sedimentario	46
3.2.2.1.3.1 Arcillas	46
3.2.2.1.3.2 Zeolitas	47
3.2.2.2 Puzolanas artificiales	48
3.2.2.2.1 Origen térmico	48
3.2.2.2.1.1 Arcillas calcinadas	48
3.2.2.2.2 Origen Residual	50
3.2.2.2.2.1 Ceniza volante	50
3.2.2.2.2.2 Humo de sílice	53
3.2.2.3 Puzolanas mixtas o intermedias	54
3.2.2.3.1 Ceniza de cascarilla de arroz	54
3.2.2.3.2 Ceniza de caña de azúcar	55
3.2.3 Materiales nominalmente inertes	56

4	ADICIONES EXISTENTES EN GUATEMALA	57
4.1	Generalidades	57
4.2	Tipos	62
4.2.1	Materiales cementantes	62
4.2.1.1	Cal	62
4.2.1.2	Escoria	64
4.2.2	Materiales puzolánicos	65
4.2.2.1	Naturales	65
4.2.2.1.1	Tobas volcánicas	65
4.2.2.1.2	Ceniza volcánica	66
4.2.2.1.3	Tierras de diatomeas	67
4.2.2.1.4	Arcillas calcinadas	68
4.2.2.2	Artificiales	69
4.2.2.2.1	Ceniza volante	69
4.2.2.3	Mixtos o intermedios	70
4.2.2.3.1	Ceniza de cascarilla de arroz	70
4.2.2.3.2	Ceniza de caña de azúcar	71
4.2.3	Materiales nominalmente inertes	71
4.3	Adiciones existentes en Guatemala caracterizadas en la Facultad de Ingeniería	72
4.3.1	Bancos de materiales caracterizados	73
4.3.2	Resultados obtenidos en la caracterización físico – mecánicas de las adiciones	76
4.3.3	Resultados obtenidos en la caracterización química de las adiciones	78

5	APLICACIONES DE LOS CEMENTOS	
	MEZCLADOS HIDRÁULICOS	79
5.1	Generalidades	79
5.2	Aplicaciones a nivel internacional	80
5.3	Aplicaciones a nivel regional	81
5.4	Aplicaciones a nivel nacional	93
	CONCLUSIONES	95
	RECOMENDACIONES	97
	REFERENCIAS	99
	BIBLIOGRAFÍA	105
	ANEXOS	115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Composición de puzolanas y materiales de construcción	52
2.	Provincias fisiográficas de Guatemala	58
3.	Ubicación de material puzolánico en la cordillera central de Guatemala	63

TABLAS

I.	Principales aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos	22
II.	Clasificación de escorias de alto horno	40
III.	Unidades litológicas de Guatemala	61
IV.	Composición química de escorias y clinker	64
V.	Materiales nominalmente inertes disponibles en Guatemala	71
VI.	Caracterización físico – mecánica de las adiciones de acuerdo con la Norma ASTM - 311	76
VII.	Caracterización físico – mecánica de las adiciones de acuerdo con la Norma ASTM C - 593	77
VIII.	Caracterización química de las adiciones de acuerdo con la Norma ASTM C – 311	78
IX.	Aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos a nivel internacional	82

X.	Aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos a nivel regional Sur América	86
XI.	Aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos a nivel regional Centro América	90
XII.	Aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos a nivel nacional	94

LISTA DE SÍMBOLOS

ACI	American Concrete Institute (Instituto Americano del Concreto)
Al₂O₃	óxido de aluminio
CaO	óxido de calcio
CO₂	dióxido de Carbono
SO₂	óxido de azufre
°C	grados centígrados
Fe₂O₃	óxido férrico
ISO	Organización Internacional para la Estandarización
kg	kilogramo
km	kilómetro
MgO	óxido de magnesio
Na₂O	óxido de sodio
SO₃	trióxido de azufre
SiO₂	dióxido de silicio

GLOSARIO

Adición	Material mineral que es incorporado al cemento o al concreto en diferentes proporciones, a fin de mejorar o transformar algunas de las propiedades.
Álcalis	Nombre dado a los óxidos metálicos del cemento que al ser solubles en el agua pueden actuar como bases enérgicas.
ASTM	Siglas en inglés de la Sociedad Americana para el ensayo e inspección de los materiales (<i>American Society for Testing and Materials</i>).
Cemento Mezclado	Mezcla íntima y uniforme de cemento Pórtland con distintos tipos de adición que desarrollan propiedades para usos especiales en la construcción.
Clinker	Componente principal del cemento constituido por silicatos de calcio obtenido por medio de la cocción hasta fusión parcial de una mezcla convenientemente proporcionada y homogeneizada de materiales debidamente seleccionados.
COGUANOR	Siglas de la Comisión Guatemalteca de Normas.

Escoria	Producto no metálico consistente esencialmente de silicatos y alúmino - silicatos de calcio y otras bases que se desarrolla durante la fabricación de acero y hierro.
Facie	Conjunto de características de una cosa consideradas desde el punto de vista de su formación.
Fraguado	Reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de una mezcla de cemento y agua, la cual puede ser un concreto o mortero.
Mortero	Mezcla constituida por material cementante, agregado fino, agua, con o sin aditivos empleado para obras de albañilería, como material de pega, revestimiento de paredes, etc.
Norma	Documento de aplicación voluntaria aprobado por un organismo de Normalización reconocido que contiene especificaciones técnicas basadas en los resultados de la experiencia y del desarrollo tecnológico.
Permeabilidad	Cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua se encuentra a presión, o bien, la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias.

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

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se desarrollan variables que en forma directa se relacionan con los cementos mezclados hidráulicos y que forman parte del conjunto de conceptos necesarios para el correcto uso y aplicación de los mismos, considerándose así las propiedades, tipos de cementos y la normativa que actualmente establece las especificaciones del material, tanto a nivel nacional como internacional.

Los distintos tipos de cementos mezclados hidráulicos que actualmente son elaborados en Guatemala y en algunas regiones del mundo, son parte del contenido que permite comprender el desarrollo de la industria cementera, poniendo de manifiesto la creciente y necesaria optimización de los recursos naturales que favorecen un adecuado desarrollo sostenible.

Los diversos tipos de adiciones que pueden ser combinadas con el clinker en la elaboración de cementos mezclados hidráulicos, han sido clasificadas para el presente caso en puzolanas naturales, artificiales y mixtas, mismas que presentan características adecuadas para la mejora de las propiedades desarrolladas por el cemento.

Para el efecto, como parte de la metodología se realizó una revisión bibliográfica de trabajos de investigación, enfocados en la descripción y evaluación de materiales puzolánicos, en los que la aplicación y caracterización de los mismos permitió conocer aquellos de considerable actividad puzolánica a nivel nacional e internacional, así como su disponibilidad y potencialidad.

OBJETIVOS

General

Proporcionar información actual que permita conocer las características y aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos a nivel nacional e internacional.

Específicos

1. Presentar las propiedades físico-mecánicas de los cementos mezclados hidráulicos.
2. Conocer los diferentes tipos de cementos mezclados hidráulicos que se producen actualmente a nivel nacional e internacional.
3. Destacar las aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos en la industria de la construcción.
4. Presentar los materiales que de acuerdo a sus propiedades constituyen adiciones para la elaboración de cementos mezclados hidráulicos.
5. Conocer las adiciones actualmente disponibles a nivel nacional para la elaboración de cementos mezclados hidráulicos.
6. Enlistar las normas que establecen las especificaciones para los cementos mezclados hidráulicos actualmente vigentes a nivel nacional e internacional.
7. Complementar investigaciones sobre el tema desarrolladas en Guatemala.

INTRODUCCIÓN

El uso de los cementos mezclados hidráulicos conlleva el empleo de adiciones que de acuerdo a su naturaleza, presentan propiedades hidráulicas que una vez combinadas con el clinker permiten el ahorro de energía, eliminación de materia prima contaminante y la reducción de emisiones de gases en el proceso de fabricación del cemento.

Las propiedades desarrolladas por los cementos mezclados hidráulicos radican esencialmente en una optimización de la trabajabilidad y fluidez de la mezcla, reduciéndose con ello la relación agua-cemento que consecuentemente permite mejorar la resistencia a la compresión a largo plazo, propiedades que si bien varían de acuerdo al tipo de adición empleada, no han sido suficientemente divulgadas dentro del sector de la construcción.

Distintos tipos de material puzolánico natural y artificial presentes en el territorio nacional, han sido objeto de estudios en los que ha sido posible establecer por medio de una evaluación las propiedades, comportamientos y actividad puzolánica para poder ser empleados en la elaboración de cementos mezclados hidráulicos.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, investigaciones realizadas con materiales puzolánicos han permitido la caracterización de los mismos como adiciones activas, encontrándose contemplado el desarrollo de una línea de investigación que permita evaluar la actividad puzolánica de los materiales puzolánicos artificiales generados en el país.

1 ANTECEDENTES

Hace 5000 años, las chozas edificadas por los indios al norte de Chile, constituyen las primeras obras de piedra unidas por un conglomerante hidráulico procedente de la calcinación de las algas. Años más tarde, los asirios y babilonios emplean arcilla como ligante en sus construcciones, mientras los egipcios utilizan para la construcción de las pirámides un mortero a base de yeso y cal¹.

Restos de estructuras megalíticas prehistóricas, testifican aún empíricos procesos constructivos basados en la colocación de bloques de roca sobrepuestos en ausencia de material adhesivo, en ocasiones complementados con sucesivas capas de tierra húmeda para la conformación de paredes.

Las eficientes mezclas de cal y puzolana elaboradas por los griegos para la edificación de estructuras, se originan con el descubrimiento de puzolanas en la Isla de Santorini hacia el año 600 A.C., punto de partida para los romanos, quienes 450 años después, adoptan las mismas técnicas para la elaboración de concreto a base de cal puzolana y, cemento de caliza arcillosa calcinada y puzolana, surgiendo consecuentemente el cemento puzolánico, cuyo nombre se deriva de *Puzzuoli*, población ubicada cerca de Vesubio, Italia, en donde se encontraban los depósitos de ceniza volcánica empleada.

La construcción de muros en Troya y Micénas, surge con la unificación de piedras por medio de arcilla, registrándose 100 años A.C. las primeras construcciones de concreto con empírica técnica y escasa calidad.

Vestigios de culturas mesoamericanas muestran actualmente procesos constructivos basados en mampostería con piezas naturales y artificiales, civilizaciones que progresivamente dominaron nuevas técnicas constructivas apoyadas en el desarrollo de materiales cada vez más durables y resistentes, descubriendo la actividad puzolánica de diferentes materiales como el nejayote, residuo del proceso de nixtamalización del maíz, las cenizas volcánicas y las arcillas calcinadas finamente molidas hasta el punto de producir materiales cementantes de mejor calidad.

La arcilla negra y la cal, constituyeron los ingredientes que una vez mezclados permitieron a los aztecas la obtención de un cemento apto para la construcción, al igual que el barro y el adobe, materiales comúnmente empleados para la edificación de las más antiguas construcciones del valle de México, como el cerro del Tepalcate y la pirámide de Cuicuilco.

La modalidad constructiva de la civilización maya se basó esencialmente en piedras y materiales cementantes como estucos, morteros y concretos, utilizando también un material con las mismas características del concreto consistente en piedras de diversos tamaños rodeadas con un mortero constituido de arena y cemento, o bien, con agregados graduados como arena y caliza. El cemento aparentemente era elaborado a base de cal con adiciones variables de arcilla que le proporcionaba actividad puzolánica.

Hasta el siglo XVIII, los conglomerantes empleados en la construcción contemplaban únicamente yesos y cales hidráulicas, hecho que llevó a desarrollar el interés por el conocimiento e innovación de los cementos.

John Smeaton, ingeniero de Yorkshire, Inglaterra, al reconstruir en 1758 el faro de Eddystone en la costa de Cornish, establece que los morteros formados de caliza con alta proporción de arcilla y puzolana, presentan mejor comportamiento frente a la acción de las aguas marinas, además de comprobar que la presencia de arcilla en las cales, permitía que estas fraguasen bajo el agua hasta el punto de volverse insolubles en ella una vez endurecidas.

En 1824, un material polvoriento que al ser combinado con agua y arena constituía un conglomerante de aspecto similar a las calizas de la isla de Pórtland, es patentizado por Joseph Aspdin bajo el nombre de cemento Pórtland, consistente en una caliza hidráulica de baja temperatura para su cocción, aplicándose por vez primera en 1838 un cemento elaborado en la fábrica de Aspdin en la construcción de un túnel bajo el Río Támesis en Londres. El prototipo del cemento actual fue producido industrialmente por Isaac Johnson, quien en 1845 logra desarrollar temperaturas suficientemente altas para clinkerizar la mezcla de arcilla y caliza empleada como materia prima.

En el transcurso del siglo XIX, el cemento en forma de mortero y concreto se impone como primer material de construcción al recurrir para su fabricación a materias primas abundantes en la naturaleza, considerándose únicamente productos naturales y los subproductos resultantes del sometimiento de éstos a procesos industriales, hecho que resulta viable ante el elevado costo de la conservadora producción del cemento, extendiéndose el uso de cementos naturales en Europa y Estados Unidos.

Los cementos Pórtland modificados por la adición de puzolanas, fueron inicialmente empleados en obras donde se requería básicamente aumentar la resistencia del concreto al ataque de sulfatos, reducir el calor de hidratación a efecto de minimizar agrietamientos por cambios térmicos en masas de concreto, reducir la permeabilidad del concreto y eliminar, o bien, contrarrestar, la reactividad álcalis del cemento y agregados reactivos, como en el caso de puentes, presas y obras hidráulicas².

En Francia, el uso del cemento con adición de ceniza volante se remonta a inicios del siglo XX, registrándose en la década de los cincuenta cementos con adición de escoria, época en la cual los cementos hidráulicos mezclados presentan un considerable desarrollo en el continente Europeo, alcanzado una progresión a partir de la primera crisis del petróleo de 1974 y posteriormente con las regulaciones ambientales vigentes.

La creciente demanda de cemento en España durante la década de los años 60, motiva a la administración a promulgar los pliegos de condiciones de 1960 y 1964 que admiten hasta un 10% de adiciones no nocivas a los cementos Pórtland, siempre y cuando se cumplan todas las condiciones químicas, físicas y mecánicas especificadas. La inclusión mas importante resulta en 1975, cuando el pliego aprobado incluye cemento Pórtland con adiciones activas hasta un 20%, dando así un gran paso en el abaratamiento energético durante la fabricación de los cementos³.

En España, el 80% del cemento consumido en la década de los noventa en el mercado interior (18 millones de toneladas métricas aproximadamente), se constituye por cementos con adiciones activas tales como cenizas volantes, escorias y las mas comúnmente empleadas puzolanas naturales.

En Perú, las adiciones puzolánicas en el cemento se incorporan desde hace más de 10 años, producto que desde entonces representa más del 20% de consumo en el mercado, iniciándose en 1966 y 1967 la fabricación de cemento Pórtland con escorias⁴.

La existente diversidad de puzolanas en México, ha permitido el empleo de éstos materiales en la elaboración de cemento Pórtland puzolánico, pudiéndose mencionar entre éstos la oligoclasa y el cuarzo, así como el vidrio en forma de pumicita y los líticos volcánicos de composición ácida.

Como consecuencia de una intensa actividad volcánica de la era Terciaria Cuaternaria, Guatemala es un país con un considerable potencial de puzolanas naturales de calidad agrupadas en cuatro distintas provincias fisiográficas, constituidas éstas por las Tierras bajas del Petén conformada básicamente por rocas carbonatadas y evaporíticas, la Cordillera Central constituida por rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, la Zona Volcánica compuesta por volcanes activos y extintos que han dado paso al origen de depósitos de tobas riolíticas y dacíticas, y finalmente la Planicie costera del Pacífico, que agrupa principalmente detritos volcánicos modificados por procesos aluviales.

Los accesibles bancos de materiales puzolánicos existentes al sur de la Ciudad de Guatemala, constituyen unidades de significativa potencialidad caracterizadas por su adecuada condición granulométrica y mineralógica, sin embargo hay diversas clases de adiciones que como consecuencia de una complicada posición estratigráfica, pequeños espesores y pseudoplegamiento, son de explotación poco recomendable, sobretodo en el caso de las cenizas volcánicas y tierras de diatomeas.

La determinación de la actividad puzolánica y de la composición química de gran cantidad de puzolanas presentes en el territorio nacional, ha constituido hasta la fecha el común denominador en la mayoría de proyectos de investigación desarrollados en nuestro país.

En 1980 Cementos Progreso, S.A., inicia en Guatemala un programa de estudio de materiales puzolánicos de origen volcánico con el objeto de incorporarlos en la fabricación del cemento Pórtland, a fin de lograr con ello la producción de un cemento Pórtland modificado que manteniendo esencialmente las mismas propiedades, desarrollara una mayor resistencia a los sulfatos y menor calor de hidratación. En 1985, se inicia formalmente en el país la fabricación del cemento Pórtland modificado.

Actualmente, los cementos mezclados producidos por Cementos Progreso son el cemento para sabieta Tipo S (Norma ASTM C-91, *Standard specification for masonry cement*), el Cemento ARI de alta resistencia inicial (Norma ASTM C-1157, *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*), así como el Cemento UGC para uso general en la construcción (Norma ASTM C-1157).

En este mismo sentido resulta importante destacar la presencia en el mercado nacional del cemento Tolteca CPC-40, aplicable en la construcción para todo tipo de estructura o elemento de concreto elaborado con puzolanas naturales de acuerdo a la actual Norma Mexicana para cementos NMX-C-414-ONNCCE, Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos – Especificaciones y métodos de prueba.

En el Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se han realizado varios estudios enfocados al análisis de materiales puzolánicos, surgiendo con ello en 1986 la propuesta de norma para estos materiales con base a la Norma India IS 1727-1967, en la cual se establece el procedimiento de elaboración de una mezcla para ensayos de compresión en morteros de puzolana, referida únicamente para encontrar el índice de actividad puzolánica de este tipo de material.

En 1992 se ejecutó un proyecto de investigación entre el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá (CIID) y la Fundación para la Superación de la Ingeniería (FUNSIN), en el cual se evaluó la factibilidad técnica del uso de puzolanas naturales disponibles en el país en combinación con cal para la producción de un cemento de mampostería.

Este fue ejecutado en tres fases, realizándose en la primera un estudio geológico que estableció la ubicación, cuantificación y caracterización de los materiales existentes, llegando así a establecer los cuatro bancos con mejores características.

En la segunda fase, fueron desarrollados seis estudios con la finalidad de caracterizar cementos elaborados con puzolanas, evaluar el uso de cemento puzolánico en la elaboración de morteros, bloques y estabilización de suelos, así como evaluar la capacidad de muros de mampostería bajo fuerzas estáticas de compresión y corte⁵.

Finalmente, en 1993 se procedió a construir tres viviendas en el Cantón Pueblo Nuevo, Municipio de Palencia, Departamento de Guatemala, a fin de evaluar el comportamiento del cemento puzolánico en condiciones normales de servicio, considerándose técnica y económicamente factible la fabricación de éstos con materiales locales.

Las investigaciones de distintos tipos de adiciones desarrolladas en el CII, han permitido conocer la actividad puzolánica así como las propiedades físico-mecánicas de las escorias y cenizas volcánicas, a través de las cuales han sido evaluadas diversas proporciones en búsqueda de la optimización de las características del producto, así como de otras propiedades de acuerdo a las áreas de aplicación establecidas como objetivo del estudio.

Actualmente está siendo desarrollada en el CII una línea de investigación sobre cementos mezclados hidráulicos con adición de escoria a fin de evaluar la aplicación de éstos en la elaboración de morteros, concretos y bloques para la construcción, encontrándose además contemplado el estudio de cemento con adición de ceniza volante y su aplicación.

Hoy en día, los cementos con adiciones constituyen una importantísima opción para mitigar el impacto ambiental de la producción de los cementos Pórtland ordinarios al reducir los consumos energéticos en su producción y con ello las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, además de permitir el consumo de los desechos de otros procesos industriales potencialmente contaminantes al medio ambiente, como el caso de las cenizas volantes y escorias de altos hornos.

2 CEMENTOS MEZCLADOS HIDRÁULICOS

2.1 Definición

Los cementos mezclados hidráulicos se producen al combinar uniformemente dos tipos de materiales finos, sustituyéndose parte del clinker por adiciones naturales o artificiales con propiedades hidráulicas hasta obtener un material reactivo y de bajo calor de hidratación.

Un cemento mezclado hidráulico es aquel en el cual parte del clinker es sustituida básicamente por un material puzolánico, que una vez pulverizado fija hidróxido de calcio a temperatura ambiente formando compuestos con propiedades hidráulicas al entrar en contacto con la cal y el agua, de acuerdo a la Norma COGUANOR 41001, Cementos Definiciones y Nomenclatura.

