



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

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA SUSTITUCIÓN
DE CEMENTO PORTLAND POR LA ADICIÓN MINERAL 2T 1.5 EN LA
RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO**

Luis Angel Quiñónez Lorenzana

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

Guatemala, agosto de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA SUSTITUCIÓN
DE CEMENTO PORTLAND POR LA ADICIÓN MINERAL 2T 1.5 EN LA
RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS ANGEL QUIÑÓNEZ LORENZANA

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER QUINÓNEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

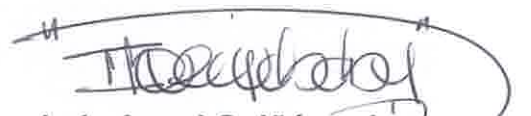
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
EXAMINADOR	Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA SUSTITUCIÓN DE CEMENTO PORTLAND POR LA ADICIÓN MINERAL 2T 1.5 EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 19 de marzo de 2013.


Luis Angel Quiñónez Lorenzana



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, 14 de julio de 2014

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

Señor Director:

Tengo el agrado de informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado “Evaluación experimental del efecto de la sustitución de cemento Portland por la adición mineral 2T 1.5 en la resistencia a compresión de mezclas de concreto”, realizado por el estudiante universitario Luis Ángel Quiñónez Lorenzana, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante Quiñónez Lorenzana cumple con los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente,


Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
Ingeniero Civil Col. No. 1941
Asesor



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA

Cc archivo

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, 21 julio de 2014

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

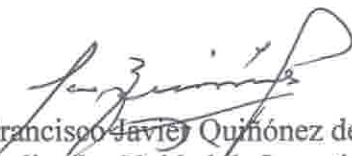
Señor Director:

Tengo el agrado de informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado "Evaluación experimental del efecto de la sustitución de cemento Portland por la adición mineral 2T 1.5 en la resistencia a compresión de mezclas de concreto", realizado por el estudiante universitario Luis Ángel Quiñónez Lorenzana, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante Quiñónez Lorenzana cumple con los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente,


Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
Coordinador Unidad de Investigación
Escuela de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA

Cc archivo

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador de la Unidad de Investigación, Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación del estudiante Luis Ángel Quiñónez Lorenzana, titulado EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA SUSTITUCIÓN DE CEMENTO PORTLAND POR LA ADICIÓN MINERAL 2T 1.5 EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Hugo Leonel Montenegro Franco
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, agosto 2014.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA SUSTITUCIÓN DE CEMENTO PORTLAND POR LA ADICIÓN MINERAL 2T 1.5 EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO**, presentado por el estudiante universitario: **Luis Angel Quiñónes Lorenzana** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano

Guatemala, agosto de 2014



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la fe, ni desfallecer en el intento.

Mis padres

Edgar Vinicio Quiñónez de la Cruz (q.e.p.d.) y Genoveva Patricia Lorenzana Mendoza, por su amor, apoyo, consejos y comprensión en los momentos difíciles y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos. Su amor será siempre mi inspiración.

Mis hermanos

Eduardo Vinicio, Gabriel Andrés y Laura Paola, por su amor y apoyo incondicional, quienes han sido mis amigos fieles y sinceros, en los que he podido confiar y apoyarme para seguir adelante.

Mi familia

Por estar a mi lado en todo momento y ser parte importante de este logro.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por haberme dado las armas necesarias para seguir adelante y la capacidad de poder estudiar.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por haber sido mi casa de estudios y el orgullo de ser sancarlista.
Facultad de Ingeniería	Por mi formación académica.
Mis padres	Edgar Vinicio Quiñónez de la Cruz (q.e.p.d.) y Genoveva Patricia Lorenzana Mendoza, por el amor, apoyo incondicional y confianza que me brindaron a lo largo de mis estudios.
Mi familia	Por ser parte importante de este logro.
Mi asesor	Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, por haberme brindado la oportunidad de trabajar con él y su apoyo incondicional.
Ing. Sergio Vinicio Quiñónez Guzmán	Por su colaboración y apoyo en la parte experimental de este trabajo de investigación.

2.3.	Clasificación de las puzolanas	24
2.3.1.	Clasificación de sistemas basados en la química/mineralogía	24
2.3.1.1.	Puzolanas artificiales.....	25
2.3.1.2.	Puzolanas naturales.....	25
2.3.2.	Sistema de clasificación con base en el comportamiento.....	27
2.3.3.	Clasificación basada en la economía de la producción.....	29
2.4.	Puzolanas en Guatemala	30
2.5.	Adiciones minerales incluidas en mezclas de concreto	31
2.6.	Normas para elaboración de testigos de concreto, ensayos de laboratorio para mezclas de concreto en estado fresco y endurecido	34
2.6.1.	ASTM C31/C31M-12 Making And Curing Concrete Test Specimens In The Field y COGUANOR NTG-41061.....	34
2.6.2.	Ensayo de temperatura: ASTM C1064/C1064M-12 Standard Test Method For Temperature Of Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete y COGUANOR NTG-41053.....	38
2.6.3.	Ensayo de peso unitario: ASTM C138/C138M-13a Standard Test Method For Density (Unit Weight), Yield And Air Content (Gravimetric) Of Concrete y COGUANOR NTG-41017h5	42
2.6.4.	Ensayo de contenido de aire (método de presión): ASTM C231/C231M Standard Test Method For Air Content Of Freshly Mixed	