2.2 Generalidades

En la fabricación del cemento, aproximadamente la mitad del costo de la producción se deriva del consumo de energía, hecho que ha llevado a establecer medidas enfocadas tanto en la reducción del consumo de energía necesaria para la cocción de clinker, como en la sustitución de combustibles, impulsándose con ello el uso de materiales secundarios en el concepto de cemento Pórtland⁶.

El contenido óptimo de puzolana deberá ser estudiado en función del clinker y de la misma puzolana, a fin de mantener una uniformidad en la producción que garantice el empleo de una necesaria cantidad de puzolana, cuyo exceso provocaría una disminución de la resistencia, y la escasez por su parte, un aumento en el calor de hidratación.

Al elaborar un cemento mezclado ha de contemplarse un análisis de compatibilidad entre los constituyentes a mezclar, debiendo considerarse en el aspecto físico la combinación de las curvas granulométricas de los constituyentes que influye directamente en la reología de la pasta y en la exigencia de agua, por su parte, desde el punto de vista químico, han de ser determinados los respectivos contenidos en sulfatos y álcalis, así como la influencia de éstos sobre los fenómenos de rigidización, fraguado y reacciones con los aditivos⁷.

Para la determinación de proporciones en la elaboración de cementos mezclados, debe considerarse que una determinada cantidad de éste presenta un mayor volumen que la misma cantidad de cemento Pórtland. Sin duda alguna, la introducción de cementos mezclados ha sido difícil debido al prejuicio del consumidor, manteniéndose aún en muchas regiones la idea que el cemento mezclado es de menor calidad, cuando realmente es de calidad distinta.

Los cementos mezclados pueden ser empleados en construcciones de concreto cuando no sean necesarias propiedades específicas de otros tipos de cementos. Varios de los cementos mezclados, en comparación con el cemento tipo I, presentan una adquisición menor de resistencia a edades tempranas; en consecuencia, si se diluye un cemento mezclando agregándole mas puzolana o escoria, el cemento producido deberá probarse en forma cuidadosa en cuanto a cambios de resistencia, durabilidad, contracción, permeabilidad y otras propiedades se refiere. Las temperaturas bajas en el colado y curado, pueden disminuir en forma considerable el incremento de resistencia, aumentando el tiempo de fraguado de un concreto a base de cemento mezclado con fuertes contenidos de escoria o puzolana⁸.

2.3 Tipos

Actualmente el uso de cementos mezclados a base de materiales naturales y artificiales va en aumento, encontrándose establecido en la Norma ASTM C-91, tres distintos tipos de cementos de mampostería constituidos de cemento hidráulico producto de la mezcla de cemento Pórtland o cemento mezclado hidráulico, con materiales de propiedades plásticas y otros ingredientes. La Norma ASTM C-595 (*Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*), especifica cinco tipos de cementos mezclados.

2.3.1 Cementos de mampostería

Son aquellos que de acuerdo a la Norma ASTM C-91, presentan una optimización de propiedades tales como el tiempo de fraguado, trabajabilidad y durabilidad como consecuencia de la combinación de cemento y adiciones, encontrándose tres tipos:

2.3.1.1 Tipo N: Para uso en la preparación de morteros Tipo N de la Especificación ASTM C-270 (*Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*), sin mayor adición de cementos ó cal hidratada, y para uso en la preparación de morteros Tipo S ó M de la Especificación ASTM C-270 cuando el cemento es adicionado de acuerdo a los requerimientos de la especificación ASTM C-270.

2.3.1.2 Tipo S: Para uso en la preparación de morteros Tipo S de la Especificación ASTM C-270, sin mayor adición de cementos ó cal hidratada.

2.3.1.3 Tipo M: Para uso en la preparación de morteros Tipo M de la Especificación ASTM C-270, sin mayor adición de cementos ó cal hidratada

2.3.2 Cementos mezclados hidráulicos

2.3.2.1 Cemento Pórtland de escoria de alto horno (Tipo IS)

Es empleado para uso general en la construcción. Al producir este particular tipo de cemento, la escoria de alto horno granulada de calidad seleccionada es molida junto con el clinker de cemento Pórtland, o bien en forma separada para luego realizar la mezcla con el cemento Pórtland, pudiéndose de igual manera hacer una combinación de molienda y mezclado.

El contenido de escoria de alto horno puede variar entre el 25% y el 70% en peso. La inclusión de aire, resistencia moderada a los sulfatos o bien, moderado calor de hidratación, son propiedades del producto que pueden ser identificadas empleando los sufijos A, MS, MH respectivamente.

2.3.2.2 Cemento Pórtland puzolánico (Tipo IP, Tipo P)

En este caso, la puzolana forma generalmente el 15% al 40 % del peso de la mezcla total, aprovechándose así la propiedad que presenta de combinarse con la cal que se libera durante la hidratación del cemento Pórtland a fin de obtener una mayor estabilización física y química de los concretos. Para este caso se reconocen dos diferente tipos de cementos:

Tipo IP: Cemento puzolánico empleado para uso general en la construcción. Los ensayos de laboratorio indican que el comportamiento de un concreto hecho con cemento tipo IP, es similar al de un concreto de cemento tipo I, aunque en los primeros 28 días, los resultados son ligeramente inferiores para el cemento tipo IP que para el cemento tipo I.

Tipo P: Cemento Pórtland puzolánico destinado a construcciones donde no ha de ser requerida una alta resistencia inicial, sobretodo en estructuras masivas como estribos, presas y pilas de cimentación. La fabricación del mismo conlleva la molienda de clinker de cemento Pórtland con una puzolana adecuada, mezclando cemento Pórtland o cemento Pórtland de escoria de alto horno con una puzolana; o bien, por medio de la combinación de uno de los dos procesos.

2.3.2.3 Cemento de escoria (Tipo S)

Este cemento puede ser empleado en combinación con cemento Pórtland para la elaboración de concreto, y de igual forma, puede ser utilizado en combinación con cal hidratada para la obtención de morteros. Se fabrica mezclando escoria molida de alto horno y cemento Pórtland, mezclando escoria molida de alto horno y cal hidratada, o bien, la combinación de mezclar escoria molida de alto horno, cemento Pórtland y cal hidratada. El contenido mínimo de escoria para este caso es del 70% del peso del cemento de escoria.

2.3.2.4 Cemento Pórtland puzolánico modificado (Tipo I PM)

Se fabrica combinando cemento Pórtland o cemento Pórtland de escoria de alto horno con una puzolana fina, logrando esto por medio de una mezcla de cemento Pórtland con la puzolana, mezclando el cemento Pórtland de escoria de alto horno con la puzolana, moliendo conjuntamente el clinker del cemento Pórtland con la puzolana, o por medio de una combinación de molienda conjunta y de mezclado. El contenido de la puzolana para este caso es menor que el 15% en peso del cemento terminado.

2.3.2.5 Cemento Pórtland de escoria modificado (Tipo I SM)

Se produce combinando durante la molienda el clinker de cemento Pórtland y alguna escoria granular de alto horno, mezclando cemento Pórtland con alguna escoria granular de alto horno finamente molida, o por la combinación de molienda y mezclado. El contenido de escoria es inferior al 25% del peso del cemento terminado.

2.4 Propiedades y ventajas

El hecho de emplear en la elaboración de cemento mezclado proporciones adecuadas de puzolanas realmente eficientes, produce una variación en el comportamiento del producto final en comparación con los cementos Pórtland tradicionales, como la liberación de gran cantidad de hidróxido cálcico, la posibilidad de reacciones de carácter expansivo y sobretodo, el carácter fuertemente exotérmico de las reacciones de hidratación.

2.4.1 Propiedades

2.4.1.1 Calor de hidratación

Las reacciones que tienen lugar en la hidratación del cemento son exotérmicas, y por tanto, provocan un calentamiento de la masa de cemento. Esta variación de temperatura, desde los momentos iniciales de fraguado hasta el endurecimiento del cemento, es causa de retracciones que a su vez dan como resultado el agrietamiento o fisuración observado en algunas obras de construcción que emplean grandes masas de concreto, o bien, en estructuras en las que se utilizan mezclas ricas en cemento⁹.

El uso de cenizas volantes y de escorias molidas reduce la cantidad de calor que se forma en una estructura de concreto. Algunas puzolanas presentan un calor de hidratación del orden del 40% del presentado por el cemento Pórtland. El humo de sílice puede o no reducir el calor de hidratación; sin embargo el calor de hidratación se ve incrementado con la presencia de superplastificantes.

2.4.1.2 Contracciones por secado y fluencia

El efecto de las cenizas volantes, la escoria de alto horno y el humo de sílice en cantidades bajas a moderadas en la contracción por secado y sobre la fluencia del concreto, es generalmente pequeño y de poca importancia práctica. Los concretos que contienen escoria molida en una proporción de 40% a 65% del peso del material cementante total, pueden llegar a presentar una contracción por secado un poco mayor que la correspondiente a un concreto simple. A niveles de sustitución elevados, la fluencia puede aumentar conforme se vayan aumentando los contenidos de ceniza.

2.4.1.3 Finura

Las elevadas superficies específicas que suelen presentar las puzolanas, hacen necesaria la determinación de la finura de las mismas para su empleo en la elaboración de cementos mezclados, así como la relación con las características y propiedades del cemento. Con frecuencia, a una finura de 8% – 10% de residuo en la malla 60um las puzolanas dan una finura Blaine de 5,000 a 10,000 cm^2/g , mientras que el cemento puro presenta 3,000 a 3,500 de finura Blaine¹⁰.

2.4.1.4 Permeabilidad

En condiciones óptimas de curado, las cenizas volantes y las escorias molidas, tienden a reducir la permeabilidad del concreto aún cuando el contenido de cemento sea relativamente bajo; para lo cual el humo de sílice resulta especialmente efectivo.

En los cementos Pórtland tradicionales, la permeabilidad tiende a ser mayor que la desarrollada en un cemento con adición de puzolanas, lo cual es de vital importancia sobre todo en obras de carácter hidráulico. En los cementos con adición, el aumento de la plasticidad permite mayores expansiones y contracciones que disminuyen el agrietamiento.

2.4.1.5 Reactividad álcali-agregado

La reactividad álcali – sílice entre los álcalis del cemento y la sílice reactiva del agregado puede ser controlada por medio del uso de ciertos aditivos minerales, encontrándose que tanto el humo de sílice, las cenizas volantes y la escoria granulada de alto horno reducen en forma significativa la reactividad álcali – sílice. Las cenizas volantes Clase F, Norma ASTM C-618 (*Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in concrete*), han llegado a disminuir la expansión reactiva hasta en un 70% o más en algunos casos, presentando un resultado menor al caso de las cenizas Clase C¹¹.

2.4.1.6 Requerimiento de agua

El requerimiento de agua en los cementos mezclados varía según el tipo de adición empleada, así un cemento con ceniza volante o escoria demandan un menor requerimiento de agua, caso contrario al cemento con humo de sílice. El requerimiento de agua puede verse reducido moliendo el cemento a mayor finura, logrando con ello mayores resistencias y una reducción de la tendencia a la formación de grietas a causa de la contracción.

2.4.1.7 Resistencia mecánica

El empleo de cementos con cenizas volantes, escoria granulada de alto horno y humo de sílice contribuyen a la adquisición de resistencia del concreto, la cual resulta menor sobretodo a bajas temperaturas respecto a un concreto a base de cemento Pórtland.

De la misma forma, un cemento con adición de puzolana, tiende a presentar un notable aumento en la resistencia a la tracción en avanzadas edades, aumentando con ello la resistencia al agrietamiento, siendo por su parte la resistencia a la compresión menor a edades tempranas, pudiendo llegar a ser igual o mayor en edades avanzadas¹².

En ocasiones, debido a la lenta reacción puzolánica de algunos aditivos minerales, puede llegar a ser necesario un periodo de curado mayor del que normalmente se requiere. En el caso del humo de sílice, este contribuye al desarrollo de resistencia entre los 3 y 28 días¹³.

El desarrollo de la resistencia de un concreto a base de cemento con ceniza volante o escoria molida, es similar al de un concreto normal sometido a un proceso de curado con una temperatura de 21°C. Entre los concretos elaborados con cemento a base de cenizas volantes, desarrollan mayores resistencias aquellos con ceniza clase C que los elaborados con ceniza clase F, últimas en las cuales se ausenta el contenido cementante de las primeras.

La resistencia a compresión del concreto de cementos mezclados a edades tempranas (1,3,7 días) tiende a ser menor que la del concreto de cemento Pórtland como consecuencia de una menor velocidad de reacción de los componentes químicos provenientes de los aditivos. Sin embargo, a edades tardías (50 - 60 días) éstos componentes químicos aún desarrollan reacciones que permiten obtener resistencias superiores en los concretos a base de cementos mezclado.

2.4.1.8 Resistencia al ataque de sulfatos

El cemento con una adecuada proporción de humo de sílice y ceniza volante, tiende a mejorar la resistencia del concreto contra el ataque de sulfatos y efectos del agua de mar, principalmente al reducir la cantidad necesaria de elementos reactivos como el calcio, para que se produzcan las reacciones expansivas con los sulfatos. Sin embargo, el humo de sílice presenta una excelente resistencia a los sulfatos.

2.4.2 Ventajas

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

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

La mayor resistencia que presentan los cementos puzolánicos al ataque de agentes químicos en general, es atribuible a la eliminación de hidróxido de calcio constituido durante la hidratación del cemento por los compuestos formados en la reacción con la puzolana¹⁴.

El aumento de resistencia a la compresión y de impermeabilidad en los cementos mezclados, encuentra su origen en la formación de fases menos densas, así como de poros de menor tamaño, hecho que permite alcanzar mayor durabilidad y mejorar la resistencia al ataque de sulfatos, sobretodo en cementos con adición de escoria de alto horno¹⁵.

Sin duda alguna las ventajas más grandes que presentan los cementos mezclados en la construcción radican en:

- Incremento en la capacidad de producción con inversiones limitadas y realización rápida.
- Reducción de los costos de energía necesaria para la cocción del clinker.
- Utilización óptima de materia primas
- Mayor resistencia al ataque de medios agresivos

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

2.5 Usos de los cementos mezclados hidráulicos

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 (Ver Tabla I).

De igual forma, los cementos mezclados con un contenido de más del 20% de puzolanas no graduadas pueden ser empleados en obras tales como:

- Presas y obras masivas, especialmente de concreto seco compactado con Rodillo
- Caminos de concreto seco compactado o de suelo-cemento compactado
- Construcciones varias de suelo-cemento, muros monolíticos, pisos, bloques y ladrillos prensados, suelo cemento ensacado.
- Cementos de mampostería.

Tabla I. Principales aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos

Tipo de Cemento	Aplicaciones	Requerimiento de Obra
Cemento con ceniza volante Cemento con humo de sílice	<ul style="list-style-type: none"> • Obras marítimas • Obras en contacto con suelos y aguas ácidas • 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	<ul style="list-style-type: none"> • Presas • Canales y puentes • Concretos masivos 	Bajo calor de hidratación
Cemento con ceniza volante Cemento con escoria Cementos con materiales inertes	<ul style="list-style-type: none"> • Concretos inyectados • Morteros de albañilería • Acabados 	Trabajabilidad
Cemento con ceniza volante Cemento con escoria Cemento con humo de sílice	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos prefabricados • Concretos con agregados reactivos 	Reactividad con cal – álcalis

Fuente: CETEC (Centro Tecnológico de Cementos Progreso)

2.6 Normativa existente

El establecimiento de normas, favorece en todo momento el progreso técnico, el desarrollo económico y la mejora de la calidad de vida. De acuerdo con ISO la normalización es la: “actividad que tiene por objeto establecer, ante problemas reales o potenciales, disposiciones destinadas a usos comunes y repetidos, con el fin de obtener un nivel de ordenamiento óptimo en un contexto dado, que puede ser tecnológico, político o económico”.

La normalización del cemento tiene sus inicios como especificaciones de fábrica a finales del siglo XIX, siendo en los comienzos del siglo XX cuando los organismos de normalización de los países industriales establecen normas de ensayo y calidad para los diversos tipos de cementos. Posteriormente, con la generalización de la normativa muchos países procedieron a establecer sus propias normas o bien, adoptar aquellas de mayor significación, hecho que ha obstaculizado la comparación de cementos como consecuencia de los diferentes métodos de ensayo. Actualmente, la normalización a tendido a modificarse como consecuencia de la necesidad de adaptarse a la innovación y procurar especificaciones uniformes que permitan atender convenios de comercio internacional¹⁶.

2.6.1 Internacional

El Comité Europeo de Normalización (CEN), fundado en 1961 en París constituye una Asociación de los Organismos Nacionales de Normalización de 19 países europeos, siendo actualmente los miembros Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

El objetivo específico de esta Organización Europea de Normalización, de la que España forma parte desde su fundación, radica en la promoción del desarrollo del comercio y del intercambio entre los países miembros. Se encuentra constituido por varias subdivisiones entre las que se ubica la Comisión Técnica 51 (TC-51), encargada de redactar las Normas Europeas de cemento con el fin de presentar al usuario innovadoras opciones en busca de un ahorro energético y aprovechamiento de los recursos naturales y artificiales.

Las actividades ejecutadas por el CEN, miembro de los Comités Técnicos de los Organismos Europeos e Internacionales de Normalización, son supervisadas por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) que en 1986 inicia por Orden Ministerial como la única entidad aprobada para desarrollar las tareas de normalización y certificación en este país, siendo reconocida como responsable de la elaboración de las normas españolas UNE (Una Norma Española).

Dentro de la normativa mas recientemente aprobada en España, cabe destacar la aparición de nuevas adiciones como la puzolana natural calcinada, cenizas volantes calcáreas y esquisto calcinado, introduciendo de igual forma en los CEM II, cementos Pórtland con adición, dos porcentajes de sustitución, A de 6% a 20% y B de 21% a 35%, siempre para todas las adiciones admitidas, excepto para el humo de sílice en el que solo es permitido un nivel de adición A del 6% al 10%. También se establece un nivel de adición de escoria de alto horno en el cemento del 81% al 95 %, introduciéndose el cemento V/B con un porcentaje de adición de escorias del 31% al 50%, y del 31% al 50% de la suma de puzolana natural, puzolana calcinada y ceniza volante silíceas.

Actualmente, la mayoría de países europeos centralizan la normalización de cementos en las Normas Españolas UNE, apegándose con ello a todo lo referente a terminología, requisitos, métodos de ensayo y generalidades contenidas dentro de éstas, dentro de las cuales pueden ser mencionadas:

- Norma UNE-EN 197-1:2000 Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.
- Norma UNE-EN 97-1:2000/A1 :2005 Cemento. Parte 1: composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. (inclusión de cementos de bajo calor de hidratación)

- Norma UNE-EN 197-4:2005 Cemento. Parte 4: composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos con escoria de horno alto y baja resistencia inicial.
- Norma UNE 80303-1:2001 Cementos con características adicionales. Parte 1: cementos resistentes a los sulfatos.
- Norma UNE 80303-2:2001 Cementos con características adicionales. Parte 2: cementos resistentes al agua de mar.
- Norma UNE 80303-3:2001 Cementos con características adicionales. Parte 2: cementos de bajo calor de hidratación.

Otros países han incorporado en sus normas este tipo de cemento o establecido especificaciones especiales, como el caso de la Norma India IS 1727-1967. En este mismo sentido, en Japón se establece la Norma JIS R 5210 para cemento Pórtland ordinario y Pórtland con un máximo de adición del 5%.

2.6.2 Regional

2.6.2.1 Norte América

Las Normas establecidas por la American Society for Testing and Materials (ASTM) en Estados Unidos, constituyen sin duda alguna los principales parámetros a seguir en cuanto a ensayos y materiales se refiere, encontrándose dentro de éstas la Norma ASTM C-595, en la cual se contemplan especificaciones básicas para cinco tipos de cementos mezclados destinados a usos generales en la construcción, determinándose en ella la calidad y tipo de materiales a emplear para el también establecido proceso de elaboración.

Por su parte, México cuenta con la Norma Mexicana NMX - C – 414 – ONNCCE – 1999, Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba, establecida por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y edificación, regula desde 1999 los rangos de los componentes que forman los cementos Pórtland puzolánicos, diseñados éstos especialmente para la construcción sobre suelos salinos además de presentar un excelente comportamiento en obras expuestas a ambientes químicamente agresivos. De igual forma se encuentra vigente la Norma NMX-C-273-ONNCCE, Determinación de la actividad hidráulica de las adiciones con cemento Pórtland.

2.6.2.2 Sur América

En el año 1935, es fundado por un grupo de instituciones públicas y privadas el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), constituyendo el Primer Instituto de Normas de Latinoamérica. En 1999, se realiza una revisión de las de las Normas IRAM establecidas con el propósito de simplificar la aplicación del conjunto de normas relacionadas con las características y requisitos de los distintos tipos y clases de cementos comercializados en el país.

De esta manera, son creados dos nuevos documentos en los que se resume toda la información técnica contenida en trece normas.

- Norma **IRAM 50000:2000** - Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción, en la que se contemplan los componentes de los cementos para uso general basados en clínker de cemento Pórtland, así como las proporciones en que deben ser combinados para producir una serie de tipos y clases de cemento, incluyendo también sus exigencias mecánicas, físicas y químicas además de sus condiciones de recepción.
- Norma **IRAM 50001:2000** - Cemento. Cemento con propiedades especiales en la que se especifican los requisitos que deben cumplir este tipo de cementos para su empleo en aplicaciones de características particulares.

En Perú, el Comité Técnico de Normalización de Cementos y Cales, utilizó como antecedente la norma ASTM C-595 para la elaboración de la Norma Técnica Peruana NTP 334.090:2001, en la cual se establecen los requisitos que deben cumplir los cementos Pórtland mezclados de uso general en la construcción. Las normas nacionales sobre cemento comprende la Norma NTP 334.009 que contempla los cinco tipos de cemento Pórtland, las Normas NTP 334.044 y la NTP 334.049 sobre cementos Pórtland puzolánico y Pórtland de escoria respectivamente, así como la Norma NTP 334.073 del cemento Pórtland compuesto y la Norma NTP 334.082 sobre cemento Pórtland adicionado.

La Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), organismo creado en 1958 con la misión de planificar, coordinar y desarrollar las actividades de Normalización y Certificación de Calidad en Venezuela, establece actualmente la Norma COVENIN 3134-04, Cemento Pórtland con adiciones, la Norma Obligatoria COVENIN 0935-04, Especificaciones para cementos Pórtland con escoria, y la Norma COVENIN 0028-93, Cemento Pórtland especificaciones.

La Norma Chilena NCh 148 Of68, establecida por el Instituto Nacional de Normalización (INN), especifica una clasificación de cementos de acuerdo a los componentes, clasificándolos en cementos Pórtland al estar compuestos únicamente por clinker con bajo porcentaje de yeso; cementos Pórtland siderúrgicos al contener éstos clinker, escoria en un porcentaje menor al 30% y yeso; cementos Siderúrgicos, cuando la escoria de alto horno está presente en porcentajes comprendidos entre 30% y 75%, y por último; cementos puzolánicos, cuando el porcentaje de puzolana está entre 30% y 50 %.

En Colombia, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC, constituye el organismo nacional de normalización encargado de establecer las especificaciones de calidad en muchos casos adaptadas de los estándares de la normalización ASTM. En este sentido, las normas NTC 121 y NTC 321 establecen las propiedades físicas, mecánicas y especificaciones químicas de los cementos Pórtland, mientras las normas NTC 30 y 31 clasifican y definen los tipos de cementos. Las normas colombianas, NTC, contemplan la posibilidad de añadirle al cemento Pórtland otros materiales y productos de adición, además del clinker y el yeso, siempre que éstos no afecten las propiedades del cemento resultante.

El Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), establece la Norma INEN 490 basada en la Norma ASTM C-595, en la que se dictan los requisitos y especificaciones para los cementos Pórtland compuestos, o bien, aquellos constituidos con un componente adicional de tipo mineral con potencial hidráulico, como el caso de la puzolana y la escoria.

El Instituto Uruguayo de Normas Técnicas fundado en 1939, establece la Norma UNIT 1024 para cemento Pórtland de bajo calor de hidratación y UNIT 326 para la determinación del calor de hidratación, contemplándose de igual forma la norma UNIT 1046 para cementos compuestos, dentro de la cual se especifican definiciones y requisitos, así como las Normas UNIT 1038, UNIT 1039 y UNIT 1047 cuyo contenido contempla especificaciones y ensayos para materiales puzolánicos a emplear en la fabricación de cemento.

La Asociación Brasileña de Normas Técnicas, ABNT, fundada en 1940, cuenta con Comités Técnicos de Normalización entre los que se encuentra el Comité ABNT/CB-02 encargado de la Normalización del área de la construcción civil, encontrándose establecidas las Normas NBR 5732: Cemento Pórtland común, NBR 5735: Cemento Pórtland de alto horno, Norma: NBR 5736 Cemento puzolánico y Norma NBR 11578: Cemento Pórtland compuesto.

2.6.2.3 Centro América

La Normalización en la región se inicia en 1956 con la creación del Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI), surgiendo seis años mas tarde la Sección de Normalización del ICAITI con el fin de servir al mercado común centroamericano en la promulgación de normas que facilitaran el intercambio comercial, mismo ente que a consecuencia de problemas económicos de los países de la región concluye sus labores en agosto de 1998.

Hacia el año 1984 fue fundado en El Salvador el Centro de Información del Cemento y de Concreto con la finalidad de divulgar conocimientos relacionados al tema por una iniciativa de Cementos El Salvador S.A de C.V., siendo este ente reemplazado en 1994 por el Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC), mismo que establece la Norma Obligatoria NSO 91.13.01.03 basada en la experiencia de las normas técnicas mexicanas y americanas ASTM, en la que se dictan especificaciones para el cemento Pórtland, comprendiendo propiedades físicas y especiales.

Por su parte, en Costa Rica el Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (ICCYC), ha establecido la Norma NCR 40:1990, Norma para cementos Hidráulicos, en la que se incluyen definiciones tanto de los cementos Pórtland, cementos Pórtland puzolánicos, cementos Pórtland modificados con puzolana y cementos Pórtland modificados con caliza, así como de los componentes, estableciendo la clasificación del material de acuerdo a especificaciones y tipos.

La Norma Técnica Obligatoria Nicaragüenses NTON 12 006 – 03: Fabricación, uso y manejo del cemento, preparada por el Comité Técnico de la Construcción de la Comisión Técnica de Normalización y Calidad, establece los requisitos químicos, físicos y de desempeño de los cementos, así como los requerimientos para el empaque, transporte, almacenamiento y uso de los mismos. Esta norma aplica a todos los cementos comercializados en aquella nación bajo las Normas ASTM C-91, ASTM C-150 (*Standard Specification for Portland Cement*) y ASTM C-595.

Actualmente en Honduras no se encuentra establecida norma alguna por parte de una entidad nacional que dicte especificaciones estándar del cemento, desarrollándose una producción apegada a las Norma ASTM C-595.

2.6.3 Nacional

Con el inicio del trabajo de normalización en el ICAITI, se establece el 5 de mayo de 1962 un organismo nacional de normalización por medio del Decreto 1523 del Congreso de la República “Ley de creación de la Comisión Guatemalteca de Normas COGUANOR“, oficializándose su respectivo reglamento por medio del Acuerdo Gubernativo 156 del año 1966, quedando ésta adscrita al Ministerio de Economía, órgano especializado para la elaboración de normas que buscan promover el ordenado desarrollo de las actividades industriales, agrícolas y comerciales

En el año 2005, con la finalidad de facilitar y garantizar el cumplimiento de los requisitos de calidad exigidos hoy en día por el mercado internacional, así como de velar por la competitividad que implica el seguimiento de las normas establecidas en el país, fue decretada la Ley del Sistema Nacional de la Calidad, en la que se establece que el Sistema Nacional de la Calidad integrado en parte por COGUANOR, promoverá la adopción de prácticas de gestión de la calidad a fin de fomentar la misma en cada uno de los bienes y servicios que se ofrecen en el mercado nacional e internacional.

La Norma COGUANOR 41-001, Cementos definiciones y nomenclatura, tiene por objeto establecer la nomenclatura y definiciones de los distintos tipos de cementos, encontrándose definida dentro de la misma el cemento Pórtland de escoria de alto horno, cemento Pórtland puzolánico, cemento Pórtland adicionado, entre otros.

Cabe destacar también la propuesta de norma del CII para la determinación de la Resistencia a la compresión de morteros hechos a base de cal, puzolana y arena, en la cual se establece el equipo, materiales, número de especímenes de ensayo, así como la correcta preparación del mortero y el procedimiento de ensayo, el cual se adecua al establecido en la Norma India IS 1727-1967.

2.7 Ensayos a cementos mezclados hidráulicos

Los métodos de prueba de los cementos mezclados, independientemente del uso al que estén destinados, deberán garantizar no sólo la resistencia requerida a las edades normales luego de 28 días, sino también, el hecho de que la puzolana empleada sea la adecuada para desarrollar propiedades que contribuyan en forma sustancial a la resistencia tardía.

Generalmente, las pruebas físicas y químicas realizadas a los cementos se ejecutan en búsqueda del cumplimiento de las normas de calidad, estableciéndose para ello las Normas ASTM C-595 y ASTM C-91 con los respectivos métodos de ensayo.

2.7.1 Ensayos químicos

El análisis químico (ASTM C-114, *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*) de los cementos ha de ser realizado con la finalidad de establecer:

- Contenidos porcentuales de SO_3 , parámetro que regula el tiempo de fraguado.
- CaO libre y MgO; elementos que en excesivas cantidades pueden llegar a aumentar la expansión provocando agrietamientos y reduciendo la resistencia.
- Pérdida al fuego por medio de la determinación de la cantidad de humedad y CO_2 .
- Residuo insoluble, o bien, la cantidad de materia no soluble en ácido de acuerdo al contenido de adiciones.

2.7.2 Ensayos físico - mecánicos

Por su parte, las pruebas físicas y mecánicas realizadas a los cementos mezclados hidráulicos, permiten establecer:

- 2.7.2.1 Resistencia a la compresión (Norma ASTM C-109, *Standard Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*).

- 2.7.2.2 Expansión en autoclave (Norma ASTM C-151, *Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement*) con la finalidad de conocer el índice de la expansión potencial causada por la hidratación de CaO y MgO que contiene el cemento.
- 2.7.2.3 Demanda de agua (Norma ASTM C-187, *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*).
- 2.7.2.4 Densidad del cemento (Norma ASTM C-188; *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*) a fin de optimizar las proporciones de la mezcla para la elaboración de concreto.
- 2.7.2.5 Tiempo de fraguado (Norma ASTM C-191; *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*) tanto inicial como final.
- 2.7.2.6 Superficie específica (Norma ASTM C-204; *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus*) que influye en la trabajabilidad, demanda de agua, tiempo de fraguado y resistencia a la compresión.
- 2.7.2.7 Porcentaje de finura en tamiz de 45 micrones (Norma ASTM C-430; *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μ m*), cantidad que influye en forma directa en la resistencia a la compresión, tiempo de fraguado y demanda de agua.

3 ADICIONES EMPLEADAS EN LOS CEMENTOS MEZCLADOS HIDRÁULICOS

3.1 Definición

Comúnmente, las adiciones constituyen materiales naturales o subproductos derivados de otros procesos industriales que una vez mezclados con clínker permiten obtener cementos con características especiales, producto que viene siendo empleado desde hace más de medio siglo en países industrializados como Francia, Alemania, Italia, Bélgica, Holanda entre otros¹⁷.

El conjunto de adiciones empleadas para la elaboración de cementos mezclados, esta conformado por minerales originados en erupciones volcánicas, cenizas formadas en plantas generadoras que emplean el carbón como combustible, y por subproductos de hornos metalúrgicos, entre otros. En este sentido, de acuerdo al origen de cada una de las adiciones, suelen ser estas clasificadas en puzolanas naturales y artificiales, pudiendo ser considerado un grupo mixto o intermedio de puzolanas naturales sometidas a tratamientos térmicos de activación que buscan incrementar sus cualidades hidráulicas¹⁸.

Las adiciones aptas para la elaboración de cementos mezclados, deberán presentar contenidos adecuados de sílice y alúmina a fin de permitir la elaboración de mezclas una vez combinadas correctamente con cal en presencia de agua, dando lugar a compuestos permanentes insolubles y estables que se comportan como aglomerantes hidráulicos.

En este sentido para el caso particular de las puzolanas, se deben considerar parámetros tales como la totalidad de componentes químicos ácidos, la estructura cristalina, la porosidad y la superficie específica entre otros. Para las cenizas volantes, es necesario determinar parámetros químicos como la pérdida al fuego, contenido de sulfatos y álcalis, así como la finura, humedad y estructura mineralógica en el aspecto físico¹⁹.

3.2 Tipos

La aplicación de los diversos tipos de puzolanas, conlleva la búsqueda y optimización de las propiedades hidráulicas de las mismas, ya sea por una reacción directa al combinarse con cal hidratada, o bien, al ser mezcladas con cemento Pórtland, donde la reacción se desarrolla entre la puzolana y la cal liberada durante la hidrólisis del cemento.

Las adiciones minerales finamente molidas pueden ser clasificadas de acuerdo con sus propiedades físicas o químicas como²⁰:

- Materiales Cementantes
- Materiales Puzolánicos
- Materiales Nominalmente Inertes

Clasificación que ha sido considerada para el desarrollo de la presente investigación.

3.2.1 Materiales cementantes

Término que comprende las adiciones minerales que por sí solas presentan propiedades hidráulicas cementantes, es decir que fraguan y endurecen en presencia del agua incorporándose especialmente a los cementos Pórtland en las centrales de mezcla de concreto. El término se introduce en 1992 por el ACI en el Código de Diseño de Concreto Armado²¹.

3.2.1.1 Cal hidráulica hidratada

Producto de la calcinación de calizas con contenidos de sílice y alúmina con suficiente óxido de calcio libre y silicatos de calcio sin hidratar para permitir el desarrollo de las propiedades hidráulicas del material.

En este sentido, la cal encierra a todo producto procedente de la calcinación de las piedras calizas compuestas por carbonato de calcio mezclado generalmente con alúmina, sílice, magnesio, óxido de hierro y de manganeso. De acuerdo con la Norma ASTM C-602 (*Standard Specification for Agricultural Liming Materials*), el término cal abarca varias formas físicas y químicas de la cal viva, hidratada e hidráulica empleada para diversos propósitos.

La cal puede presentarse en las siguientes formas:

- Cal Químicamente Pura: Tipo de cal con un contenido de 97% de óxido de calcio, menos del 2% de óxido de magnesio, y porcentaje menor al 5% de arcilla y otras impurezas. Una vez hidratada contiene alrededor del 96% de hidróxido de calcio.

- Cal Área o Grasa: Endurece en el aire, presentando un contenido máximo de 10% de impurezas, donde no más del 5% es arcilla. Contiene entre 85% y 97% de CaO, estando los porcentaje entre 85% a 96% de Hidróxido de Calcio una vez hidratada.
- Cal Árida o Magra: Contiene hasta un 50% de carbonato de magnesio en el caso de la caliza, con una cantidad hasta de 85% de CaO y proporciones entre el 10% y 25% de óxido de magnesio. Una vez hidratada, ésta presenta 85% de hidróxido de calcio.
- Cal Fuerte: Se caracteriza por presentar un rango de impurezas entre 10% y 20%, con un contenido de hasta 5% de arcilla en el caso de las calizas.

3.2.1.2 Escoria de alto horno

Es el subproducto del tratamiento de minerales de hierro en el alto horno, el que para ser empleada en la fabricación de cementos deberá presentar una conveniente composición química además de ser obtenida en forma granular por enfriamiento brusco, tal y como se especifica en la Norma COGUANOR NGO 41-001.

La escoria granulada de alto horno molida fabricada a partir de la escoria de alto horno de hierro, es un subproducto no metálico que consiste principalmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio, así como de otras bases que se desarrollan en la fundición simultáneamente con el hierro en altos hornos.

Con frecuencia las escorias suelen considerarse como material puzolánico, sin embargo, la actividad hidráulica latente o potencial de las escorias se manifiesta, a diferencia de las puzolanas, en el hecho de que endurecen por sí mismas al ser enfriadas bruscamente, lo que restringe su estricta clasificación como parte del grupo²².

La composición de las escorias puede variar ampliamente de acuerdo a la clase de mineral de hierro disponible, de la composición de la caliza utilizada como flujo y de la clase de hierro y de horno en el que se procesa. Estas variaciones afectan las cantidades de los principales cuatro componentes de las escorias: cal, sílice, aluminio y magnesio, compuestos que forman una serie de minerales del citado grupo de las melilitas, entre los que se encuentran la alita y la belota, principales constituyentes del clinker. Las escorias presentan también otra serie de compuestos indeseables como en el caso del sulfuro de calcio, manganeso y hierro, así como óxidos ferroso, férrico, de magnesio, titanio, azufre y alcalinos en escasa proporción.

Respecto a la composición mineralógica de las escorias, aparte de los constituyentes más o menos cristalinos del grupo de las melilitas, contienen también una fase vítrea. En este sentido, según sea el país y la norma establecida se exige que las escorias contengan vidrio en un porcentaje máximo posible, o bien, por encima de un mínimo admisible muy elevado (superior al 90%), ya que para una misma composición química dada, una escoria es tanto mas potencialmente hidráulica cuanto mayor es su proporción de fase amorfa frente a la de fases cristalizadas, incluso para valores no muy altos de sus índices de basicidad y de hidraulicidad²³.

Desde el punto de vista químico, las escorias pueden ser clasificadas en dos diferentes tipos de acuerdo a su índice de basicidad, siendo el más simple entre estos la cantidad de $\text{CaO} / \text{SiO}_2$. Por su parte los metalúrgicos clasifican la escoria como ácida o básica.

Tabla II. Clasificación de escorias de alto horno

Escorias de alto horno de hierro granuladas molidas	
Grado 80	Bajo índice de actividad
Grado 100	Índice de actividad moderado
Grado 120	Alto índice de actividad

Fuente: Norma ASTM C-989, Especificaciones Estándar para Escoria de Alto Horno para uso en Concreto y Mortero.

La escoria constituye una adición del cemento Pórtland desde hace más de noventa años en Europa en proporciones de hasta un 80%, extendiéndose posteriormente su aplicación en Norte América para la producción de concreto, producto que caracterizado por su alta resistencia y durabilidad abarca alrededor del 60% del mercado del cemento en la región.

De acuerdo a las propiedades de las escorias, entre las aplicaciones hasta la fecha desarrolladas se encuentran los cementos para pozos petrolíferos, cementos para la canalización de agua, para recubrimiento de túneles, para bloques de prefabricados, para bases de carreteras y obras portuarias.

3.2.2 Materiales puzolánicos

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

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

Si bien la denominación de puzolanas originalmente hacía referencia a los materiales naturales de origen volcánico que reaccionan con la cal, actualmente el término es aplicado a todos aquellos materiales que presentan un comportamiento similar, independientemente de su origen y composición²⁴.

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

3.2.2.1 Puzolanas naturales

Se componen básicamente por materiales de origen volcánico, orgánico y sedimentario, pudiendo ser éstos rocas volcánicas de naturaleza diversa: traquítica alcalina, pumicita, tobácea, etc, o también rocas de origen orgánico, tierras de diatomeas (algas) o de infusorios (protozoos rodolarios) de carácter fósil con naturaleza y composición a base de sílice activa.

En su gran mayoría, las puzolanas naturales requieren de molienda para alcanzar un grado de finura que las haga adecuadas para su uso, además de hacer notar que no toda roca volcánica constituye por ende una puzolana natural.

3.2.2.1.1 Origen volcánico

Consisten de materiales vítreos de estructura incoherente o tufas compactadas que se forman por la deposición de polvo y cenizas volcánicas. Pueden surgir en la naturaleza en forma de rocas consolidadas y como estado fragmentado no consolidado²⁵.

El polvo y las cenizas volcánicas de los cuales se han formado las puzolanas de origen volcánico, han experimentado un enfriamiento rápido y en algunos casos subsecuentes alteraciones químicas que han conducido a la formación de compuestos zeolíticos. Generalmente, esta alteración es atribuida a la acción de vapor supercalentado y al dióxido de carbono debajo de la superficie de la tierra. El efecto de esta acción ha sido convertir la mayoría del material original a una forma químicamente más reactiva mientras los constituyentes básicos han sido parcialmente removidos por la acción conjunta del CO₂ y el agua²⁶.

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

3.2.2.1.1 Cenizas volcánicas

Se constituyen de fragmentos vítreos pulverizados que se mantienen suspendidos en la atmósfera como consecuencia de su bajo peso, siendo así arrastrados largas distancias por las corrientes de aire. Este material extraordinariamente fino, forma gotas de lluvia cuando se concentra a núcleos húmedos y rueda adquiriendo forma esferoide (pisolítos); el material fino cae a la superficie formando extensas capas de espesor bastante uniforme y en la dirección dominante del viento.

El Diamicton (flujos de ceniza), término no genérico, consiste en capas de ceniza de color rosado y blanco, no consolidado, no clasificado de 4 a 20 metros de espesor. Se compone principalmente de 70% a 90% de ceniza dentro de los cuales existe un 10% de ceniza bastante fina, siendo el 10 - 30% restante un compuesto de lapillis de pómez y fragmentos de roca preexistente²⁷.