	Concrete By The Pressure Method y COGUANOR NTG-41017h7	47
2.6.5.	Ensayo de asentamiento (prueba de Slump): ASTM C143/C143M-12 Standard Test Method For Slump Of Hydraulic Cement Concrete y COGUANOR NTG-41052	51
2.6.6.	Ensayo a compresión: ASTM C39/C39M - 12a Standard Test Method For Compressive Strength Of Cylindrical Concrete Specimens y COGUANOR NTG-41017	55
2.6.7.	ASTM C-617/C617M-12 Standard Practice For Capping Cylindrical Concrete Specimens y COGUANOR NTG-41064	62
3.	MARCO EXPERIMENTAL	67
3.1.	Características de la adición.....	67
3.1.1.	Características geográficas	68
3.1.2.	Características físicas.....	68
3.1.2.1.	Granulometría del material	68
3.1.2.2.	Características físicas naturales	69
3.2.	Metodología de trabajo	70
3.2.1.	Obtención de la adición 2T 1.5	70
3.2.2.	Preparación de la adición 2T 1.5	70
3.2.3.	Diseño de mezcla	71
3.2.4.	Mezclas con porcentajes de sustitución de adición 2T 1.5 por cemento Portland	71
3.2.5.	Elaboración de testigos	72
3.2.6.	Pruebas de laboratorio a concreto fresco	74
3.2.6.1.	Peso unitario.....	74

3.2.6.2.	Prueba de contenido de aire (método de presión)	75
3.2.6.3.	Asentamiento (prueba de Slump)	76
3.2.6.4.	Temperatura	77
3.2.7.	Curado de cilindros de concreto	78
3.2.8.	Prueba de ensayo a compresión a concreto endurecido	79
3.3.	Materiales y equipo	79
3.3.1.	Materiales	80
3.3.2.	Equipo	86
3.4.	Resultados	92
3.4.1.	Resultados de pruebas a concreto fresco	92
3.4.1.1.	Resultados de ensayo de asentamiento	93
3.4.1.2.	Resultados de ensayo de temperatura	93
3.4.1.3.	Resultados de ensayo de peso unitario	94
3.4.1.4.	Resultados de ensayo de contenido de aire	95
3.4.2.	Resultado de prueba a concreto endurecido	95
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	101
	CONCLUSIONES	107
	RECOMENDACIONES	111
	BIBLIOGRAFÍA	113
	APÉNDICES	117
	ANEXOS	147

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Distribución de materiales en la franja volcánica de Guatemala, con posibilidades de utilización como adiciones	8
2.	Placas que afectan Centro América	12
3.	Placas que afectan Guatemala	14
4.	Fallas que afectan Guatemala	15
5.	Zonas fisiográficas de Guatemala.....	17
6.	Mapa geológico simplificado de Guatemala y su entorno	21
7.	Clasificación de materiales puzolánicos.....	26
8.	Diagrama esquemático de los patrones típicos de fractura.....	61
9.	Mezclado de materiales	73
10.	Elaboración de testigos de concreto para ensayos.....	74
11.	Preparación para ensayo de peso unitario.....	75
12.	Elaboración de la prueba de contenido de aire, parte 1	75
13.	Elaboración de la prueba de contenido de aire, parte 2.....	76
14.	Prueba de asentamiento	77
15.	Ensayo de temperatura a concreto fresco.....	77
16.	Curado de cilindros	78
17.	Ensayo a compresión de cilindros de concreto	79
18.	Cemento utilizado para hacer las mezclas de concreto	80
19.	Límites ASTM C33, agregado fino	82
20.	Agregado fino, arena triturada.....	82
21.	Límites ASTM C33, agregado grueso	84
22.	Agregado grueso, piedrín 3/8.....	84

23.	Adición mineral 2T 1,5 utilizada para realizar las mezclas evaluadas, en el yacimiento natural.....	85
24.	Cinta métrica metálica	86
25.	Balanza digital.....	87
26.	Mezcladora para concreto	88
27.	Moldes para cilindros de concreto	89
28.	Equipo para ensayo de contenido de aire.....	90
29.	Equipo para prueba de asentamiento	91
30.	Máquina de compresión.....	92
31.	Gráfica resistencia a la compresión del concreto vs edad de curado de mezclas evaluadas	99

TABLAS

I.	Características físico-químicas	29
II.	Capacidad de recipiente para ensayo de peso unitario	45
III.	Tolerancia permisible de tiempo de ensayo.....	58
IV.	Factor de corrección según la relación L/D.....	59
V.	Rango aceptable en fuerza individual de cilindros	60
VI.	Diámetro máximo de la cara movable de la máquina	60
VII.	Resistencia a la compresión y espesor máximo de los materiales para cabecear	66
VIII.	Diseño de mezcla utilizado	71
IX.	Ensayo de asentamiento	93
X.	Ensayo de temperatura.....	94
XI.	Ensayo de peso unitario	94
XII.	Ensayo de contenido de aire	95
XIII.	Valores de coeficiente de variación y grado de uniformidad que puede esperarse en el concreto	96

XIV.	Resistencia a la compresión, edad 7 días.....	97
XV.	Resistencia a la compresión, edad 28 días.....	97
XVI.	Resistencia a la compresión, edad 56 días.....	98
XVII.	Resistencia a la compresión, edad 112 días.....	98
XVIII.	Resumen de resistencias a compresión.....	99