Las cenizas volcánicas con contenidos altos de minerales cristalinos son mucho más estables y muestran poca o ninguna actividad puzolánica. Es comúnmente sabido que las partes responsables de la actividad de estos materiales se originan de las porciones vítreas o amorfas y los compuestos zeolíticos.

3.2.2.1.1.2 Tobas volcánicas

Constituyen básicamente productos de origen volcánico que han sufrido un enfriamiento extremadamente rápido, caracterizándose por una alta superficie específica que les permite desarrollar gran afinidad a la reacción con la cal liberada del clinker, tendiendo a decrecer la actividad puzolánica como resultado del descenso en el contenido de sílice.

Durante la erupción volcánica, parte del magma lanzado es consolidado bajo una forma vítrea al cambio brusco de temperatura, adquiriendo una estructura porosa derivado del rápido proceso de desgasificación. Posteriormente, este material es objeto de un proceso de alteración como consecuencia de la acción de los agentes atmosféricos, en el cual se elimina una parte de los álcalis más solubles con aumento de posibilidades de reacción de sus componentes ácidos²⁸.

Las tobas volcánicas se componen básicamente de zeolitas y material amorfo parcialmente zeolítico o de rocas con alto contenido de sílice que han sufrido en la naturaleza una alteración química.

3.2.2.1.2 Origen orgánico

3.2.2.1.2.1 Tierras de diatomeas

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

Básicamente se constituyen por la acumulación de billones de restos de caparazones de algas marinas y de agua dulce formados básicamente de sílice, cuyos depósitos se encuentran frecuentemente mezclados con arenas y arcillas. En su estado natural, muchas de estas tierras tienen poco valor como puzolanas como consecuencia de un estado físico que requiere gran cantidad de agua para producir mezclas con la plasticidad deseada, lo que las hace ser de un escaso valor cementante.

Existen alrededor de 25,000 especies de diatomeas, las cuales se construyen en intrincadas casas de ópalo en forma de ruedas, espirales, estrellas y candeleros brillantes, siendo posible ubicarlas en arroyos de montañas rocosas frías, aguas contaminadas y en cunetas de carreteras²⁹.

Se caracterizan por muy alta capacidad de absorber líquidos, volumen de muy baja densidad, capacidad abrasiva suave, siendo en general escasas y de costo elevado. En algunas ocasiones, un tratamiento de calcinación, a temperatura inferior a la de fusión, puede mejorar las tierras de diatomeas a fin de requerir menor cantidad de agua, como el caso del *Moler* que procede de una Isla cercana a la costa de Dinamarca y que, calcinado ha sido usado extensamente en construcciones marítimas como componente en un 25% de un cemento Pórtland - *Moler*.

Se presentan en dos formas básicas, diatomeas Centrales que se caracterizan por su forma redonda y presencia en los océanos, y diatomeas Penales, elongadas con marcas en filas bilaterales localizadas generalmente en ríos de aguas frescas, cunetas o bien, en el fondo de las regiones esquistas de los océanos y estuarios.

3.2.2.1.2.2 Esquistos opalinos

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

En el particular caso de algunas rocas opalinas que en estado natural manifiestan propiedades puzolánicas, esta actividad puede exaltarse por calcinación adecuada, como el *Gaize*, un tipo de roca que se encuentra en Francia en la Zona de las Ardenas y en el Valle de Mosa³⁰.

Presentan un contenido de agua que varía entre 4% y 9%, pudiendo en ocasiones llegar hasta 20%.

3.2.2.1.3 Origen sedimentario

3.2.2.1.3.1 Arcillas

Es un material procedente de la descomposición natural de rocas que contienen feldespato, como el granito. Físicamente se considera un coloide de partícula extremadamente pequeña y superficie lisa, caracterizándose por adquirir plasticidad al entrar en contacto con el agua, así como sonoridad y dureza al calentarla por encima de 800 °C. Se identifican de acuerdo al mineral que se halle presente en mayor proporción, encontrándose así arcillas caoliníticas, montmoriloníticas e ilíticas.

Las arcillas en su estado original consisten en un grupo de aluminosilicatos hidratados, aunque el aluminio puede ser substituido en distintas medidas por óxido férrico y en menor grado por bases como MgO, Na₂O y CaO, incluyéndose en este grupo minerales del grupo del caolín y otros minerales de la misma composición³¹.

De acuerdo a su origen las arcillas pueden ser:

Arcilla primaria: Cuando el yacimiento donde se encuentra es el mismo lugar en donde se originó, siendo el caolín la única arcilla primaria conocida.

Arcillas secundarias: Material que se ha desplazado después de su formación, por fuerzas físicas o químicas. Se encuentran entre ellas el caolín secundario, la arcilla refractaria, la arcilla de bola, el barro de superficie y el gres.

3.2.2.1.3.2 Zeolitas

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

Son consideradas como un producto alterado de los minerales originales, producido por una prolongada exposición posterior a la deposición a aguas conteniendo dióxido de carbono y a vapor sobrecalentado³².

En Cuba, los programas de Investigación-Desarrollo para el empleo de mineral zeolítico en la producción de materiales para la construcción se iniciaron con la producción industrial de cemento Pórtland puzolánico y puzolánico a partir de 1974, empleando para ello la mordenita de los yacimientos ubicados en Palmarito de Cauto, en Santiago de Cuba.

A partir de la década de los años 80, se inicia en Cuba la aplicación de las clinoptilolita-heulandita como aditivo mineral zeolítico, obteniendo como resultado concretos ligeros aptos para la construcción de obras masivas a base de cementos caracterizados por un menor costo y mas bajo calor de hidratación.

3.2.2.2 Puzolanas artificiales

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

Cabe distinguir dos grupos básicos, uno de ellos el formado por materiales naturales silicatados de naturaleza arcillosa y esquistosa que adquieren el carácter puzolánico por sometimiento a procesos térmicos, y otro, constituido por subproductos de determinadas operaciones industriales que en virtud de las transformaciones sufridas, adquieren propiedades puzolánicas.

3.2.2.2.1 Origen térmico

3.2.2.2.1.1 Arcillas calcinadas

Las arcillas constituyen depósitos sedimentarios, generalmente de silicatos, aluminatos y sílico aluminatos hidratados, en los cuales el contenido de agua puede ser muy variable. Es importante destacar que no todas las arcillas presentan la misma aptitud para ser activadas por calcinación, ya que esto depende en un primer término del contenido de agua de composición³³.

Para los romanos, las propiedades puzolánicas desarrolladas por las arcillas calcinadas eran bien conocidas, empleando ladrillos y baldosas de barro pulverizado como un sustituto de las puzolanas naturales de origen volcánico en los trabajos de construcción, siendo igualmente conocidas en la India y Egipto bajo el nombre de *Surkhi* y *Homra* respectivamente. A través de la historia, han sido realizados experimentos con morteros a base de cal y arcillas calcinadas en trabajos de reconstrucción de estructuras, con los cuales Fremy pudo llegar a vincular el desarrollo de las propiedades puzolánicas en las arcillas con la cocción de estas a la temperatura a la que ocurre la pérdida del agua de hidratación en las mismas³⁴.

Las arcillas calcinadas han sido utilizadas en el pasado en la elaboración de morteros de cemento y concreto ante la falta de cemento Pórtland, sin embargo la irregularidad del proceso de producción de las mismas afectaba en forma directa la calidad del producto.

Posteriormente a través de la realización de estudios, se llegó a demostrar que un cuidadoso proceso de producción de estas arcillas permite la obtención de puzolanas de excelente calidad, materiales que han sido empleados en la construcción de represas en los Estados Unidos y en los cementos especiales para pozos petroleros en Gran Bretaña.

Un cemento puzolánico consistente en una mezcla de cemento Pórtland y arcilla calcinada y triturada fue descrito por Poptter en 1909. Por un prolongado período la compañía Lafarge en Francia, fabricó un cemento puzolánico hecho a base de arcillas calcinadas y cemento que se usaba en las regiones con yeso³⁵.

3.2.2.2 Origen residual

3.2.2.2.1 Ceniza volante

Las propiedades puzolánicas de las cenizas volantes fueron reportadas por Davis en 1937, desarrollándose el uso de éstas en la década siguiente sobretodo en Estados Unidos, donde se aplicó el uso en construcciones masivas de concreto como represas³⁶.

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

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

Las propiedades hidráulicas de las cenizas volantes residen en la composición química, mineralógica, finura y estado físico. Las cenizas volantes con escaso contenido de CaO permiten mejorar la trabajabilidad, presentando poca actividad hidráulica en las resistencias a mayores edades, por su parte las cenizas volantes ricas en CaO, tienen mayor actividad hidráulica y menor contenido de partículas esféricas que mejoran la trabajabilidad³⁷.

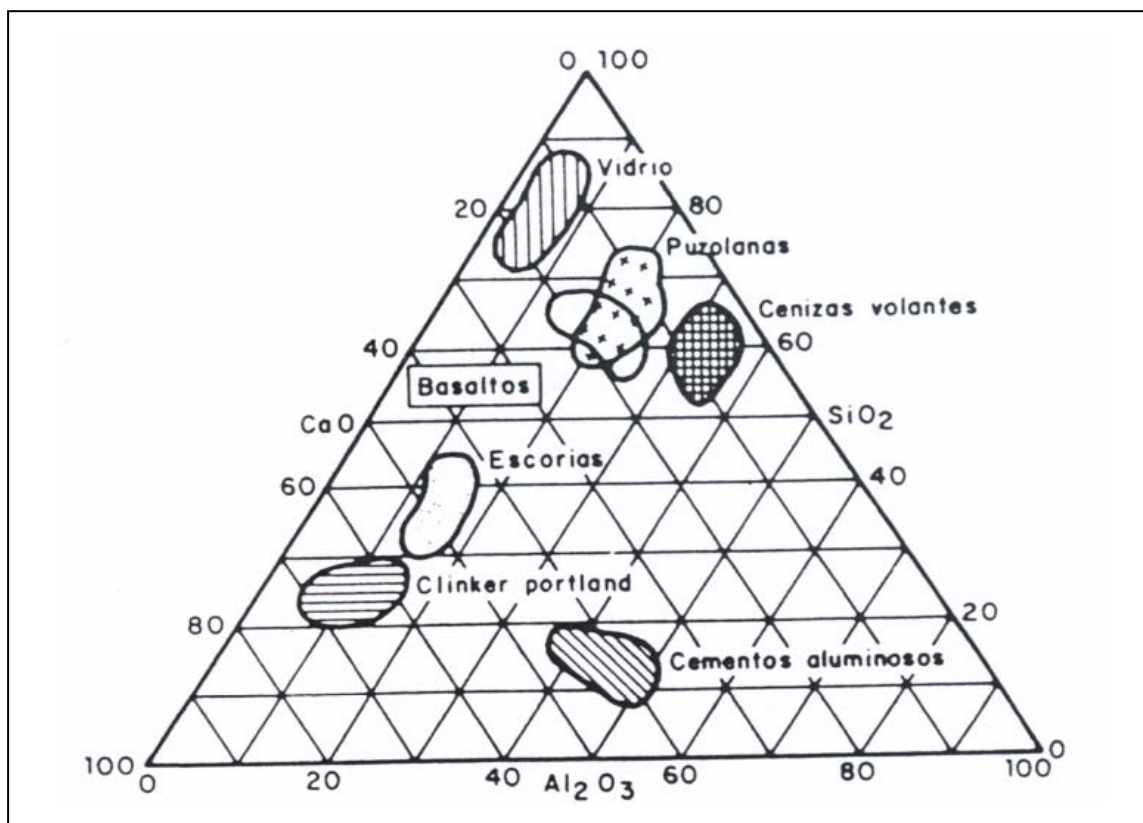
Básicamente se encuentran constituidas por silicatos vítreos con contenido de sílice, alúmina, hierro y calcio, así como de magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono en menor cantidad, además de compuestos cristalinos. Las partículas que las constituyen difieren una de otras en composición química, contenido de vidrio, distribución granulométrica y morfología entre otras características.

De acuerdo con su composición química (ver Figura 1) las cenizas volantes suelen clasificarse en silicoaluminosas y sulfocálcicas o silicocalcáreas. Sin embargo en 1983, Mehta tipifica las cenizas volantes como altas en cal o bajas en cal, clasificación que reagrupa las cenizas en dos o más grupos atendiendo a su proporción de CaO, contemplando no sólo un contenido distinto en componentes cálcicos, sino además, una mineralogía diferenciada con compuestos mineralógicos característicos en ambos grupos que otorgan propiedades y comportamientos reactivos específicos.

Las cenizas volantes bajas en cal, presentan compuestos tales como la mullita, cuarzo, hematites y cal libre, mientras las cenizas altas en cal presentan cuarzo, hematites y anhidrita, presentando ocasionalmente silicatos cálcicos, portlandita, cal libre y silicoaluminatos cálcicos.

Las cenizas volantes Clase F y Clase C de acuerdo con la Norma ASTM C-618, son comúnmente empleadas como aditivos puzolánicos para el concreto. Los materiales Clase F generalmente se constituyen de cenizas volantes con bajo contenido de calcio, presentando contenidos de carbono inferiores a 5%, mientras que los materiales Clase C son frecuentemente cenizas volantes de contenido elevado de calcio cuyos contenidos de carbono usualmente son menores que 2%³⁸.

Figura 1. Composición de puzolanas y materiales de construcción



Fuente: M.C. Alonso y M.P. de Luxán. **Aplicaciones de las cenizas volantes en el campo de la construcción.** Pág. 17

3.2.2.2.2 Humo de sílice

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

El humo de sílice condensado esencialmente consiste en dióxido de sílice (más de 90%) en forma cristalina esférica. Se caracteriza por ser extremadamente fino con partículas de diámetros menores de una micra y con un diámetro promedio de aproximadamente 0.1 micra, casi 100 veces menor que las partículas de cemento. El peso específico del humo de sílice por lo general se ubica dentro del rango de 2.10 a 2.25 pudiendo llegar este a 2.55³⁹.

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

3.2.2.3 Puzolanas mixtas o intermedias

3.2.2.3.1 Ceniza de cascarilla de arroz

Básicamente consiste en un desecho agrícola de sílice pura en forma no cristalina. En el proceso de producción de arroz cada una de las toneladas métricas de arroz produce 200 kg. de cascarilla que posteriormente originan 40 kg. de ceniza que puede ser obtenida por combustión a campo abierto o combustión controlada⁴⁰.

En hornos industriales se obtiene de 90% a 95 % de sílice, si la combustión es a campo abierto se obtiene sílice cristalina no reactiva en gran cantidad, la misma que debe ser llevada a tamaño pequeño para lograr obtener de ellas actividad puzolánica.

Alrededor del año 1973, aparecen técnicas enfocadas en el control de la combustión de este desecho agrícola, obteniendo como resultado una ceniza altamente reactiva que puede ser producida por combustión controlada cuidando que la sílice sea producida en forma no cristalina y en estructura celular, necesitándose para ello una incineración controlada de 500 °C a 700 °C que permita obtener una ceniza altamente puzolánica.

3.2.2.3.2 Ceniza de caña de azúcar

Estudios recientemente realizados en Cuba, han llegado a determinar que los desechos de la industria azucarera consistentes en ceniza de paja de caña (SCSA) y ceniza de bagazo de caña (SCBA), presentan una actividad puzolánica derivado de un alto contenido de sílice encontrada en este material, país en el que una producción anual de 4,000,000 de toneladas métricas de azúcar, genera 439,000 toneladas métricas de ceniza destinadas a la elaboración de compost para la mejora del suelo y control de la erosión.

Como parte del proceso de investigación, cenizas de paja de caña de azúcar en estado natural seco provenientes de la Provincia de Santa Clara, Cuba, y cenizas de bagazo de caña de azúcar en partículas muy finas en forma de fibras y polvos, fueron combinadas a razón de 20% y 30% con arcilla como material aglutinante. El método contemplado para la experimentación, buscaba establecer por medio de métodos computarizados la conductividad eléctrica de cada uno de los desechos a fin de medir el coeficiente de difusión y la constante de velocidad de reacción, parámetros que permitirían determinar la actividad puzolánica de ambos materiales.

Finalmente sobre la base de la determinación de los parámetros cinéticos, los cambios de conductividad mostrados por las cenizas de paja de caña de azúcar y las cenizas de bagazo de caña de azúcar, permiten la caracterización de ambos desechos como materiales puzolánicos, presentando una mayor reactividad la ceniza de paja de caña de azúcar en comparación con la ceniza de bagazo de caña de azúcar.

En otros países productores de azúcar, el bagazo de caña obtenido como residuo del proceso de producción ha tenido diferentes usos, sirviendo en ocasiones como combustible en los generadores de vapor, así como para la obtención de pulpa para papel o en planchas de aglomerado para la fabricación de muebles. Sin embargo, la obtención de éstas cenizas es un proceso aún carente de investigación a nivel general.

3.2.3 Materiales nominalmente inertes

Si bien estos materiales presentan pocas, o bien, nulas propiedades cementantes, suelen ser empelados como adición al cemento y como sustitución parcial de arena en el concreto con la finalidad de mejorar la escasa trabajabilidad de mezclas pobres en agregados finos. Entre este tipo de material se encuentra el cuarzo en bruto finamente dividido, las dolomitas, mármol, granito, y caliza pulverizadas que reduce la reactividad álcali- sílice.

4 ADICIONES EXISTENTES EN GUATEMALA

4.1 Generalidades

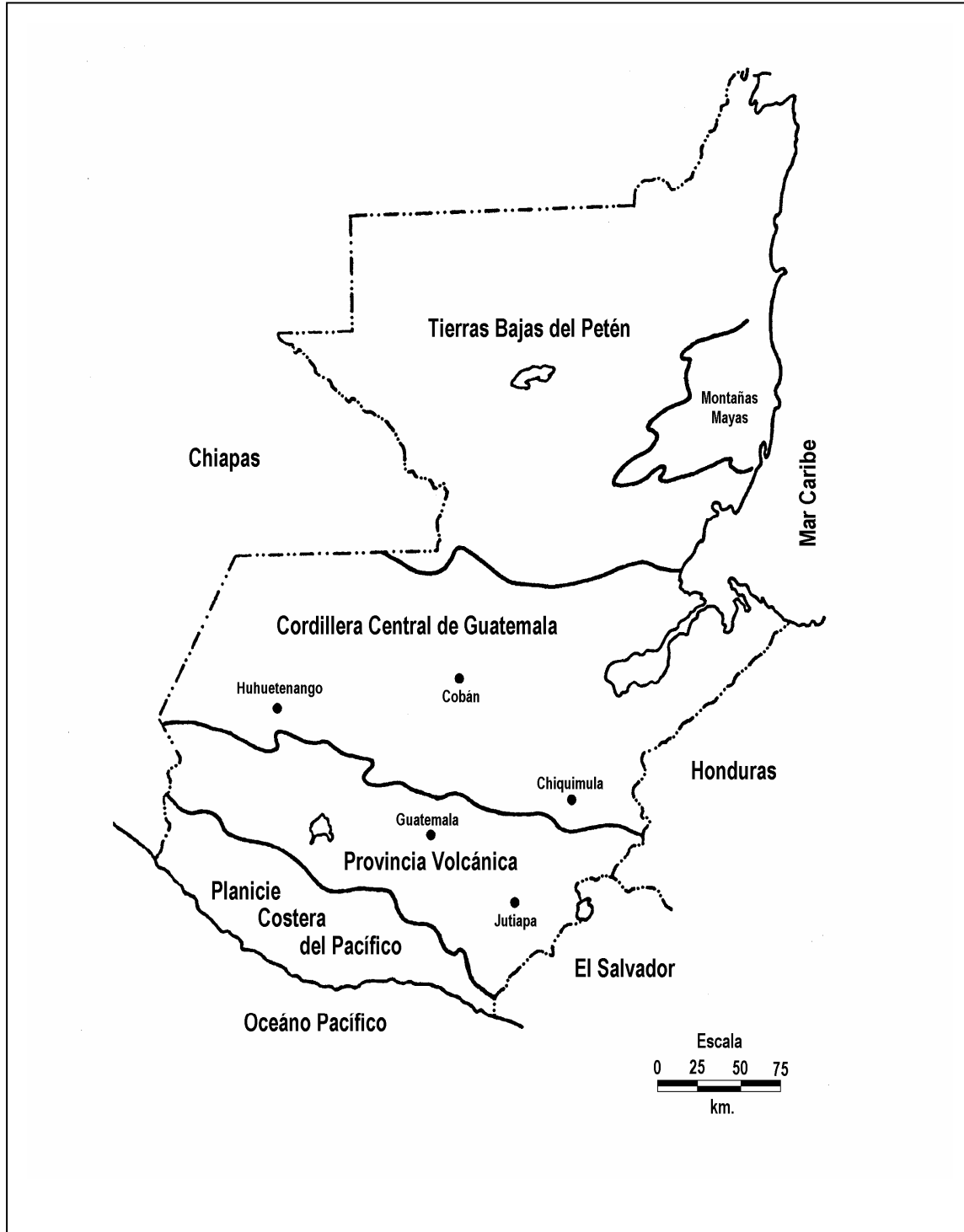
El territorio de Guatemala está comprendido por su geografía física, dentro de una plataforma continental que se extiende desde el Istmo de Tehuantepec, en México, hasta las Tierras Bajas de Otrato en Colombia, perteneciendo así junto con El Salvador, Honduras y parte de Nicaragua, a la América Central Septentrional.