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área de la cara axial del espécimen
cm	Centímetro
V%	Coeficiente de variación
D	Diámetro
R	Esfuerzo a la compresión del espécimen
°C	Grados centígrados
g	Gramo
kg	Kilogramo
kN	Kilonewton
P	Máxima carga aplicada
MPa	Megapascal
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetro
N	Norte
O	Oeste
a/c	Relación agua-cemento
f'c	Resistencia a la compresión
s	Segundo

GLOSARIO

AASHTO	Siglas en inglés de American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes).
Aglomerantes	Materiales, generalmente pétreos blandos, que mezclados con agua se hacen plásticos, formando pasta y que al secarse alcanzan resistencia mecánica.
ARI	Alta resistencia inicial.
ASTM	Siglas en inglés de American Society of Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).
Axial	Relativo a un eje.
Cataclismo	Trastorno grande del globo terráqueo, producido por el agua.
CII	Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Clinker	La principal materia prima de la que se obtiene el cemento Portland, por lo tanto es el más importante componente del concreto.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas.
Espécimen	Muestra, modelo.
Falla	Discontinuidad de la corteza terrestre que ocurre de forma natural por la propagación de una fractura en una estructura de roca de la corteza por la aplicación de una energía cinética en dicho cuerpo.
<i>Fly ash</i>	Ceniza volante.
FODECYT	Fondo para el Desarrollo Científico y Tecnológico.
Hormigón	Concreto.
PVC	Policloruro de vinilo. El más versátil de los plásticos.
Subducción	Proceso mediante el cual parte de la corteza oceánica, individualizada en una placa litosférica, se sumerge bajo otra placa de carácter continental.
Tamiz	Instrumento de malla de alambre y abertura cuadrada, de distintos tamaños nominales. Se utiliza en el ensayo de granulometría.

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó experimentalmente una muestra de un material seleccionado en el occidente de Guatemala, este es una adición mineral, identificada como 2T 1,5, que con anterioridad, en una investigación realizada, se determinó que posee alto grado de reactividad mecánica. El objetivo fundamental fue evaluar el efecto de la sustitución de cemento Portland por la adición mineral 2T 1,5 en la resistencia a compresión de mezclas de concreto.

Se hace una breve base teórica basada en investigaciones realizadas por diversos autores, luego se expone el proceso experimental que se siguió para elaborar la mezcla control de concreto, la cual sirvió para hacer la comparación de comportamiento con las diferentes mezclas de concreto que se elaboraron haciendo la sustitución del cemento Portland por la adición mineral. Dichos resultados fueron importantes para evaluar y explicar si la adición mineral sirve como material que puede sustituir al cemento en las mezclas de concreto, para lograr elaborar mezclas con un comportamiento favorable y con un importante impacto ambiental, técnico, económico y social en la sociedad guatemalteca.

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación FODECYT número 023-2010, que se realiza en la Sección de Eco-materiales del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) y la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con el cofinanciamiento del Consejo Nacional de Ciencia Y Tecnología de Guatemala, a cuyas instituciones se agradece por la oportunidad y el apoyo brindado.

OBJETIVOS

General

Evaluar experimentalmente el efecto de la sustitución de cemento Portland por la adición mineral 2T 1.5, en la resistencia a compresión de mezclas de concreto.

Específicos

1. Establecer las características de la adición mineral 2T 1.5.
2. Diseñar una mezcla de control a partir de la resistencia deseada y de las características de los materiales utilizados.
3. Elaborar mezclas de concreto con la sustitución de diferentes porcentajes de cemento Portland por la adición mineral.
4. Determinar las características de las muestras en estado fresco, para las mezclas de concreto elaborado.
5. Determinar las características de las muestras en estado endurecido, para las mezclas de concreto elaborado, a diferentes edades.
6. Evaluar el efecto de la sustitución de cemento Portland por la adición mineral 2T 1.5, a diferentes edades.

INTRODUCCIÓN

La producción y uso de cemento en la actualidad va en aumento a nivel mundial, por lo que se están buscando opciones que permitan desarrollar cementos que sean favorables con el medio ambiente. Una de las propuestas, sugerida por varios investigadores, es la reducción del uso del clinker y la sustitución de este, por materiales de origen volcánico en la fabricación de cemento, incorporados en el proceso de fabricación de este o bien durante su utilización, en la elaboración de concreto. Según investigaciones realizadas anteriormente, se estableció que Guatemala cuenta con un potencial recurso de adiciones minerales para ser utilizadas en la producción de cemento o concreto.

En consecuencia a la información recopilada en esas investigaciones, en la Facultad de Ingeniería se formuló y desarrolló la investigación: *Determinación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento*, en la cual se caracterizó las muestras de materiales volcánicos estudiadas, posteriormente se determinó el índice de reactividad puzolánica para cada muestra y se llegó a la conclusión que los materiales volcánicos ensayados, efectivamente poseen un grado de reactividad alto.

Para este trabajo se seleccionó una muestra de un material mineral del occidente del país, específicamente del área de Tecpán, y se utilizó para evaluar experimentalmente el efecto de la sustitución de cemento Portland por esta adición mineral, llamada 2T 1,5, en la resistencia a compresión de mezclas de concreto, para determinar si la utilización de la adición evidencia un

comportamiento favorable, lo que conllevaría un gran impacto ambiental, técnico, económico y social en la sociedad guatemalteca.

El documento está dividido en 4 capítulos: el primero hace una breve descripción de los antecedentes en el uso y aplicación de las puzolanas. Se explica qué es una adición mineral y las ventajas que se obtienen al implementar su uso en la fabricación del cemento. También contiene la justificación, que, junto a los antecedentes, lleva a presentar el problema por el cual se decide realizar esta investigación.

El segundo capítulo abarca diferentes aspectos básicos que guiarán al lector de este documento, a obtener conceptos fundamentales que se deben manejar para saber identificar y entender la clase de material con el cual se trabajó en la investigación. También se explica brevemente la importancia y las ventajas de las adiciones minerales en las mezclas de concreto. Por último, se detallan las normas internacionales y nacionales que se utilizaron para la elaboración de testigos de concreto y para la realización de ensayos de laboratorio que se le aplicaron a las mezclas de concreto en estado fresco y en estado endurecido.

En el tercer capítulo se hace una descripción de las características de la muestra del material mineral evaluado, características geográficas y físicas. Asimismo se indica la metodología de trabajo, las características tanto de los materiales utilizados para hacer las mezclas de concreto evaluadas, como del equipo para hacer las mezclas y los ensayos. Se detallan las mezclas elaboradas para la investigación y, por último se muestran los resultados obtenidos en los diferentes ensayos.

El cuarto capítulo presenta un análisis de resultados de cada ensayo estudiado en la parte experimental de la investigación.

Se concluye que se trabajó una adición mineral con un nivel alto de reactividad mecánica, el diseño de mezcla realizado para una resistencia de 350 kg/cm^2 , experimentalmente la resistencia alcanzada corresponde a un 98,89 por ciento de la esperada, se demostró que la sustitución de cemento Portland por adición mineral, desarrollaba un comportamiento de disminución de resistencia en el concreto al incrementar el porcentaje de sustitución, por lo que se determinó que la adición mineral evaluada no es recomendable para utilizarla como sustituto del cemento Portland en la fabricación de concreto con función estructural, sin embargo, podría ser considerada en la fabricación de obras menores.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

Las puzolanas forman parte del cemento de estructuras antiguas en Egipto, Grecia y Roma. Los ingenieros antepasados encontraron que el uso de polvos finos de material natural (comúnmente cenizas volcánicas) o cerámicas molidas podía ser factible para hacer cemento, y consecuentemente construcciones de muy alta calidad, según Quiñónez, en su libro Determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento.

La práctica romana fue el uso de puzolana mezclada con cal y piedra bruta, agregaron una pequeña cantidad de agua, la necesaria, y la mezclaron en una masa compacta.

Después de la era de los romanos, los cementos parecen no haber tenido mucha evolución en prácticas de construcción, hasta la Revolución Industrial cuando requirieron mostrar un mayor progreso y más tarde cuando fue descubierto el cemento Portland, el cual fue patentado en 1824, por Joseph Aspdin, explican Shi y Mo, en su libro Engineering materials for technological needs, high-performance construction materials, science and applications.

Según Price, mencionado por Quiñónez, en su libro Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos, el uso contemporáneo de puzolanas naturales fue, y está todavía en Europa. En los Estados Unidos de América muchas investigaciones y usos de

puzolanas naturales ocurrieron después del primer uso en el acueducto de Los Ángeles en 1912, donde el uso de las puzolanas permitió la disminución en el gasto de la estructura de una cantidad muy considerable para ese tiempo y fue una de las principales razones de su uso por primera vez.

Debe notarse que la principal razón del uso de puzolanas en Estados Unidos de América fue el costo. En todos los proyectos donde grandes cantidades de puzolana fue utilizada, ellas fueron descubiertas muy cerca del sitio de construcción; los costos de transporte fueron muy pequeños para aplicaciones donde no se requerían altas resistencias.

Las tempranas aplicaciones de puzolana en civilizaciones antiguas, como lo evidencian las referencias indicadas anteriormente, y los usos contemporáneos en Europa, Asia y América han mostrado que las puzolanas son materiales muy útiles. Este potencial ha causado el surgimiento de investigación abundante de muchos tipos de materiales puzolánicos para uso en variadas aplicaciones.

El alto consumo energético, el incremento sostenido en el precio de los combustibles fósiles y los grandes volúmenes de emisiones de CO₂, polvos y otros gases de invernadero, derivados de la creciente explosión en la producción de cemento Portland, condujo a partir de los años 90's a buscar opciones de solución, indica Quiñónez, en su libro Determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento.

Este reto implicaría, un cambio de estructura en la producción y utilización del cemento, que permitiera un acondicionamiento a las exigencias ambientales del momento. Así que cualquier solución al problema pasaría por la reducción

del contenido del clinker puro en los materiales aglomerantes según Martirena, mencionado por Quiñónez, en su libro *Determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento*.

“Este hecho ha posibilitado el surgimiento de un grupo genérico de cementos conocido como: cementos compuestos o cementos mezclados, que son una mezcla de cemento Portland ordinario con uno o más materiales inorgánicos que participan en el proceso de hidratación. Los materiales inorgánicos añadidos son denominados: adiciones minerales, que pueden ser mezcladas y molidas íntimamente con el clinker en fábrica, o mezcladas en obra a la hora de producir concreto o mortero. Las adiciones minerales más comúnmente empleadas son las cenizas volantes, las escorias granuladas, la microsílíce y las puzolanas naturales y artificiales. Los porcentajes de adiciones minerales llegan hasta el 50 por ciento en países industrializados, principalmente con los usos de cenizas volantes”¹.