En la geomorfología de Guatemala prevalecen dos orientaciones estructurales, un arco este-oeste convexo hacia el sur formado por rocas cristalinas y sedimentarias Paleozoicas y Mesozoicas que se extiende desde Chiapas hasta el Mar Caribe; y un alineamiento noroeste-sureste a través de América Central, representado por rocas volcánicas Terciarias recientes acentuado por una hilera de conos cuaternarios.

El territorio Nacional se divide en cuatro distintas provincias fisiográficas (ver Figura II), constituidas de Norte a Sur por:

- **Tierras Bajas del Petén:** Comprende un área de bosque tropical húmedo con elevaciones promedio de 100 metros sobre el nivel del mar, siendo posible localizar depósitos de yeso, carbonatos y petróleo.

Figura 2. Provincias fisiográficas de Guatemala



Fuente: Francisco Javier Quiñónez. **Cemento Puzolánico.** Pág. 6

- **Cordillera Central:** Se encuentra distribuida en la parte central de Guatemala cubriendo un tercio del territorio nacional, formando parte del sistema que se desarrolla desde Chiapas, México, hasta las islas del golfo de Honduras. Los minerales no metálicos de mayor ocurrencia en esta zona son barita, mármol de serpentinita y calcáreo, esquistos, jade, talco, y rocas industriales; mientras que en el caso de los minerales metálicos, es posible destacar el plomo, cobre, antimonio, zinc, plata, oro y níquel.
- **Provincia Volcánica:** Cubre la parte occidental, sur y oriental del país, abarcando un área aproximada de 25,000 km² que incluye 40 volcanes principales como el volcán Santiaguito, Fuego y Pacaya. La elevación sobre el nivel del mar va desde los 50 hasta los 3000 metros, encontrándose también en esta región las enormes cuencas que contienen los Lagos de Atitlán, Amatitlán y Ayarza con profundos rellenos de depósitos de pómez cuaternarios como los de Chimaltenango, Tecpán, Chichicastenango, El Quiché, Guatemala y Quetzaltenango, además de tobas y coladas de lavas como parte de los minerales no metálicos, siendo posible ubicar el plomo, zinc, plata y oro entre los minerales metálicos.
- **Planicie Costera del Pacífico:** Comprende una planicie de unos 50 km. de ancho formada a lo largo del litoral del Pacífico por productos de material derivado de las tierras altas volcánicas. Los minerales que se pueden encontrar incluyen arenas, gravas y pómez, así como sedimentos de arena con gran contenido de hierro y titanio.

Las principales características geológicas en Guatemala, reflejan la repetida inestabilidad a la que ha estado sometida la corteza terrestre como consecuencia de una intensa y explosiva actividad volcánica, siendo dos los ciclos orogénicos que caracterizan el cuadro geológico de la región.

El ciclo más antiguo se remonta al principio del período Paleozoico con la deposición de una estrecha banda de sedimentos marinos y la extrusión de lavas, seguido por un período de intrusión granítica y metamorfismo regional que dio origen a un complejo basamento cristalino constituido básicamente por rocas plutónicas de composición granítica y diorítica, así como rocas metamórficas, el cual se extiende a lo largo de una alta cadena montañosa desde el Estado de Chiapas, México, hasta el occidente de Nicaragua.

Un segundo ciclo orogénico inició desde el final del período Mesosóico con un renovado y gradual hundimiento de la cuenca geosinclinal, acompañado de oscilaciones en el mar que dieron paso a la formación de calizas cretácicas y el desarrollo de una serie de rocas volcánicas sedimentarias gruesas. La actividad de cada uno de estos ciclos ha moldeado la actual topografía del país.

Dentro de la estratigrafía del territorio nacional pueden ser distinguidas diecisiete grandes unidades litológicas incluidas en la Tabla III, enlistadas éstas cronológicamente de acuerdo a su antigüedad.

Tabla III. Unidades litológicas de Guatemala

Unidad	Constitución	Ubicación
Roca Metamórficas	Filitas, Esquistos, gneis, mármol y migmatitas	Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Progreso, El Quiché, Huhuetenango, Izabal, Jalapa, San Marcos, Zacapa
Rocas Sedimentarias del Carbonífero y Pérmico	Lutitas, Areniscas, conglomerados y fililitas	Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Quiché, Huhuetenango, Izabal
Carbonatos del Pérmico	Edad Persiana	Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Quiché, Huhuetenango, Izabal
Formación Todos Santos	Formaciones alargadas de areniscas	Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Quiché, El Petén, Huhuetenango
Carbonatos del Cretácico	Rocas de edad cretácica	Alta Verapaz, Baja Verapaz, Chiquimula, El Progreso, El Quiché, El Petén, Huhuetenango, Izabal Jutiapa, Sacatepéquez, San Marcos, Zacapa
Rocas Ígneas	Período Jurásico Cretácico	Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Quiché, Izabal
Rocas Intrusivas	Granitos, Dioritas y Rocas Transicionales	Baja Verapaz, Chiquimula, Huhuetenango, Guatemala, San Marcos, Sacatepéquez, San Marcos, Sololá, Zacapa
Sedimentos Clásticos Marinos	Son de edad cretácica	Alta Verapaz, El Quiché, El Petén, Huhuetenango, Izabal
Areniscas Subinal	Edad cretácica Terciaria	Chiquimula, Jalapa
Sedimentos Marinos	Areniscas, lutitas y carbonatos	Alta Verapaz, El Petén
Yeso y Marga	Edad Terciaria	El Petén
Calizas, Areniscas y Conglomerados	Edad Terciaria I	Izabal
Depósitos Continentales	Edad Terciaria	Alta Verapaz, El Petén, Izabal
Rocas Volcánicas sin Dividir	Tobas, Lavas, Lahares del período terciario	Chimaltenango, Chiquimula, El Quiché, Huhuetenango, Guatemala, Jalapa, Quetzaltenango, San Marcos, Santa Rosa, Sololá, Totonicapán
Rocas Volcánicas	Lavas, Lahares y Toba del período cuaternario	Chimaltenango, Escuintla, Guatemala, Jutiapa, Mazatenango, Rethaluleu, Sacatepéquez, San Marcos, Sololá, Quetzaltenango,
Cenizas Volcánicas	Cenizas y Pómez de origen volcánico	Chimaltenango, El Quiché, Guatemala, Huhuetenango, Jutiapa, Quetzaltenango, Salamá, San Marcos, Santa Rosa, Sololá, Totonicapán,
Aluviones Cuaternarios	Rocas recientes del cuaternario aún en proceso de depósito	Chiquimula, El Petén, Escuintla, Izabal, Jalapa, Jutiapa, Mazatenango, Retalhuleu, Santa Rosa

Fuente: Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas. **Síntesis Geológica de Guatemala.** Pág.: 4-7

4.2 Tipos

4.2.1 Materiales cementantes

4.2.1.1 Cal

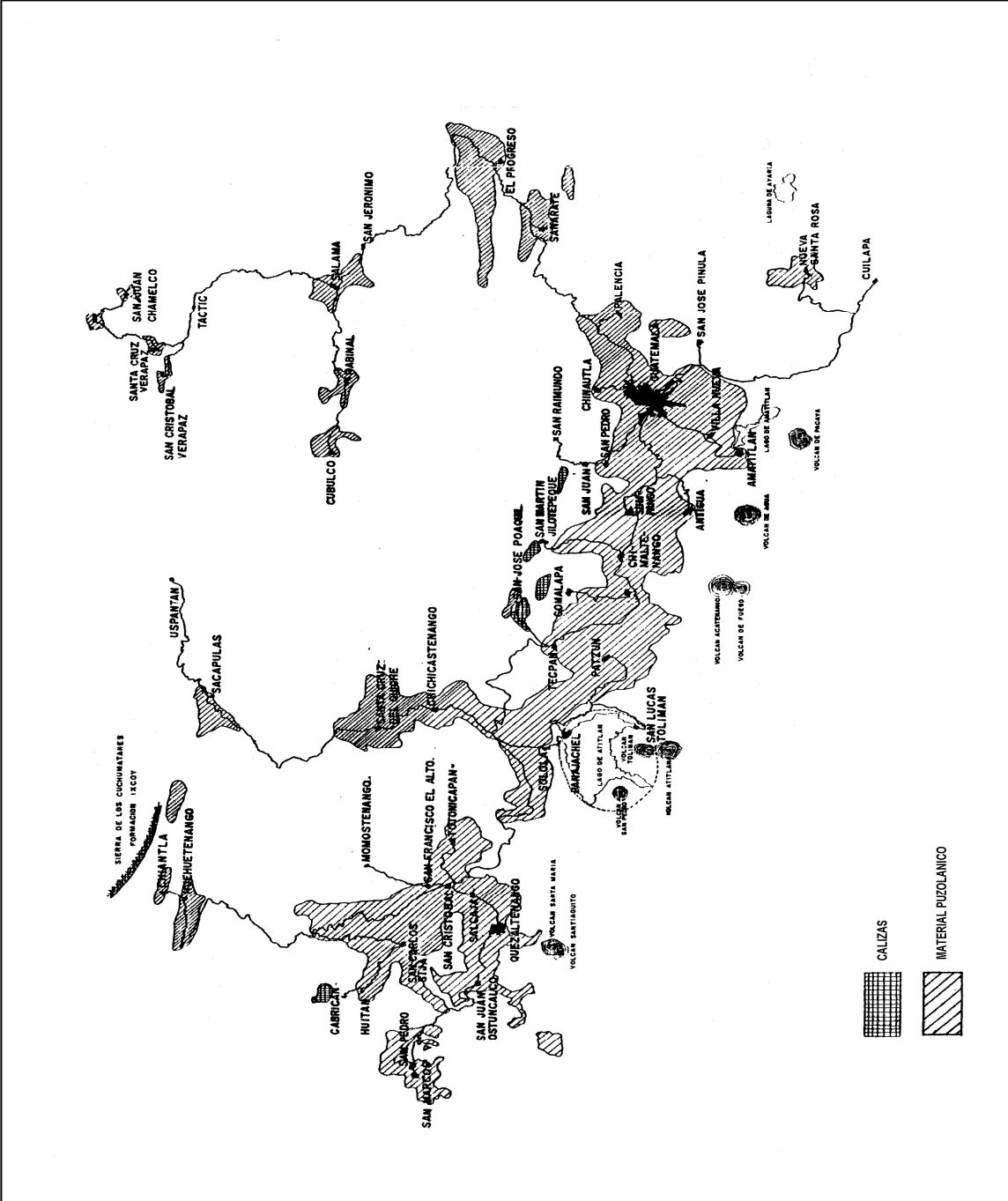
La caliza se localiza en la mayoría del territorio nacional representando aproximadamente el 60% de los minerales no metálicos producidos en Guatemala, encontrándose con un mayor contenido de carbonato de calcio en la región nororiental y oriental, mientras que en el centro y occidente de la nación puede ser ubicada con alto contenido de carbonato de magnesio (ver Figura 3).

Calizas de edad Cretácica cubren gran parte de la Sierra de los Cuchumatanes con un espesor aproximado de 1500 metros, caracterizándose la facie norte por una caliza densa compuesta de foraminíferos, y la facie sur constituida de calcarenitas y calciruditas de calizas retrabajadas, habiendo sido reportados espesores 1690 metros en el Valle de Chixoy en las cercanías de San Cristóbal Alta Verapaz.

En las cercanías de Chiantla, Huhuetenango, es posible ubicar calcarenitas grises a oscuras de calciruditas gruesas compuestas de fragmentos de rocas sedimentarias de arena y de calizas preexistentes.

La Norma COGUANOR NGO 41-018 (Cal Hidratada Especificaciones) establece procedimientos necesarios que permiten verificar las características físicas, químicas y mecánicas de la caliza.

Figura 3. Ubicación de caliza y material puzolánico en la región central de Guatemala



Fuente: Manuel Alfredo Arrivillaga. Evaluación Geológica de Bancos de Puzolanas y Calizas en el Occidente de Guatemala. Pág. 13.

4.2.1.2 Escoria

En Guatemala la Empresa Siderúrgica de Guatemala S.A. (SIDEGUA, S.A.) ubicada en el km. 65.5 de la antigua carretera a Puerto San José en el Municipio de Masagua, Departamento de Escuintla, genera como parte de su proceso de producción 3600 toneladas anuales de escoria provenientes de los hornos de arco eléctrico empleados para la producción de acero, cuya composición química se contempla en la Tabla IV.

Tabla IV. Composición química de escorias y clinker

Constituyentes químicos	Clinker	Tipo de Escoria	
		Altos Hornos	Horno de Arco Eléctrico (SIDEGUA)
% SiO ₂	22.30	32 - 40	21.60
% Al ₂ O ₃	5.80	7 – 17	7.50
% CaO	65.80	29 - 42	8.60
% MgO	1.30	8 – 19	49.86
% Fe ₂ O ₃	2.50	0.1 – 1.5	18.90

Adaptada: Kenneth Alejandro Molina Escobar. **Evaluación de Morteros para albañilería y Revestimientos elaborados a base de cementos mezclados con escorias de horno.** Pág. 23 y Edgar Francisco Solórzano Jiménez. **Caracterización de la escoria de hornos de la planta SIDEGUA como puzolana artificial.** Pág. 14.

Básicamente, los cementos y concretos con adición de escoria, se caracterizan por presentar las siguientes ventajas en comparación con el Cemento Pórtland sin adición:

- Mayores y más rápidas resistencias mecánicas.
- Menor calor de hidratación.
- Mejor impermeabilidad y comportamiento frente a la carbonatación.

- Mayor resistencia a las altas temperaturas, al ataque químico y protección de las armaduras metálicas.
- Menor costo y mayor ahorro de energía.

4.2.2 Materiales puzolánicos

4.2.2.1 Naturales

4.2.2.1.1 Tobas volcánicas

En Guatemala existen materiales volcánicos de gran variedad de colores que van desde el gris, café y rojizo de acuerdo siempre al origen mineralógico de cada uno de ellos. Rocas volcánicas de la cadena de volcanes del Pacífico comprenden andesitas, basaltos, riolitas, tobas dacíticas, aglomerados volcánicos y brechas de edad Terciaria y Cuaternaria.

Las rocas volcánicas del país presentan una variabilidad considerable en su composición; los depósitos más antiguos consistentes principalmente en ignimbritas dacíticas y riolíticas, originados en erupciones volcánicas, se encuentran intercaladas con brechas volcánicas, aglomerados y tobas lacustres entre otras. Los depósitos volcánicos más recientes, consisten principalmente en lavas andesíticas y basálticas, cenizas, brechas volcánicas y aglomerados originados en erupciones.

En el Departamento de Huehuetenango han sido localizadas tobas volcánicas con espesores de 50 metros aproximadamente, donde la extensión de las mismas puede alcanzar de acuerdo estudios realizados 350 km². De igual forma pueden ser ubicadas en los Municipios de Palencia, San José del Golfo, San Juan Sacatepéquez y San Raymundo del Departamento de Guatemala, en el Municipio de San Martín Jilotepeque del Departamento de Chimaltenango, así como en los Municipios de Aguacatán y Chiantla en el Departamento de Huhuetenango, Municipio de Cunén en el Departamento de Quiché y San Pedro Pinula en el Departamento de Jalapa.

4.2.2.1.2 Cenizas volcánicas

Los selectos puzolánicos de origen piroclástico de Guatemala, provienen generalmente de depósitos de cenizas volcánicas del Cuaternario, siendo posible hallar varios de éstos bancos en el Valle de la Ciudad de Guatemala en proceso de explotación.

Este tipo de material ha mostrado con frecuencia un contenido entre 15% y 20% de fragmentos líticos de andesita y aproximadamente un 85% de fragmentos de vidrio volcánico altamente vesicular, donde los fragmentos de tamaño lapillos más gruesos de pómez contienen incursiones de cristales de mica, hornablendas y fragmentos líticos.

Bancos de ceniza volcánica consistentes en fragmentos líticos de granos oscuros dispuestos en capas de espesores que varían desde los 20 hasta los 80 metros aproximadamente, se ubican en la unidad Diamicton H o Los Chocoyos, zona que comprende la región mostrada en la Figura 3, última unidad de tefras considerada como la más antigua, siendo así la unidad más extendida del material con una adecuada accesibilidad y posición estratigráfica.

En estudios realizados con anterioridad se ha llegado a establecer espesores de distintos bancos de ceniza que se ubican dentro de la zona volcánica, encontrándose al Sur de la Ciudad Capital un banco con un espesor de mas de 15 metros, con una parte rosada que varía entre 2 y 5 metros. De igual forma en Chimaltenango ha sido ubicado un banco de con un espesor que varía entre 15 y 20 metros.

Es posible localizar también cenizas volcánicas en las regiones de Chiquimula, Quetzaltenango, Escuintla, Guatemala, Izabal, Jalapa, El Petén, Sacatepéquez y Santa Rosa.

4.2.2.1.3 Tierras de diatomeas

En Guatemala, depósitos de tierras de diatomeas han sido ubicados en aguas de los Océanos Atlántico y Pacífico, en los lagos de Atitlán y Amatitlán, Quetzaltenango, así como el yacimiento denominado “El Chato” en el municipio de San Cristóbal en el departamento de Totonicapán como uno de los de mayor importancia del occidente del país. En la zona oriental se localizan yacimientos en el municipio de Palencia y el Departamento de Guatemala como parte de restos de lagos prehistóricos. De igual forma, capas de Diatomeas de origen lacustre han sido localizadas en el Departamento de Sololá.

Las tierras de diatomeas en su gran mayoría presentan espesores de pequeña magnitud que aunados a una complicada ubicación geográfica limitan la potencialidad del material para su explotación.

Eventualmente la tierras de diatomeas presentan para su empleo la limitación de que su materia constitutiva así como su elevada finura natural, imprimen a la mezcla un alto requerimiento de agua que disminuye su actividad puzolánica y propicia mayores cambios volumétricos por secado.

4.2.2.1.4 Arcillas calcinadas

Constituye uno de los principales elementos para la construcción en Guatemala, ubicándose en el territorio nacional en los Departamentos de Alta Verapaz, Baja Verapaz, Huhuetenango, Izabal y Guatemala.

Actualmente en el país la empresa INMACO S.A. en su planta ubicada en Ruta al Atlántico km. 4.5 Zona 17 de la Ciudad de Guatemala, genera una producción diaria promedio de 100,000 ladrillos a base de arcillas cuidadosamente seleccionadas, en la que aproximadamente un 92% es considerado como producto de primera calidad, contemplándose un 5% de producto de segunda calidad, y un 3% de desechos destinados a la venta como ripio, o bien, procesado para la obtención de polvo de ladrillo que es nuevamente utilizado en la producción⁴¹.

Los materiales de arcilla cocida presentan generalmente propiedades puzolánicas con un fuerte carácter ácido, en los que predomina la sílice, alúmina y óxido de hierro, lo que contribuye en la disminución del calor de hidratación desarrollado durante el proceso de hidratación del cemento.

4.2.2.2 Artificiales

4.2.2.2.1 Cenizas volantes

Las cenizas volantes pueden llegar a presentar una variable composición según sea la naturaleza del carbón de origen, sin embargo, la capacidad reactiva, así como la puzolanicidad e hidraulicidad, son factores característicos de las mismas, cuya reactividad puzolánica comprende un período de tiempo mas o menos largo durante el cual, el agua adicionada a la combinación de cemento Pórtland y ceniza, es empleada por el cemento en sus reacciones de hidratación.

En Guatemala, la empresa San José Power Station, en su labor de generación de energía eléctrica a través de la quema de carbón mineral, genera en su planta ubicada en el km. 77 de la Autopista Palín - Escuintla alrededor de 60,000 toneladas métricas anuales de ceniza volante de carbón.

La adición de cenizas volantes al cemento Pórtland, produce un aumento en la trabajabilidad del material en estado plástico como consecuencia de la dispersión de las partículas del sistema, creando unidades más pequeñas y por lo tanto mayor fluidez. Sin embargo, al permitir las cenizas un aumento de la trabajabilidad, es posible reducir la relación agua / cemento para una dosificación de concreto específica contrarrestando el efecto de mayor porosidad.