“El uso de puzolanas como adiciones activas mezcladas con cemento Portland estaba apenas siendo considerada para los años 80-90’s. No fue sino hasta los 90’s en que se inició la producción de cementos mezclados, de acuerdo a los requerimientos que las normas internacionales establecieron, con contenidos de puzolanas del orden del 15 por ciento. En la actualidad se producen estos tipos de cemento con un aumento en el porcentaje de adiciones, sin embargo, ese conocimiento no es de dominio público”².

¹ QUIÑÓNEZ, Francisco J. *Determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento*. p. 7.

² Ibid.

En un estudio desarrollado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se realizó una reseña del material volcánico en los departamentos de Guatemala, El Progreso y parte de Chimaltenango y Alta Verapaz. También se realizó una evaluación del material puzolánico de la franja volcánica de Guatemala, en la región de occidente, así como de calizas de la misma zona.

En los años 1988-1993 se realizó la principal investigación, conjuntamente con el Departamento de Materiales de la Universidad de Calgary y apoyados por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá. Según Quiñónez, en su libro Determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento, en ese proyecto se estableció que Guatemala cuenta con un potencial recurso de adiciones para ser utilizadas en la producción de cemento.

La investigación realizada en la Universidad de San Carlos de Guatemala hasta 1993, no permitió llegar a resultados concluyentes por razones de falta de conocimientos a nivel general que existían en ese momento, así como la indeterminación de las técnicas necesarias para su análisis. Después de transcurridos 15 años, se retomó el tema, al observar que los conceptos vertidos en los años 80's y 90's siguen siendo valederos y más aún, la tendencia en las investigaciones a nivel mundial apunta a que el desarrollo de estos materiales se está haciendo cada vez de mayor significancia. Además, las investigaciones experimentales indican que este tipo de materiales ha llegado a sustituir parcialmente al clinker y muy posiblemente en un futuro no muy lejano conducirá a su reemplazo, en porcentajes muy significativos, como base de la producción de cemento, indica Quiñónez, en su libro Estado del arte de

puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos.

En consecuencia a los aspectos anteriormente vertidos, se plantearon dos preguntas fundamentales:

- ¿Tienen los materiales volcánicos de Guatemala las características mínimas como para ser considerados en su utilización como fuente de adiciones minerales en la elaboración de aglomerantes?.
- Si estos materiales tienen esas características, entonces ¿cuál es el grado de reactividad cuando se combinan con otros materiales?.

Para responder a esas interrogantes se formuló y desarrolló la investigación: *Determinación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento*; la cual finalizó en el 2013. En ella se plantearon como objetivos la caracterización de diez muestras de materiales provenientes de la franja volcánica de Guatemala, que abarcó los aspectos físicos, mineralógicos y químicos. Posteriormente la determinación del índice de reactividad puzolánica para cada una de las muestras, mediante el establecimiento del desarrollo de la resistencia a compresión de las muestras de puzolanas combinadas con hidróxido de calcio, en función del tiempo. Finalmente se determinó la reactividad puzolánica de las diez muestras, mediante el establecimiento de la reacción química con hidróxido de calcio.

Se llegó a la conclusión que, los materiales volcánicos ensayados, mediante requerimientos indicados en la Norma ASTM C-618 *Standard Specification For Coal Fly Ash And Raw Or Calcined Natural Pozzolan For Use In Concrete*, efectivamente poseían un grado de reactividad alto.

La base teórica para la presentación de este trabajo de graduación se encuentra en los siguientes documentos:

- *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*, realizado para la Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el 2010.
- Artículo científico: *Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario*, realizado por Juan José Dopico, Fernando Martirena Hernandez, Robert L. Day, Bernhard Middendorf, Matthias Gehrke, Lesday Martinez y publicado en la Revista Ingeniería de Construcción de la Universidad Católica de Chile, en el 2008.
- Informe final del Proyecto de Investigación FODECYT No. 023-10: *Determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez muestras de la franja volcánica de Guatemala*, realizado para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Trabajo de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil: *Geología y caracterización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala*, realizado por el Ing. Victor R. Rosales Rivas, para la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el 2012.

- Trabajo de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil: *Caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala*. realizado por el Ing. Luis A. Ochoa Marroquín, para la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el 2012.
- Trabajo de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil: *Determinación del índice de reactividad mecánica de 18 muestras de materiales volcánicos de Guatemala*, realizado por el Ing. Pablo J. Bautista Gallardo, para la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el 2012.

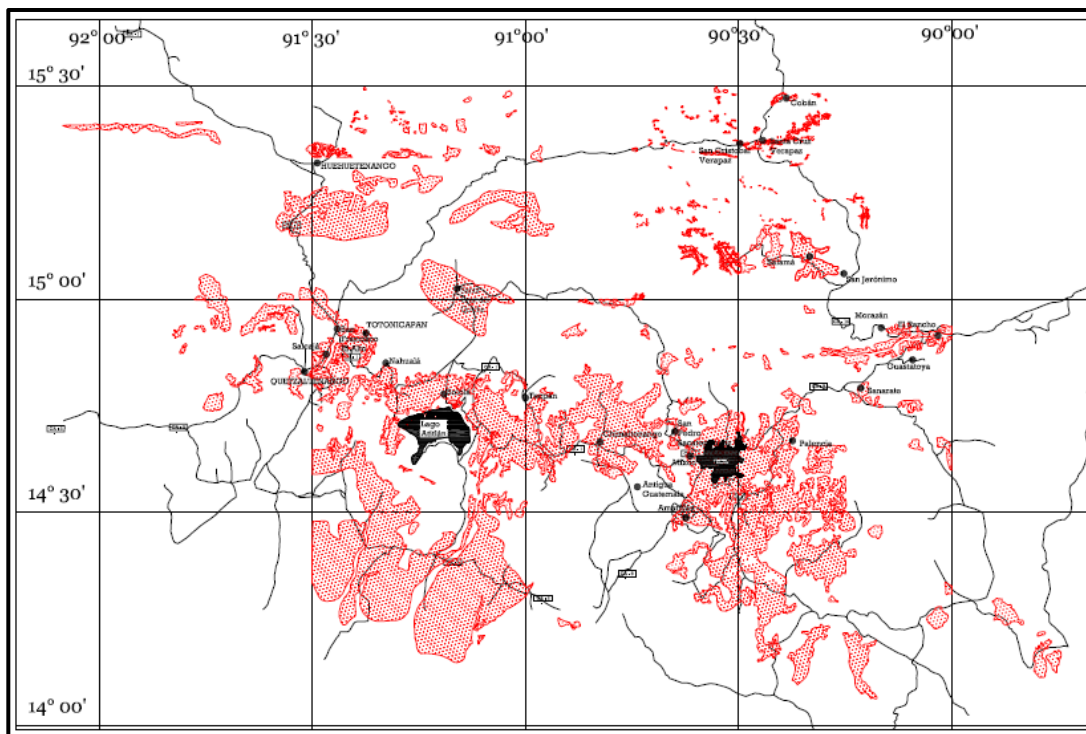
1.2. Justificación

La puzolana es un material, que al mezclarlo con otros materiales, puede adquirir propiedades adecuadas para la construcción, y en Guatemala existe gran cantidad de materiales volcánicos, por lo cual su uso y aprovechamiento en el país es de vital importancia, ya que con él se puede fabricar materiales de construcción de bajo costo y con beneficio al medio ambiente, (ver figura 1).

La producción de concreto crece cada día más. La industria mundial está buscando vías experimentales que permitan desarrollar cementos que precisen menor energía en su formación, degraden menos los entornos y emitan menos gases contaminantes a la atmósfera, según Quiñónez, en su libro Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos.

“El empleo de diferentes subproductos y materiales naturales como alternativas en la fabricación de cemento pueden ser incorporados en el proceso de fabricación del cemento como adiciones activas o bien durante su utilización, en la elaboración de morteros y concretos”³.

Figura 1. **Distribución de materiales en la franja volcánica de Guatemala, con posibilidades de utilización como adiciones**



Fuente: ROSALES, Víctor. *Geología y caracterización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala*. p. 151.

³ QUIÑÓNEZ, Francisco J. *Determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento*. p. 10.

Esta búsqueda ha conducido a encontrar alternativas que ya son utilizadas en países industrializados para la producción del cemento, como el caso de la ceniza volante (*fly ash*). Se sabe que la composición química y otras características de los materiales volcánicos de Guatemala coinciden mucho con la composición y características de las cenizas volantes, lo cual ya fue ratificado por Quiñónez, en su libro *Determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento*.

De manera que el trabajo de graduación realizado, en resumen se justifica, ya que el cemento es un material para el desarrollo de la humanidad, incluyendo para la sociedad guatemalteca. Científicos, en la búsqueda de opciones favorables al medio ambiente, han encontrado oportunidades en otros materiales como la ceniza volante, que coincidentemente tienen composición y características similares a materiales volcánicos encontrados en Guatemala, los cuales ya se ha probado que son materiales altamente reactivos, lo que los hace aptos para su trabajo en la construcción.

1.3. El problema

La sustitución de cemento Portland por la adición mineral 2T, en algún porcentaje determinado, en las mezclas de concreto, conllevaría un fuerte impacto ambiental, técnico, económico y social en la sociedad guatemalteca, por razón de su gran disponibilidad y reactividad; sin embargo, ¿será que la utilización de esta adición en las mezclas de concreto evidencia realmente un comportamiento favorable, desde todos los puntos de vista?

La respuesta a este problema serán las conclusiones que se esperan obtener en este trabajo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Geología de Guatemala

Guatemala está ubicada en América Central, directamente al sur de México. La tectónica regional se enmarca dentro de la evolución de toda la región centroamericana y del Caribe. Geológicamente se cree que Guatemala es una combinación de al menos dos diferentes terrenos geológicos. A continuación se expone detalles importantes de la geología centroamericana y de Guatemala.

2.1.1. Geología centroamericana

Centro América es una región cuya corteza terrestre es especialmente inestable, ya que se encuentra en el borde occidental de la placa tectónica del Caribe. La subducción de la corteza oceánica de este borde, que empezó en el Mioceno, hace 25 millones de años, elevó la tierra desde el mar. En una primera etapa se formó una península y un archipiélago. Más tarde, hace 3 millones de años, las islas dispersas se fundieron para formar un verdadero puente de tierra, o istmo, uniendo Norteamérica y Sudamérica. Al mismo tiempo que la subducción y la elevación, se produjeron erupciones volcánicas y frecuentes cataclismos.