4.2.2.3 Mixtos o intermedios

4.2.2.3.1 Ceniza de cascarilla de arroz

En Guatemala la producción de arroz alcanza las 35,000 toneladas métricas anuales, de las cuales es posible llegar a obtener un total aproximado de 3,465 toneladas métricas de ceniza provenientes de la calcinación de la cascarilla, residuo que hasta la fecha es únicamente empleado como abono en sistemas hidropónicos de cultivo y en la crianza avícola en las principales zonas productoras de arroz que comprenden San Marcos, Coatepeque, Retalhuleu, Jutiapa, Jalapa, Quiché, Alta Verapaz, Izabal y El Petén.

La adición de ceniza de cascarilla de arroz al cemento Pórtland, es en el país aún una práctica sin ejecución que considerando el volumen de producción anual, puede llegar a presentar una mejora en las propiedades del cemento aunado a un significativo ahorro en el proceso de producción, siempre y cuando la ceniza presente las propiedades necesarias para su correcta aplicación.

A través de estudios realizados en varios países sobre el concreto elaborado a base de cemento con adición de ceniza de cascarilla de arroz, ha sido posible establecer que 4% de adición de ceniza de cascarilla de arroz, produce los mejores resultados en el comportamiento mecánico de un concreto, desarrollándose altos valores de resistencia a la compresión simple y tracción por compresión diametral, sobretodo a los 90 días de edad, mejorando de igual forma la trabajabilidad. Una adición superior al 12% de esta adición, produce una mezcla poco consistente que trae como consecuencia una pérdida de resistencia mecánica en el concreto a tempranas edades⁴².

4.2.2.3.2 Ceniza de caña de azúcar

Si bien Guatemala es de los principales países productores de azúcar, los volúmenes de desechos generados en el proceso de producción, como la cenizas de paja de caña de azúcar y las cenizas de bagazo de caña de azúcar, no han sido aún objeto de investigación en la que pueda ser determinada su capacidad puzolánica, así como la factibilidad y rentabilidad para poder ser aplicadas en la elaboración de cementos mezclados.

Estudios realizados en otros países han permitido establecer un alto contenido de sílice en las cenizas de paja de caña de azúcar y cenizas de bagazo de caña de azúcar.

4.2.3 Materiales nominalmente inertes

Actualmente en el país es posible encontrar materiales de esta categoría que de acuerdo a sus propiedades y características pueden ser empleados en la industria de la construcción (ver Tabla V).

Tabla V. Materiales nominalmente inertes disponibles en Guatemala

Material	Ubicación	Aplicaciones
Caliza	Alta Verapaz, Chiquimula, El Progreso, Guatemala, Huhuetenango, Jutiapa, Petén, Quetzaltenango y Zacapa	Cal, fundente de hornos, calcio, cemento
Cuarzo	Alta Verapaz, Baja Verapaz, Chiquimula, Chimaltenango, El Progreso, Escuintla.	Joyería, radares, radios, vidrio, abrasivos
Mármol	Baja Verapaz, Chiquimula, Chimaltenango, El Progreso, Guatemala, Izabal, Jutiapa, Petén, Zacapa.	Monumentos, decoración, pisos

Fuente: Ministerio de Energía y Minas. Dirección General de Minería. **Minería en Guatemala, Minería y Desarrollo Sostenido. El Reto en el Tercer Milenio.** Pág. 4.

4.3 Adiciones existentes en Guatemala caracterizadas en la Facultad de Ingeniería

En la facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, han sido desarrollados Trabajos de Graduación por estudiantes de Pregrado en los que ha sido posible caracterizar y evaluar materiales puzolánicos naturales ubicados en la Provincia Volcánica del territorio nacional, como las tobas volcánicas, cenizas volcánicas, tierras de diatomeas y saclum, así como puzolanas artificiales localizadas principalmente en la Región Sur del país, entre las que destacan las cenizas volantes, las escorias de alto horno y las escorias de horno de arco eléctrico.

Para cada uno de los procesos de investigación, han sido aplicados procesos y especificaciones establecidos en las normas ASTM y COGUANOR anteriormente mencionadas, en los que evaluando principalmente parámetros químicos y físico – mecánicos, se han obtenido resultados variables en cuanto a la actividad puzolánica de cada uno de los materiales, existiendo varios casos en los que las investigaciones no ejecutan una completa caracterización.

Aún y cuando se ha avanzado en el estudio de los diferentes bancos nacionales, una gran parte de los mismos carecen de un proceso de investigación que permita conocer el desempeño de los materiales procedentes de cada uno de ellos, siendo necesaria la realización del estudio correspondiente a fin de divulgar las utilidades en las que puede ser aprovechado cada uno de los recursos disponibles en las regiones.

A continuación se presentan los resultados obtenidos a través de los trabajos de investigación realizados desde 1984 en la Facultad de Ingeniería.

4.3.1 Bancos de materiales caracterizados

- Banco No. 1
Ubicación: km. 56 Carretera Chimaltenango a San Andrés Itzapa
Tipo de material: Pómez
Referencia bibliográfica: No. 22 (1984), No. 57 (1984)
- Banco No. 2
Ubicación: Carretera Tecpán Guatemala desvío Iximché
Tipo de material: Pómez
Referencia bibliográfica: No. 22 (1984)
- Banco No. 3
Ubicación: km. 178 Carretera Interamericana Departamento de Quetzaltenango
Tipo de material: Pómez
Referencia bibliográfica: No. 22 (1984)
- Banco No. 4
Ubicación: Carretera Salcajá - Xelajú Departamento de Quetzaltenango
Tipo de material: Pómez
Referencia bibliográfica: No. 22 (1984)

- Banco No. 5
 Ubicación: Carretera Los Encuentros –
 Chichicastenango (2 km. adentro)
 Departamento de El Quiché
 Tipo de material: Pómez
 Referencia bibliográfica: No. 22 (1984)

- Banco No. 6
 Ubicación: Carretera Chichicastenango -
 San Sebastián Lemoa (10 km. adentro)
 Departamento de El Quiché
 Tipo de material: Pómez
 Referencia bibliográfica: No. 22 (1984)

- Banco No. 7
 Ubicación: Palencia, Departamento de Guatemala
 Tipo de material: Pómez
 Referencia bibliográfica: No. 7 (1987), No. 15 (1987), No. 57 (1984)

- Banco No. 8
 Ubicación: Amatitlán, Departamento de Guatemala
 Tipo de material: Ceniza volcánica
 Referencia bibliográfica: No. 7 (1987), No. 15 (1987), No. 57 (1984)

- Banco No. 9
 Ubicación: San Cristóbal, Departamento de Alta Verapaz
 Tipo de material: Saclum
 Referencia bibliográfica: No. 7 (1987), No. 15 (1987), No. 57 (1984)

- Banco No. 10

Ubicación: Aceros de Guatemala, zona 12,
Ciudad de Guatemala

Tipo de material: Escoria de altos hornos

Referencia bibliográfica: No. 14 (1993)

- Banco No. 11

Ubicación: km. 83 Carretera al Atlántico

Tipo de material: Ceniza Volcánica

Referencia bibliográfica: No.57 (1984), No. 50 (1993), No. 13 (2000)

- Banco No. 12

Ubicación: Siderúrgica de Guatemala, S.A.
(SIDEGUA, S.A), km. 65 Carretera antigua
Puerto San José, Municipio de Masagua,
Departamento de Escuintla.

Tipo de material: Escoria de horno de arco eléctrico

Referencia bibliográfica: No. 7 (1987), No. 15 (1987), No. 57 (1984)

- Banco No. 13

Ubicación: Municipio de Palencia,
Departamento de Guatemala

Tipo de Material: Tierra de Diatomeas

Referencia bibliográfica: No. 3 (1980)

4.3.2 Resultados obtenidos en la caracterización físico – mecánica de las adiciones

Normas aplicables:

- a) Norma 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*)
- b) Norma ASTM C-593 (*Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime*)

Tabla VI. Caracterización físico-mecánica de las adiciones de acuerdo con la Norma ASTM C-311

No. Banco	Ensayos de Fineza (cm ² /g)	Densidad (g/cm ³)	Fineza (%)	Contracción (%)	Índice de actividad puzolánica con cemento (% o 7/28 días)	Índice de actividad puzolánica con cal (% o 7/28 días)
1	3916.50	2.20	83.60	+ 18.75	90.40	51.70
2	1642.50	2.30	-----	-----	-----	-----
3	1217.30	2.30	-----	-----	-----	-----
4	1833.30	2.30	-----	-----	-----	-----
5	1331.00	2.60	-----	-----	-----	-----
6	1407.50	2.30	-----	-----	-----	-----
7	5134.50	2.50	-----	-----	4.00	4.00
8	4681.30	2.40	42.20	- 2.55	59.90	31.30
9	-----	2.40	-----	-----	35.00 / 33.00	7.30
10	-----	3.06	-----	-----		9.70 / 9.60
11	2404.00	2.30	41.30	+ 3.05	56.50	38.10
12	2480.00	3.14	49.10	-----	26.60 / 32.30	4.80 / 9.80

Tabla VII. Caracterización física-mecánica de las adiciones de acuerdo con la Norma ASTM C-593

No. Banco	Fración soluble en agua (%)	Fineza (Residuo)	Esfuerzo puzolana-cal (%)	Esfuerzo a la compresión (7/28 días)
1	0.86	16.80	90.40	----
2	----	----	----	----
3	----	----	----	----
4	----	----	----	----
5	----	----	----	----
6	----	----	----	----
7	-----	----	----	----
8	-----	----	----	----
9	----	----	7.30	----
10	----	49.90	----	9.7 / 9.6
11	1.20	18.40	----	----
12	----	36.00	4.80 – 9.80	----
13	8.60	----	----	----

4.3.2 Resultados obtenidos en la caracterización química de las adiciones

Tabla VIII. Caracterización química de las adiciones de acuerdo con la Norma ASTM C-311

No. Banco	Pérdida al fuego	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	Álcalis disponibles
1	2.90	92.10	1.50	0.10	0.23	0.32	Reactivo
2	-----	85.10	4.90	0.80	-----	-----	Reactivo
3	-----	55.50	17.90	-----	-----	-----	No Reactivo
4	-----	89.50	5.20	0.40	-----	-----	Reactivo
5	1.00	80.00	2.10	1.50	1.40	-----	-----
6	-----	61.00	15.50	-----	-----	-----	-----
7	2.60	92.30	0.50	0.70	0.50	-----	-----
8	4.10	87.00	1.70	3.20	1.90	< 0.01	-----
9	11.00	80.00	2.10	1.50	1.40	-----	-----
10	-----	32.24	14.30	8.10	7.00	-----	-----
11	3.00	73.70	0.90	5.90	1.50	0.01	-----
12	-----	21.60	7.50	49.80	18.90	0.60	-----

5 APLICACIONES DE LOS CEMENTOS MEZCLADOS HIDRÁULICOS

5.1 Generalidades

Conocidos desde la antigüedad los efectos de la adición de puzolana al cemento, la mezcla de los mismos ha mostrado a través de la experimentación efectivos resultados en adecuadas condiciones y en función de cada uno de los materiales, produciéndose así verdaderos cementos Pórtland mezclados hidráulicos que han proliferado ya en diversos países a base de materiales naturales autóctonos como las puzolanas en Italia, *Trass* en Alemania, Rumania y Rusia, Tierra de Santorin en Grecia, *Gaize* en Francia, Moler en Dinamarca y *kieselguhr* o tierras de diatomeas o infusorios en lugares diversos, e incluso, a partir de materiales artificiales como la arcilla y mas modernamente las cenizas volantes en Francia.

Los cementos mezclados hidráulicos fueron inicialmente aplicados en obras marítimas, hidráulicas y estructuras subterráneas ante el desempeño de una mayor durabilidad y significativo ahorro económico en el proceso de producción. Sin duda alguna, el posterior hallazgo de la menor evolución de calor durante la hidratación, permitió el uso de los mismos con una adecuada y correcta adición de puzolanas en estructuras masivas de concreto.

El desarrollo de resistencia en los cementos mezclados puede ser mejorado a través de un aumento de la cantidad de cemento en el concreto, disminuyendo la relación agua-cemento mas puzolana, o bien, optimizando las condiciones de curado. La tasa de desarrollo de resistencia a la compresión de este tipo de cementos aumenta con una adecuada temperatura de curado, mientras que a bajas temperaturas ésta se ve mayormente afectada en comparación con un cemento Pórtland sin adición.

Sin duda alguna, las razones técnicas, económicas y ecológicas que enmarcan internacionalmente la utilización de adiciones en la elaboración de cementos mezclados hidráulicos, han seguido el implícito desarrollo de un detallado y sistemático estudio de los materiales de adición, de los procesos de fabricación, de los métodos de ensayo y control de los cementos que las contienen, así como de las condiciones mas idóneas y los usos específicos de cada uno de los distintos tipos.

En la actualidad, muchos son los países que han introducido normativas específicas para los diversos tipos de cementos mezclados hidráulicos con la finalidad de optimizar el uso de adiciones altamente potenciales en las diversas regiones, desarrollando así ambiental y económicamente un proceso de elaboración que permite el aprovechamiento de los desechos y la obtención de funcionales ventajas estructurales que el producto una vez empleado presenta.

5.2 Aplicaciones a nivel internacional

El ritmo de expansión del cemento Pórtland ha seguido un ritmo distinto en cada uno de los continentes de acuerdo siempre al crecimiento y necesidades de cada una de las regiones, así como de los recursos disponibles.

Actualmente, 113 países en el mundo son productores de los diversos tipos de cemento Pórtland hidráulico, contando con plantas y materias primas propias que permiten el desarrollo de naciones autosuficientes en producción y consumo, además de generar caminos de exportación e importación que permiten cubrir las demandas y satisfacer las necesidades de la construcción a nivel mundial.

Los diversos tipos de cementos mezclados hidráulicos que en la actualidad están siendo fabricados en el mercado Europeo, así como las aplicaciones de cada uno de acuerdo al tipo de adición empleada para la fabricación, se encuentran contenidos en la Tabla VI.

5.3 Aplicaciones a nivel regional

En el continente americano la producción actual de cemento Pórtland y sus variaciones se ha visto incrementada, registrándose en Estados Unidos una producción anual de 99 millones de toneladas métricas, mientras en Brasil y México se alcanzan niveles de 39 y 36 millones de toneladas métricas anuales respectivamente.

En el mercado centroamericano, Honduras y El Salvador desarrollan un producción anual de 1.4 millones de toneladas métricas de cemento Pórtland de diversas clases, mientras que Costa Rica genera anualmente 1.3 millones de toneladas métricas y Nicaragua 600 mil toneladas métricas anuales.

La Tabla VII y VIII permiten conocer los tipos y aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos que actualmente se producen en la región sur y central del continente americano.

Tabla IX. Aplicación de cementos mezclados hidráulicos a nivel Internacional

País	Tipo de Cemento	Normativa	Composición	Aplicaciones
España	Cemento Pórtland CEM II/A-M (V-L) 42,5N	UNE EN 197-1:2000	Cemento Pórtland Mixto de clase resistente 42.5 y con Resistencia inicial ordinaria constituido de 80% a 94% de clinker Pórtland, caliza y escoria de alto horno	Obras masivas de concreto, prefabricados de pretensados, concreto con áridos potencialmente reactivos y concreto lanzado
	Cemento Pórtland CEM II/A-M(P-L-V) 42,5R	UNE EN 197-1:2000	Cemento Pórtland mixto de clase resistente 42.5 y con resistencia inicial elevada formado en un 80% a 94% de clinker Pórtland, además de puzolana natural, caliza y ceniza volante silicea.	Obras masivas de concreto, prefabricados de pretensados, concreto con áridos potencialmente reactivos y concreto lanzado, concretos para desencofrado rápido
	Cemento Pórtland CEM II/A – V42.5	UNE EN 197-1:2000	Cemento Pórtland de clase resistente 42.5 y con resistencia inicial ordinaria con un contenido de clinker Pórtland de 80% a 94% y ceniza	
	Cemento Pórtland CEM V/A (S-V) 32,5N	UNE EN 197-1:2000	Cemento Compuesto de clase resistente 32,5 y con resistencia inicial ordinaria con un contenido de clinker pórtland de 40 - 64%, escoria de alto horno y ceniza volante	Concretos masivos, concretos con contenido de áridos potencialmente reactivos, estabilización de suelos y bases tratadas con cemento, albañilería en general

Continuación

País	Tipo de Cemento	Normativa	Composición	Aplicaciones
España	Cemento Pórtland ESP VI-1 32,5	UNE 80307:2001	Cemento Compuesto para Usos Especiales de clase resistente 32,5 y con resistencia inicial ordinaria constituido en un 31% a 50% de clinker además de ceniza v volante silíceo	Concretos compactado con rodillo, bases y sub-bases de firmes y estabilización de suelos, grandes macizos de hormigón en masa
	Cemento Pórtland II/A-S 42,5/SR	UNE 80303-1:2001	Cemento Pórtland resistente a los sulfatos y al agua de mar con escoria de clase resistente 42,5 y con resistencia inicial ordinaria con un contenido de clinker Pórtland entre 80% a 94%	Obras masivas de concreto, prefabricados no pretensados, concretos con áridos potencialmente reactivos, concreto lanzado y concretos resistentes al agua de mar y sulfatos
	Cemento Pórtland II/A-S 52,5/SR	UNE 80303-1:2001	Cemento Pórtland con escoria resistente a los sulfatos y al agua de mar de ordinaria resistencia inicial con un contenido de clinker Pórtland entre 80% y 94%	
	Cemento Pórtland V/A (S-V) 32,5 N/BC	UNE 80303-3:2001	Cemento compuesto de bajo calor de hidratación constituido de 40% a 64% de clinker Pórtland, escoria de alto horno y ceniza volante	Concretos masivos, concretos con contenido de áridos potencialmente reactivos, estabilización de suelos y bases tratadas con cemento, albañilería en general

Continuación

País	Tipo de Cemento	Normativa	Composición	Aplicaciones
Francia	Cemento Pórtland CEM III A 42,5 N PM – ES-CP1	NF EN 197-1:2000	35 % - 40 % de clinker, 60 % - 65 % de escoria de alto horno y constituyentes secundarios.	Uso General en la construcción
	Cemento Pórtland CEM III/B 32,5 N PM - ES	NF EN 197-1:2000	20 % - 34 % de clinker 66 % - 80 % de escoria de alto horno, 0 % - 5 % de constituyentes secundarios	
	Cemento Pórtland CEM V/A (S-V) 32,5 N PM-ES-CP1	NF EN 197-1:2000	40 % - 64 % de Clinker, 18 % - 30 % de escoria de alto horno, 18 % - 30 % de cenizas volantes, 0 % - 5 % constituyentes secundarios	Concretos masivos, concretos con contenido de áridos potencialmente reactivos, estabilización de suelos y bases tratadas con cemento, trabajos de albañilería en general.
	Cemento Pórtland CEM III/A 52,5 N PM - ES	NF EN 197-1:2000	35 % - 40 % de clinker 60 % - 65 % de escoria de alto horno, 0 % - 5 % de constituyentes secundarios	Uso General en la construcción
	Cemento Pórtland CEM III/C 32,5 N PM-ES	NF EN 197-1.2000	5 % - 19 % de clinker 81 % - 95 % de escoria de alto horno, 0 % - 5 % de constituyentes secundarios	Obras en general en donde no sea requerida una alta resistencia inicial

Continuación

País	Tipo de Cemento	Normativa	Composición	Aplicaciones	
Italia	Cemento Pórtland CEM IV/A (V) 42,5 R	UNE EN 197-1:2000	Constituido de clinker a razón de 65% a 89% y ceniza volante silíceas	Obras masivas de concreto armado, concreto en elementos estructurales prefabricados no pretensados, concreto lanzado, así como obras en las que sean requeridos desencofrados rápidos	
	Cemento Pórtland CEM IV/A (V) 32,5 R				
	Cemento Pórtland CEM II/ A-S 42,5 R	UNE EN 197-1:2000	Se constituye en un 80% a 90% de clinker, 6% a 20% de escoria de alto horno y no mas de un 5% de constituyentes secundarios		
	Cemento Pórtland CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	UNE EN 197-1:2000	Constituido de 65% a 79% de clinker Pórtland y escoria de alto horno		Obras masivas de concreto, prefabricados no pretensados,
	Cemento Pórtland CEM II/ B-M (L-S-V) 32,5 R	UNE EN 197-1:2000	Cemento Pórtland compuesto en un 65% a 79% de clinker Pórtland, escoria de alto horno y ceniza volante		concretos con áridos potencialmente reactivos y concreto proyectado
	Cemento Pórtland CEM IV/A (P-V) 32,5 R	UNE EN 197-1:2000	Cemento Pórtland puzolánico compuesto en un 65% a 89% de clinker Pórtland, además de puzolana y ceniza volante		Obras masivas de concreto, elementos estructurales prefabricados no pretensados, concretos lanzado y desencofrados rápidos