La Placa Norteamericana, Placa del Caribe y Placa de Cocos son las placas tectónicas en las que se encuentra Centro América, como se muestra en la figura 2.

Centroamérica puede ser dividido en dos grandes unidades, las cuales difieren completamente una de otra, tanto en historia geológica como estructura. La parte noreste que contiene Guatemala, Honduras, El Salvador y el noreste de Nicaragua exhibe una corteza tipo continental con rocas paleozoicas, teniendo presencia de rocas metamórficas anatexitas y plutonitas de mayor edad que el Paleozoico.

Figura 2. **Placas que afectan Centro América**



Fuente: <http://jfbblueplanet.blogspot.com/2011/05/la-placa-del-caribe.html>. Consulta: 28 de abril de 2014.

“En el periodo Terciario, el noreste de Centroamérica fue la escena de un volcanismo continental extremadamente violento durante el cual grandes masas de ignimbrita fueron extruidas. La parte sureste de Nicaragua a Panamá está formada de corteza del tipo oceánico del cretáceo, sobre la cual, pequeños

sedimentos marinos y volcánicos fueron depositados durante el periodo Terciario, esta región fue convertida hasta el presente en cortezas que ocupan una posición entre la parte oceánica y la parte continental, utilizando el término controversial: plataforma tectónica. La estructura de la corteza y el desarrollo de las dos partes de Centro América están contrastados una con la otra, de manera altamente diagramática”⁴.

2.1.2. Geología general de Guatemala

“La geología de Guatemala se ha estudiado sistemáticamente a partir de los primeros escritos de Karl T. Sapper (1866–1945). En estudios geológicos, también han intervenido empresas petroleras especialmente en el norte del Petén, estudios de empresas mineras en sitios específicos, universidades extranjeras especialmente de Estados Unidos, Francia y Alemania. En búsqueda de minerales a Guatemala, también vinieron misiones geológicas de Francia a mediados del siglo XIX y de Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. Parte de la geología del país, también fue estudiada por misiones geológicas de cooperación realizadas en la década de 1970 por las Naciones Unidas, en la década de 1980 por la cooperación japonesa, y en la década de 1990 por la cooperación taiwanesa y coreana. Luego de los terremotos de Guatemala en febrero de 1976, y los huracanes Mitch en 1998 y Stan en 2005, también vinieron al país geólogos del Servicio Geológico de Estados Unidos de América a colaborar en la mitigación y el estudio y sistematización de los desastres naturales”⁵.

⁴ ROSALES, Víctor. *Geología y caracterización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala*. p. 16.

⁵ COSILLO, Alan; et al. *La geología en Guatemala*. p. 17.

Como se mencionó previamente, las placas que afectan directamente a Centro América y, que a su vez, afectan a Guatemala son tres: la Placa de Cocos, la Placa Norteamericana y la Placa del Caribe, (ver figura 3).

Figura 3. **Placas que afectan Guatemala**



Fuente: Google Earth. Consulta: 25 de junio de 2014.

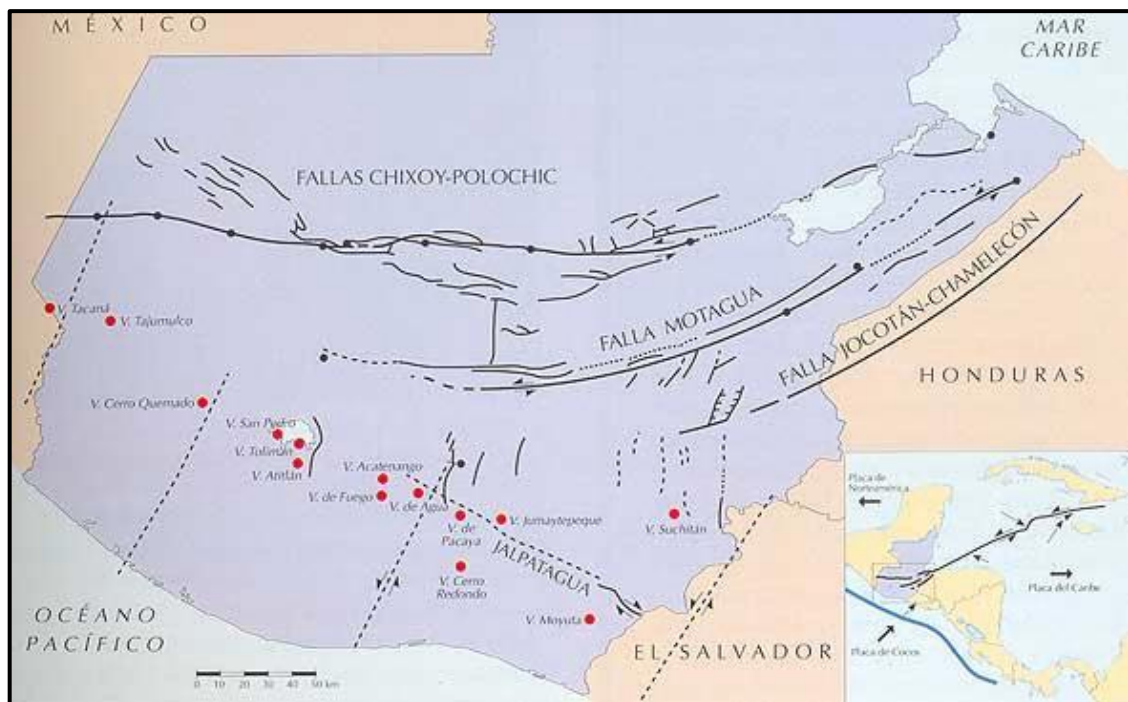
Los movimientos relativos entre estas determinan los principales rasgos topográficos del país y la distribución de los terremotos y volcanes.