Tabla X. Aplicación de cementos mezclados hidráulicos a nivel Regional Sur América

País	Tipo de Cemento	Normativa	Composición	Aplicaciones
Argentina	Cemento Pórtland Compuesto	IRAM 50.000	Compuesto de clinker Pórtland, pequeñas cantidades de sulfato de calcio, con un 35 % de dos o más adiciones minerales	Uso general en la construcción siempre que no sea especificado el uso de cemento Pórtland con propiedades especiales para el ataque por sulfatos o elementos masivos
	Cemento de Alto Horno CAH 40 (Resistente a la reacción álcali-agregado, RRAA)	IRAM 50.000	Compuesto de clinker Pórtland, con la adición de mayor a 35g / 100g y menor o igual a 75g / 100g en masa de escoria granulada de alto horno	
	Cemento Pórtland Puzolánico CPP 30 (ARS, Altamente resistente a los sulfatos, BCH, Bajo Calor de Hidratación, RRAA, Resistente a la reacción álcali-agregado)	IRAM 50.000 IRAM 50.001	Conglomerante hidráulico constituido de clinker Pórtland, sulfato de calcio y puzolana entre 20% y 50%	Uso general en la construcción, elaboración de concretos sometidos a severas condiciones de exposición como ataque por sulfatos y elementos masivos
Brasil	Cemento Pórtland CP III-40-RS	NBR 5735 NBR 5737	Mezcla uniforme de cemento Pórtland y escoria de alto horno altamente resistente a los sulfatos.	Uso general en la construcción

Continuación

País	Tipo de Cemento	Normativa	Composición	Aplicaciones
Brasil	Cemento Pórtland Puzolánico DURACEM (PR 200, AD 300 y PI 500)	NBR 5735 NBR 5737	Se produce a través de la mezcla de Cemento Pórtland y Puzolanas naturales cuidadosamente seleccionadas a fin de producir un cemento resistente a los sulfatos	Obras de concreto postensado, rehabilitación de estructuras de concreto armado, estabilización de taludes
	Cemento Pórtland CP II E 32	NBR 5735 NBR 5737	Mezcla uniforme de clinker, yeso, material carbónico y escoria de alto horno	Uso general en la construcción
	Cemento Pórtland CP II E 32 FIBRO	NBR 5735 NBR 5737	Mezcla uniforme de clinker de alta calidad, escoria de alto horno y material carbónico	Diseñado especialmente para la industria del Fibrocemento
	Cemento Pórtland CP III 32 – RS	NBR 5735 NBR 5737	Mezcla uniforme de clinker, yeso, material carbonático y escoria de alto horno de alta calidad que lo hacen de alta resistencia a los sulfatos y bajo calor de hidratación	Uso general en la construcción, concretos de alto desempeño, concreto armado, concretos y morteros expuestos a medios agresivos
	Cemento Pórtland CP V-ARI – RS	NBR 5735 NBR 5737		

Continuación

País	Tipo de Cemento	Normativa	Composición	Aplicaciones
Colombia	Cemento Pórtland Tipo 1	NTC 121/321	Producto de la molienda conjunta de clinker, yeso y adiciones	Uso general en la construcción, obras que requieran moderado calor de hidratación y resistencia a los sulfatos
	Cemento Especial Tipo Concretera ARI (Alta Resistencia Inicial)	NTC 121/321	Producto de la molienda conjunta de clinker, yeso y adiciones activas	
Chile	Cemento Pórtland Puzolánico ARI (Alta Resistencia Inicial)	NCh 148.Of68	Se fabrica mediante la molienda conjunta de clinker, yeso y puzolana volcánica, clasificándose como un cemento de alta resistencia	Prefabricados de alta resistencia inicial, pretensados y postensados para vigas de puentes y edificios, así como obras de alta resistencia
	Cemento Pórtland 400	NCh 148.Of68	Se produce a través de la molienda conjunta de clinker, yeso y puzolana volcánica	Uso general en la construcción, donde se requiere alta resistencia inicial, pretensados para vigas de puente y edificios
	Cemento Pórtland Puzolánico Especial	NCh 148 Of68	Molienda Conjunta de clinker, yeso y puzolana volcánica, clasificado de grado Corriente	Uso general en la construcción , obras masivas, elementos prefabricados, obras mineras e industriales con exposición a ambientes agresivos, estructuras impermeables y subterráneas

Continuación

País	Tipo de Cemento	Normativa	Composición	Aplicaciones
Ecuador	Cemento Pórtland Puzolánico Tipo IP	INEN 490	Mezcla de clinker de Cemento Pórtland, sulfato de calcio y materiales de adición activa	Uso general en la construcción
México	Cemento Pórtland Puzolánico Tipo IP	NMX-C-414-ONNCCE 490	Mezcla de clinker de Cemento Pórtland, sulfato de calcio y materiales de adición activa	Uso general en la construcción
Perú	Cemento Pórtland Puzolánico Tipo IP	Norma Técnica Peruana 334.090.2001	Molienda conjunta de clinker, yeso y puzolana	Obras masivas de concreto, cimentaciones de todo terreno aplicable a suelos salitrosos, obras marítimas, obras sanitarias, morteros de mampostería y fabricación de tubería
Venezuela	Cemento Pórtland Supercem	COVENIN 935	Mezcla uniforme de Cemento Pórtland y escoria siderúrgica básica granulada finamente molida	Para ser utilizado en zonas con alto nivel de oxidación: construcciones expuestas al salitre, aguas negras y aplicaciones de ingeniería industrial y medioambiental

Tabla XI. Aplicación de cementos mezclados hidráulicos a nivel Regional Centro América

País	Tipo de Cemento	Normativa	Composición	Aplicaciones
El Salvador	Cemento Pórtland Block	ASTM C-1157	Cemento Pórtland de alta resistencia Inicial, compuesto de clinker y proporciones específicas de puzolana y filler	Fabricación de elementos de concreto, así como obras donde sea requerida resistencia a temprana edad
	Cemento Pórtland CESSA PAV	ASTM C-1157	Cemento Pórtland hidráulico compuesto de clinker, proporciones específicas de puzolana y filler adheridos en la molienda final	Pavimentos de concreto, estabilización de suelos y bases granulares.
	Cemento Pórtland CESSA Portland	ASTM C-1157 GU	Cemento Pórtland hidráulico constituido de clinker, además de proporciones específicas de puzolana y filler adheridos en la molienda final	Uso general en la construcción
	Cemento Pórtland Supercemento Tipo GU	ASTM C-1157 GU	Cemento Pórtland Hidráulico constituido de clinker, además de proporciones específicas de puzolana y filler adheridos en la molienda final	Uso general en la construcción

Continuación

País	Tipo de Cemento	Normativa	Composición	Aplicaciones
Costa Rica	Cemento Pórtland IP	NCR 40-90	Consiste en un cemento con adición de puzolana, en el que la reacción entre la sílice, puzolana y el hidróxido de calcio restante de la hidratación del cemento, desarrolla concretos impermeables	Uso general en la construcción siempre que no sea especificado el uso de cemento Pórtland con propiedades especiales
	Cemento Pórtland Tipo I (MP)	NCR 40-90	Se compone de una molienda conjunta de clinker y adiciones minerales (caliza/puzolana) que permiten obtener concretos impermeables y durables	Uso general en la construcción siempre que no sea especificado el uso de cemento Pórtland con propiedades especiales
Honduras	Cemento Pórtland Tipo IP	ASTM C-595	Cemento Pórtland hidráulico mezclado con puzolana natural que le otorga alta adherencia, así como una resistencia a elementos químicos agresivos	Uso general en la construcción
	Cemento Pórtland Hidráulico Tipo GU	ASTM C-1157	Cemento Pórtland hidráulico mezclado con puzolana natural de excelente manejabilidad y desempeño además de resistencia a agentes químicos	Uso general en la construcción

Continuación

País	Tipo de Cemento	Normativa	Composición	Aplicaciones
Nicaragua	Cemento Supernic Tipo GU	ASTM C-1157	Se produce a través de la molienda conjunta de clinker y adiciones minerales (caliza, yeso y puzolanas) que le confieren características particulares que conducen a concretos mayormente durables e impermeables	Uso General en la Construcción

5.4 Aplicaciones a Nivel Nacional

En el país la producción anual de cemento registrada alcanza 1.9 millones de toneladas métricas, dentro de la cuales se contemplan los cementos Pórtland y los cementos mezclados hidráulicos que han sido desarrollados en la búsqueda de mejores y ambientalmente compatibles propiedades aptas para el desarrollo sostenible.

La adición de puzolanas al cemento Pórtland, ha permitido comprobar la mejora en el desarrollo de las propiedades del material. Sin embargo, es necesario considerar que las variaciones presentadas en la calidad de los agregados, así como el proporcionamiento, mezclado, manejo, colocación y curado del concreto elaborado a base de cemento Pórtland mezclado, son parámetros que sin duda generan una ligera disminución de la resistencia a edades tempranas, alcanzado a mediano y largo plazo valores de resistencia iguales o mayores al cemento Pórtland convencional como consecuencia del proceso de estabilización y endurecimiento de los cementos con adición de puzolanas.

De esta forma, los cementos Pórtland mezclados con puzolanas incluidos en la Tabla IX, presentan una favorable opción en el mercado nacional de la construcción en general, cumpliendo especificaciones establecidas en la normativa vigente y permitiendo en el país un adecuado y necesario desarrollo compatible con la naturaleza.

Tabla XII. Aplicación de cementos mezclados hidráulicos a nivel Nacional

País	Tipo de Cemento	Normativa	Composición	Aplicaciones
Guatemala	Cemento Pórtland UGC	ASTM C-1157	Consiste en un cemento con adición de puzolana correspondiente a una categoría de resistencia de 4000 psi, presentando menor calor de hidratación y mayor resistencia al ataque de sulfatos	Uso general en la construcción.
	Cemento Pórtland ARI (Alta Resistencia Inicial)	ASTM C-1157 COGUANOR NGO 41095	Es un cemento Pórtland de alta resistencia inicial con adición de puzolana natural correspondiente a una categoría de resistencia de 3000 psi.	Fabricación de bloques de concreto, tubos y elemento prefabricados, así como estructuras con requerimiento de mayor resistencia mecánica o alta resistencia a edades tempranas.
	Cemento Pórtland para Sabieta Tipo S	ASTM C-91	Cemento Pórtland con adición de puzolanas e ingredientes especiales con una resistencia mínima de 2100 psi. Presenta una mayor durabilidad, adherencia y trabajabilidad	Obras de albañilería y mampostería en general.

CONCLUSIONES

1. La mezcla de clinker y adiciones minerales permite la elaboración de cementos mezclados hidráulicos.
2. Las propiedades desarrolladas por los cementos mezclados hidráulicos varían de acuerdo a la naturaleza, características y proporción de adición empleada.
3. Los cementos mezclados hidráulicos optimizan la trabajabilidad de las mezclas que posteriormente desarrollan un menor calor de hidratación determinante para la minimización de agrietamientos.
4. Cada uno de los materiales a utilizarse como adición para la elaboración de cementos mezclados hidráulicos, debe ser caracterizado como tal a través de un proceso de investigación apegado a los procedimientos de ensayo establecidos en las Normas.
5. Los materiales puzolánicos constituyen las principales adiciones empleadas para la elaboración de cementos mezclados hidráulicos caracterizados por una mayor resistencia al ataque de agentes agresivos.
6. El uso de cementos mezclados hidráulicos en la industria de la construcción se ha visto incrementado a nivel mundial, cuya producción a nivel internacional conlleva la adición de materiales puzolánicos de origen volcánico y residual.

7. Actualmente, en Guatemala se producen de acuerdo con la normativa establecida, únicamente cementos con adición de materiales puzolánicos de origen volcánico.
8. Estudios realizados en Guatemala han permitido caracterizar materiales disponibles en el territorio nacional como puzolanas altamente potenciales para su explotación y uso en la elaboración de cementos mezclados hidráulicos.
9. La mayor parte de las investigaciones desarrolladas en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se han visto limitadas a la caracterización de materiales puzolánicos sin considerarse la aplicación y evaluación de los mismos en la elaboración de cementos.
10. Los materiales puzolánicos mixtos o intermedios provenientes de la industria arrocera y azucarera generados en el país, no han sido aún objeto de un proceso de investigación que permita caracterizar los mismos como adiciones de potencial actividad puzolánica para la elaboración de cementos mezclados.
11. En los trabajos ejecutados hasta la fecha en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, únicamente han sido caracterizadas y aplicadas en la elaboración de cementos diversas cenizas volcánicas y escoria de arco eléctrico generada en SIDEGUA.

RECOMENDACIONES

1. La cantidad óptima de adición a emplear en la elaboración de cementos mezclados hidráulicos, debe ser analizada de acuerdo con sus características.
2. La producción de cementos mezclados hidráulicos debe regirse a las especificaciones establecidas en la normativa vigente actual del país.
3. Es necesario realizar investigaciones que permitan establecer la potencialidad de las cenizas de cascarilla de arroz y de los desechos de la industria azucarera, como la ceniza de paja de caña de azúcar y la ceniza de bagazo de caña de azúcar generados en el país, como adiciones puzolánicas para la elaboración de cementos mezclados hidráulicos.
4. Las arcillas disponibles en el país deben ser objeto de una investigación que permita caracterizar el material como una adición de potencial actividad puzolánica (arcilla calcinada) para su empleo en la elaboración de cementos mezclados.
5. Los cementos mezclados hidráulicos deben ser aplicados de acuerdo con la naturaleza de sus componentes en la construcción, con el fin de obtener el adecuado comportamiento de la estructura.

6. Las propiedades y ventajas que presentan los cementos mezclados hidráulicos deben ser divulgadas, a fin de concienciar procesos constructivos de eficiente calidad aunada a la adecuada conservación y mejora del desarrollo sostenible.
7. Los materiales puzolánicos disponibles en el país caracterizados por medio de una adecuada investigación, deben ser sometidos a un proceso de investigación que permita evaluar la aplicación de los mismos.
8. Los depósitos de materiales puzolánicos existentes en el territorio nacional aún no caracterizados, deben ser investigados, con el fin de implementar un inventario nacional de los mismos que favorezca la explotación de los considerables volúmenes de cada uno de ellos.
9. La caracterización, evaluación y aplicación de adiciones para la elaboración de cementos mezclados hidráulicos, deben ser contempladas en una sola y objetiva investigación en las que la formación de alianzas estratégicas que incluyan el sector público y privado, permitan la implementación de sistemas que faciliten en cierta medida la ejecución del estudio.

REFERENCIAS

1

Erick Estuardo Juárez Sagastume. **Evaluación de las propiedades físicas de cementos hidráulicos mezclados, fabricados a nivel de Laboratorio, con adiciones de arena volcánica y escoria de alto horno.** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003) p. 1.

2

Emilio Beltranena Matheu. **El Cemento Pórtland Modificado Tipo I, de Cementos Progreso, S.A.** (Guatemala: Cementos Progreso, 1987) p. 2.

3

Julio Pérez Alonso. **Cementos de Adición.** (México: IV Jornadas Técnicas de la Asociación de Productores de Cemento del Área del Caribe, 1986) p. 149.

4

Manuel Gonzáles de la Cotera. **Aditivos y adiciones del concreto; normas y aplicaciones**

5

Francisco Javier Quiñónez de la Cruz. **Cemento Puzolánico Fase III.** (Guatemala: Centro de Investigaciones de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 1993) p. i.

6

7

Pierre Dutron. **La respuesta de la industria cementera a los problemas económicos y técnicos actuales.** (Bélgica: Conferencia Plenaria pronunciada en el Coloquio Internacional sobre “Escorias y Cementos con Adiciones”, 1981) p. 215.

8

Kosmatka, Steven H. y William C. Panarese. **Diseño y Control de Mezclas de Concreto.** (México: Instituto Mexicano del cemento y del concreto, 1992) p. 19.

9

M. Sánchez."Instituto de las Ciencias de la Construcción. Investigación sobre la actividad puzolánica de materiales de desecho procedentes de arcilla cocida". **Materiales de Construcción**, 51 (261):46. 2001.

10

Claudio M. Jurado. "Cementos Especiales y Mezclados", **Revista Construcción y Tecnología**: 12. 1990.

11

Kosmatka, Steven H. y William C. Panarese. **Diseño y Control de Mezclas de Concreto**. (México: Instituto Mexicano del cemento y del concreto, 1992) p. 77.

12

Eduardo Herrero Núñez, **Aplicación de los cementos con Adiciones puzolánicas a edificaciones y obras públicas**. (España: Compañía Internacional de Investigación y Ensayos) p. 15.

13

Kosmatka, Steven H. y William C. Panarese. **Diseño y Control de Mezclas de Concreto**. (México: Instituto Mexicano del cemento y del concreto, 1992) p. 76.

14

Hugo Rafael Ordóñez Porta. **Puzolanas y Cementos puzolánicos**. (Guatemala: Primer Simposio Tecnológico de producción de Cemento, 1985) p. 8.

15

Erick Estuardo Juárez Sagastume. **Evaluación de las propiedades físicas de cementos hidráulicos mezclados, fabricados a nivel de Laboratorio, con adiciones de arena volcánica y escoria de alto horno**. (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003) p. 24.

16

Manuel Gonzáles de la Cotera. **Normalización del Cemento: Situación Actual y Perspectivas**. 1987.

17

Erick Estuardo Juárez Sagastume. **Evaluación de las propiedades físicas de cementos hidráulicos mezclados, fabricados a nivel de Laboratorio, con adiciones de arena volcánica y escoria de alto horno.** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003) p. 6.

18

Héctor Hugo Aguilar Morán. **Estudio de Estabilización de Suelos con Tierra de Diatomeas y Cal Hidratada para uso en construcción de vivienda económica.** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1980) p. 5.

19

Erick Estuardo Juárez Sagastume. **Evaluación de las propiedades físicas de cementos hidráulicos mezclados, fabricados a nivel de Laboratorio, con adiciones de arena volcánica y escoria de alto horno.** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003) p. 22.

20

Kosmatka, Steven H. y William C. Panarese. **Diseño y Control de Mezclas de Concreto.** (México: Instituto Mexicano del cemento y del concreto, 1992) p. 72.

21

Manuel Gonzáles de la Cotera. **Aditivos y adiciones del concreto; normas y aplicaciones.**

22

Emilio Beltranena Matheu. **El Cemento Pórtland Modificado Tipo I, de Cementos Progreso, S.A.** (Guatemala: Cementos Progreso, 1987) p. 3.

23

José Calleja, **Adiciones y cementos con adiciones.** (España: II Jornada de Control de Calidad en la Construcción sobre los Nuevos Cementos, 1982) p. 444.

24

Héctor Hugo Aguilar Morán. **Estudio de Estabilización de Suelos con Tierra de Diatomeas y Cal Hidratada para uso en construcción de vivienda económica.** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1980) p. 5.

25

Hugo Rafael Ordóñez Porta. **Puzolanas y Cementos puzolánicos.** (Guatemala: Primer Simposio Tecnológico de producción de Cemento, 1985) p. 1

26

Mario Estuardo Molina Marroquín. **Cementos Puzolanicos para Mampostería Típica en Guatemala.** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala 1989) p. 13

27

Francisco Javier Quiñónez de la Cruz. **Cemento Puzolánico.** (Guatemala: Centro de Investigaciones de Ingeniería Universidad de San Carlos de Guatemala, 1992) p. 11.

28

Héctor Hugo Aguilar Morán. **Estudio de Estabilización de Suelos con Tierra de Diatomeas y Cal Hidratada para uso en construcción de vivienda económica.** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1980) p. 7.

29

Héctor Hugo Aguilar Morán. **Estudio de Estabilización de Suelos con Tierra de Diatomeas y Cal Hidratada para uso en construcción de vivienda económica.** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1980) p. 39.

30

Héctor Hugo Aguilar Morán. **Estudio de Estabilización de Suelos con Tierra de Diatomeas y Cal Hidratada para uso en construcción de vivienda económica.** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1980) p. 7.

31

Hugo Rafael Ordóñez Porta. **Puzolanas y Cementos puzolánicos.** (Guatemala: Primer Simposio Tecnológico de producción de Cemento, 1985) p. 4.

32

Hugo Rafael Ordóñez Porta. **Puzolanas y Cementos puzolánicos.** (Guatemala: Primer Simposio Tecnológico de producción de Cemento, 1985) p.2.

33

Héctor Hugo Aguilar Morán. **Estudio de Estabilización de Suelos con Tierra de Diatomeas y Cal Hidratada para uso en construcción de vivienda económica.** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1980) p. 8.

34

35

Hugo Rafael Ordóñez Porta. **Puzolanas y Cementos puzolánicos.** (Guatemala: Primer Simposio Tecnológico de producción de Cemento, 1985) p.3.

36

Mario Estuardo Molina Marroquín. **Cementos Puzolanicos para Mampostería Típica en Guatemala.** (Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala 1989) p. 15.

37

Claudio M. Jurado. "Cementos Especiales y Mezclados", **Revista Construcción y Tecnología:** 12. 1990. p.10.

38

39

Kosmatka, Steven H. y William C. Panarese. **Diseño y Control de Mezclas de Concreto.** (México: Instituto Mexicano del cemento y del concreto, 1992) p. 73.

40

Ing. César Luna. Encargado de Laboratorio de Análisis de Calidad de Arrozgua. 12 de Julio de 2006. Comunicación Personal.

41

Pablo Cerezo. Asesor de Ventas INMACO, S.A. 18 de Agosto de 2006. Comunicación Personal.

42

Molina Salinas, Javier Eduardo. **Adición de Ceniza de Cascarilla de Arroz en Hormigón compactado con rodillo.** (Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2,002).

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM Book of Standards.
2. Aguilar Carrera, Félix Alan. Evaluación físico-mecánica del banco de puzolanas La Canoa, Chimaltenango. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1993. 60 pp.
3. Aguilar Morán, Héctor Hugo. **Estudio de Estabilización de Suelos con Tierra de Diatomeas y Cal Hidratada para uso en construcción de vivienda económica.** Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1980.
4. Alonso, M.C, y M. P. Luxán. **Aplicaciones de las cenizas volantes en el Campo de la construcción.** Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.
5. Aquino López, Miriam Elizabeth. Caracterización de 2 bancos puzolánicos y su uso en fabricación de cemento. Bancos de los Departamentos de Chimaltenango y Totonicapán. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1995. 53pp.
6. Arrivillaga Ochaeta, Manuel Alfredo. **Evaluación geológica de bancos de puzolanas y calizas en el occidente de Guatemala.** (Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala: 1993. 19 pp.
7. Barillas Romillo, Lionel Alfonso. Mezclas de cemento Pórtland C-595 I (PM) con puzolanas naturales. Tesis. Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1987. 57 pp.
8. Beltranena, Emilio. **Nuevos cementos hidráulicos del siglo XXI.** (Cementos Progreso). Guatemala: 2005. 10 pp.

9. Beltranena, Emilio. **El cemento Pórtland modificado tipo I (PM) ASTM C - 595 de Cementos Progreso, S.A.** (Cementos Progreso). Guatemala: 1987. 7 pp.
10. Calleja Carrete, José. **Recomendaciones para la utilización de los cementos de las normas UNE 1996.** (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones). España: 1998.
11. Calleja Carrete, José. **Adiciones y cementos con adiciones.** (Conferencia pronunciada en las II Jornadas de control de Calidad en la Construcción sobre el tema Nuevos Cementos). España: 1982.
12. Calleja Carrete, José. **Cementos Puzolánicos.** (Conferencia pronunciada en la Asociación Brasileña de Cemento Pórtland de Sao Paulo y en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial). Argentina: 1976.
13. 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 Pórtland”. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2000. 21 pp.
14. Castro Martínez, Carlos Francisco. Utilización de la escoria de altos hornos para producir cemento, evaluación de la resistencia a la compresión. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1993. 29 pp.
15. Chavarría Soria, Edgar René. Mezclas puzolanas - cal - arena pómez determinación de sus características de uso como material de construcción. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1987. 56 pp.
16. Choc González, German Oswaldo. Estudio de estabilización de arenas con puzolana y cal para uso en construcción de carreteras. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1989. 70 pp.
17. COGUANOR. Normas relacionadas con la industria de la Construcción.

18. Dengo, Gabriel. **Estructura Geológica, historia tectónica y morfología de América Central.** 2ª ed. (Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial). Guatemala. 1973. 52pp.
19. Dirección General de Minería. **Minería en Guatemala. Minería y Desarrollo Sostenido. El Reto en el Tercer Milenio.** (Ministerio de Energía y Minas) Guatemala, 1999.
20. Dirección General de Minería e Hidrocarburos. **Reconocimiento regional, levantamiento geoquímico de sedimentos fluviales.** (Proyecto Minero de Naciones Unidas). Guatemala, 1967.
21. Dutron, Pierre. **La respuesta de la industria cementera a los problemas económicos actuales.** (Conferencia Plenaria pronunciada en el Coloquio Internacional sobre Escorias y Cementos con Adiciones). Bélgica: 1981.
22. Heredia Castro, Samuel Amilcar. Evaluación puzolanica de 6 bancos de materiales piroclásticos del altiplano occidental de Guatemala. Tesis. Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1984. 52 pp.
23. Hernández, R., P. Lemus. Estudio de Laboratorio de Selectos Puzolánicos **estabilizados con cal usados en técnica vial.** (Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). Guatemala 1993. 31 pp.
24. Herrero Nuñez, Eduardo. **Aplicaciones de los cementos con adiciones puzolanicas a edificación y obras públicas.** 17 pp.
25. Jerez Aguilar, Mario Efraín. Evaluación de la adición de puzolana en morteros de cemento reforzados con fibras de maguey y kenaf y proporcionamiento de mezclas. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1986. 92 pp.
26. Juárez Sagastume, Erick Estuardo. Evaluación de las propiedades físicas de cementos hidráulicos mezclados fabricados a nivel de laboratorio con adiciones de arena volcánica y escoria de alto horno. Tesis. Ing. Químico. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2003. 66 pp.
27. Jurado A., Claudio M. "Cementos especiales y mezclados". **Revista Construcción y Tecnología.** (México): 6-11. 1990.

28. Kosmatka, Steven H y William C. Panarese. **Diseño y control de mezclas de concreto.** (Instituto Mexicano del cemento y del concreto). México: 1992. 226 pp.
29. Martirena, J.F. y otros. **Propiedades puzolánicas de desechos de la industria azucarera.** Materiales de Construcción. (51): 2001.
30. Molina Escobar, Kenneth Alejandro. Evaluación de morteros para albañilería y revestimientos elaborados a base de cementos mezclados con escorias de horno. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2006. 79 pp.
31. Molina Marroquín, Mario Estuardo. Cementos Puzolánicos para Mampostería Típica en Guatemala. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1989. 86 pp.
32. Molina Salinas, Javier Eduardo. Adición de Ceniza de Cascarilla de Arroz en Hormigón Compactado con rodillo. Tesis Ing. Civil, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Guayaquil, Ecuador. 2,002.
33. Morales González, Jorge Mario. **Puzolanas naturales para construcción de vivienda en Guatemala.** Revista Ingeniería. (Guatemala): 9.
34. Munduate García, Cristian Lorena. Determinación de Características Cementantes y de Uso para Mezclas Puzolanas-Cal-Arena de Rio. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1987. 50 pp.
35. Nkinamubanzi, P.C. y otros. **El uso de la escoria de alto horno la fabricación de hormigón de calidad.** ECOTRADE. 10 pp.
36. Ocaña Tahuico, Alex Orlando. Efecto de la adición de admixturas minerales en mezclas de concreto de cemento Pórtland. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 73 pp.
37. Ordóñez Porta, Hugo Rafael. **Puzolanas y Cementos puzolánicos.** (Primer Simposio Tecnológico de producción de Cemento). Guatemala: 1985. 11 pp.

38. Ortíz Castillo, Edgar Leonel. Evaluación de propiedades físico-mecánicas en morteros de mampostería de nueve cementos puzolánicos a base de arena blanca. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1992. 97 pp.
39. Peláez Urrutia, Juan Pablo. Losas de concreto liviano reforzadas con bambú. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1986.
40. Pérez Alonso, Julio. **Cementos de Adición.** (IV Jornadas Técnicas de la Asociación de Productores de Cemento del Caribe). México: 1986.
41. Pérez Arias, Carlos Leonel. Evaluación Puzolánica de la Ceniza Volcánica de San Francisco El Alto, Totonicapán. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 1,984. 59 pp.
42. Pérez Vásquez, Mynor Enrique. Evaluación de la actividad puzolánica de la arena pómez y su uso en morteros de levantado, banco Villa Canales, Guatemala. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1991. 47 pp.
43. Polanco Menéndez, Raúl Armando. Puzolanas para uso con cal determinación de su capacidad cementante. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1986. 61 pp.
44. Puertas, F. Cementos de escorias activadas alcalinamente. Situación Actual y perspectivas de futuro. IETCC/SIC. España.
45. Quiñónez de la Cruz, Francisco Javier. **Cemento Puzolánico Fase I.** (Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro de Investigaciones de Ingeniería). Guatemala: 1992. 34 pp.
46. Quiñónez de la Cruz, Francisco Javier. **Cemento Puzolánico Fase II.** (Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro de Investigaciones de Ingeniería). Guatemala: 1993. 24 pp.
47. Quiñónez de la Cruz, Francisco Javier. **Cemento Puzolánico Fase III.** (Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro de Investigaciones de Ingeniería). Guatemala: 1993. 34 pp.

48. Quiñónez Guzmán, Sergio Vinicio. CP-40 en Guatemala experiencias en su producción y aplicación. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1995. 72 pp.
49. Ramírez Godínez, César Armando. Caracterización de mampostería utilizando morteros de cementos puzolánicos y unidades tradicionales de la ciudad de Guatemala. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1993. 41 pp.
50. Rivera Castillo, Darío Roderico. Evaluación de propiedades físico-mecánicas de morteros de mampostería de nueve cementos puzolánicos a base de arena amarilla. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1993. 94 pp.
51. Sabá Medrano, Carlos Eduardo. Evaluación de la Incidencia de la cal en las Propiedades Físico-Mecánicas de tres tipos de Mortero de albañilería. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 124 pp.
52. Sánchez, M.I. y otros. **Investigación sobre la actividad puzolánica de materiales de desecho procedentes de arcilla cocida.** Materiales de Construcción. (51): 2001.
53. Solórzano Jiménez, Edgar Francisco. Caracterización de la escoria de hornos de la planta SIDEGUA como puzolana artificial. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2003. 64 pp.
54. Suárez Bendfelt, Carlos Leonel E. Análisis de propiedades físico-mecánicas en morteros de mampostería a base de arena blanca. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 1992. 62 pp.
55. Urizar Lima, Carlos Alberto. Evaluación Puzolánica de un Banco de Ceniza Volcánica del Municipio de Tecpán. Tesis Ing Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1994. 43 pp.

56. Yalibat Poon, Gonzalo Ermitaño. Evaluación de la actividad puzolánica, propiedades físico-mecánicas y químicas y uso en morteros de mampostería del banco de Salcaja y San Francisco El Alto, Quetzaltenango y Totonicapán. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1993. 59 pp.
57. Zeceña Girón, Carlos Efraín. Caracterización Física – mecánica y química del Cemento Puzolánico. Tesis Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1984. 81 pp.

Referencia electrónica

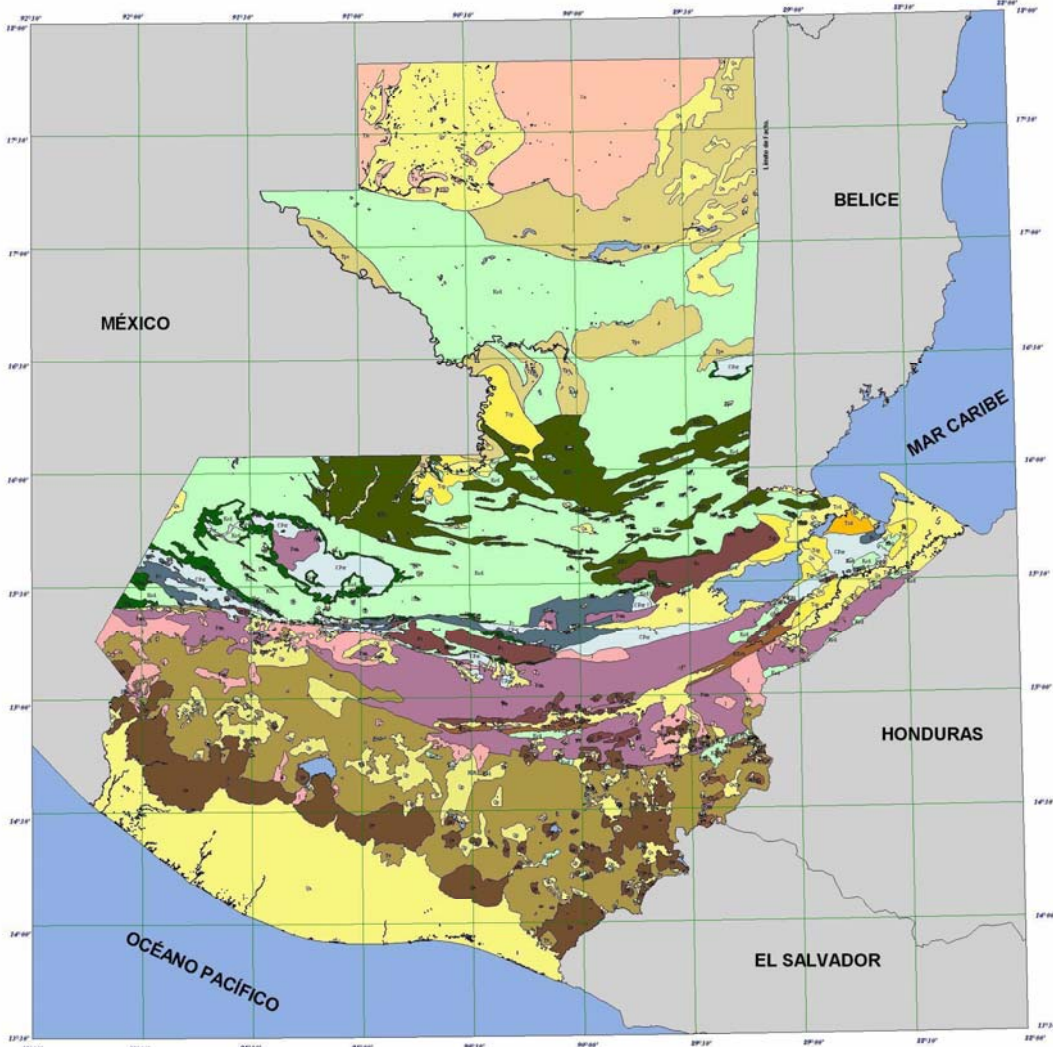
58. Activación Química de Bagazo de Caña de Azúcar
www.asades.org.ar/averma/3-1999/02-41.pdf
59. Aditivos y adiciones del concreto; norma y aplicaciones.
www.imcyc.com/biblioteca/bibliodigital.html.
60. Antecedentes
www.mineco.gob.gt/mineco/coguanor/2003/antecedentes.htm
61. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
www.abnt.org.br/home_new.asp
62. Cemento Gris
www.lcn.com.ec/Upload/EC/Publications/cemento%20gris.pdf
63. CEMEX
www.cemex.com
64. C1 LEM
www.conafovi.gob.mx/publicaciones/Mamposteria/Capitulo%201.pdf
65. VI Congreso de Ingeniería Química
asocem.org.pe

66. En los orígenes de la ISI
www.helsinki.fi/iehc2006/papers3/Tafunell.pdf
67. Estado actual de la investigación de las puzolanas en Guatemala.
www.cujae.edu.cu/centros/cecat/html/eventos/Ecomateriales2001/HTML/Trabajos/c1t28.htm
68. HOLCIM, Ltd.
www.holcim.com
69. IECA Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.
www.ieca.es
70. IGME
www.igme.es/internet/RecursosMinerales/panoramaminero/minerales/cemento03.htm
71. Los Ecomateriales: Una alternativa económica para la construcción.
aupec.univalle.edu.co/informes/2003/febrero/ecomateriales.html
72. Materiales Alternativos al Cemento Pórtland.
www.cinvestav.mx/publicaciones/avayper/marabr02/ESCALANTE.pdf. Julio, 2005.
73. Normalización del cemento: situación y perspectivas
MG de la Cotera - asocem.org.pe
74. Normas Españolas UNE 2002 para cementos.
www.ieca.es/libreria/normas%20une%202002.pdf
75. Normativa para Materiales no Metálicos en el Salvador.
www.minas.upm
76. Número de la Norma
www.mineco.gob.gt/mineco/coguanor/coguanor_catalogo.htm
77. OCR Document
www.asocem.org.pe/bva/it/investigaciones/cemento/tecnologia/Congreso%20de%20Ingenieria%20Quimica.pdf

78. Propiedades y comportamiento de cementos nacionales.
www.minas.upm.es/.../Red-Cyted-XIII/web-rimin/rimin1/jornadas/01ibermac_pdf/06_Cementos/MejiaR-Colombia.pdf
79. Requerimientos del cemento en los reglamentos de construcción.
asocem.org.pe
80. Resumen
www.imcyc.com/revista/1999/agosto/morteros1.htm
81. UNIT – Normalización
www.unit.org.uy/normalizacion/comites_especial_construc.php
82. Utilización de la Zeolita como material de construcción.
www.minas.upm.es/relext/Red-Cyted-XIII/web-rimin/rimin1/III-Jornadas-San-Juan/RosellLam.pdf
83. Valorización de las cenizas volantes en la industria cementera.
www.gem.es/materiales/document/document/g05/d05201/d05201.htm
84. Venezuela Normas COVENIN envíos nacionales e internacionales
www.aqc.com.ve/NormasCOVENIN/NormasCoveninObligatorias
85. 1252
www.mific.gob.ni/DocuShare/dscgi/ds.py/GetRepr/File-4656/html

ANEXOS

Mapa Geológico República de Guatemala



<p>Qa Rocas Sedimentarias ALUVIONES CUATERNARIOS</p>	<p>Tc Rocas Sedimentarias EOCENO Formación Itz'ché y Parte del Grupo Patón (Fleco y mara)</p>	<p>KTs Rocas Sedimentarias CRETÁCICO-TERCIARIO Formación Sapu Campaño, Eteceñ. Predominantemente sedimentos clásticos marinos Incluye Formaciones Toledo, Reforma y Cambio, y Grupo Venapaz</p>	<p>Pc Rocas Sedimentarias PERMIICO Formación Chichal (carbonatos)</p>	<p>Qv ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS CUATERNARIO Rocas volcánicas. Incluye coladas de lava, material lávico, tóbas y edificios volcánicos</p>	<p>Pi ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS TERCIARIO Rocas ultrabásicas de edad desconocida. Predominantemente serpentinitas. En parte pre-Mesozoico en edad</p>
<p>Tso Rocas Sedimentarias TERCARIO SUPERIOR OLOCENO-MIOCENO Predominantemente Continental. Incluye Formaciones Cayu, Amas, Hemea, Bicalay y White. Martí</p>	<p>Tye Rocas Sedimentarias PALEOCENO-EOCENO Sedimentos marinos</p>	<p>Ksd Rocas Sedimentarias CRETÁCICO Carbonatos Neocomano-Campaño. Incluye Cobán, Itz'ey, Campu, Sierra Madre y Grupo Yopa</p>	<p>CPw Rocas Sedimentarias CUATERNARIO (aluviones) Grupo Sierra Rosa (tobas, arenas, conglomerados y litas) Formaciones Santa Rosa, Sacacul, Telec y Macul</p>	<p>Tv ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS TERCARIO Rocas volcánicas sin dividir. Predominantemente Mo-Pleoceno. Incluye tobas, coladas de lava, material lávico y sedimentos volcánicos</p>	<p>Pzm ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS PELEOCENO Rocas metamórficas sin dividir. Filitas, esquistos clásticos y graníferos, esquistos y greses de cuarzo-mica-feldspato, mármol y migmatitas</p>
<p>Tsd Rocas Sedimentarias TERCARIO SUPERIOR OLOCENO-MIOCENO Formaciones Río Dulce (tobas), Lacantón (lapas, rojas) y Desamparo (conglomerado)</p>	<p>KTas Rocas Sedimentarias CRETÁCICO-EOCENO Formación Solón</p>	<p>JMs Rocas Sedimentarias JURÁSICO CRETÁCICO Formación Todos Santos, Jurásico Superior-Neocomano (lapas rojas). Incluye Formación San Ricardo</p>	<p>Qy ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS CUATERNARIO Relenos y cubiertas gruesas de cenizas, pómez de origen diverso</p>	<p>I ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS TERCARIO Rocas plásticas sin dividir. Incluye granitos y dioritas de edad pre-Permico, Cretácico y Terciario</p>	<p>AUA AGUA</p>

Escala: 1 : 1,000,000
 50 0 50 100 Kilómetros
 Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM NAD 27.
 Proyección del mapa impreso: Coordenadas Geográficas, Esferoide de Clarke 1866.

Fuente: Mapa Geológico de la República de Guatemala.
 Instituto Geográfico Nacional, Esc. 1:500,000.
 Compilado por ICAIT, 1970.