Según Rosales, en su libro Geología y caracterización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala, existe una gran interacción a lo largo de la fosa mesoamericana, entre la Placa de Cocos y la del Caribe. La placa de

Cocos está subduciendo bajo la del Caribe. El contacto entre estas dos placas, placa de Cocos y del Caribe, es de tipo convergente. Este proceso da origen a una gran cantidad de temblores y formación de volcanes. El contacto entre estas dos placas está aproximadamente a 50 kilómetros frente a las costas del océano Pacífico. También existe interacción entre las placas del Caribe y la norteamericana; esta interacción ocurre a lo largo de las fallas Motagua, Chixoy-Polochic y San Agustín.

El contacto entre las placas de Norteamérica y Caribe es de tipo transcurrente. Los desplazamientos relativos de las placas dan como respuesta la actividad volcánica y los movimientos telúricos, (ver figura 4).

Figura 4. **Fallas que afectan Guatemala**



Fuente: <http://www.iagcovi.edu.gt>. Consulta: 23 de septiembre de 2013.

Se han formado fallas de menor dimensión por esfuerzos de tensión en la corteza y como consecuencia, principalmente por los desplazamientos relativos de las placas tectónicas. Entre las cuales se pueden mencionar: fallas de Mixco y Santa Catarina Pínula, de Zunil, Jalpatagua y Olintepeque.

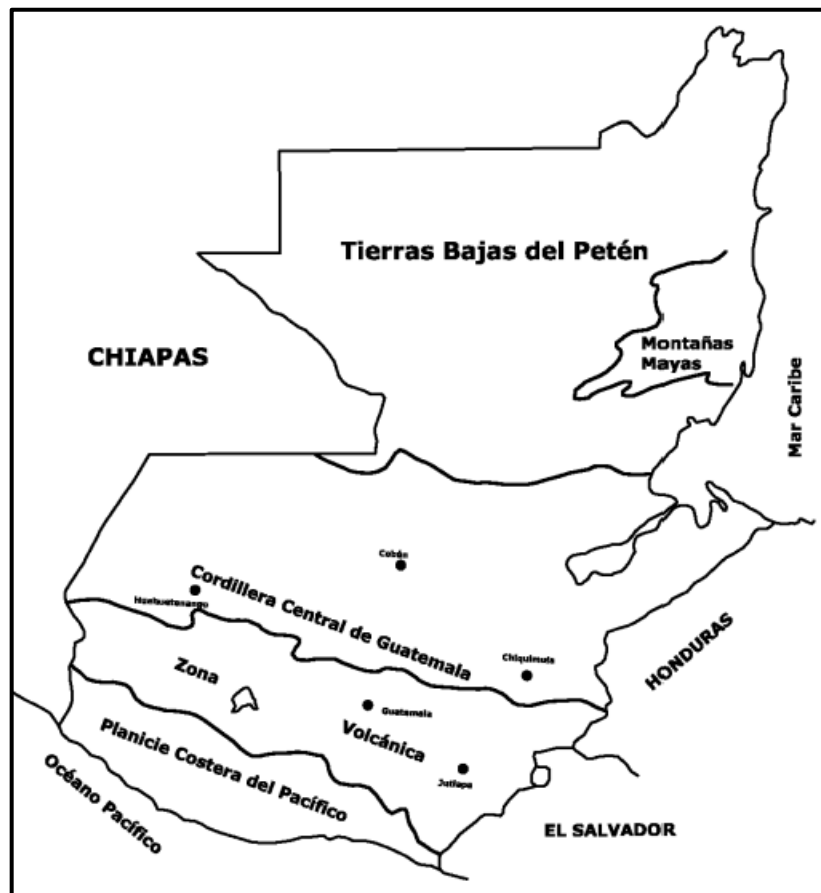
2.1.2.1. Provincias geológicas (estructuras fisiográficas)

Cosillo explica, en su artículo La geología en Guatemala, que la geología de Guatemala es caracterizada por un ambiente fisiográfico con cuatro provincias geológicas:

- Una provincia sedimentaria en la planicie de la costa del Pacífico que corresponde a depósitos cuaternarios resultantes de una planicie de inundación. Conocida como planicie costera del Pacífico.
- Una provincia volcánica la cual está alineada respecto a la costa del océano Pacífico. El volcanismo está asociado a la evolución de un arco de islas que es producto del proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe, esta cadena volcánica está compuesta por edificios volcánicos de edad Terciaria y Cuaternaria, por engrosamiento de la placa del Caribe los edificios volcánicos activos migran hacia el sur con dirección a la línea de costa, llamada provincia volcánica.
- Al centro del país se determina una provincia que forma un cinturón de alto metamorfismo que es producto del rozamiento de la placa del Caribe respecto a la placa norteamericana, formando una zona de sutura conocida como la zona de sutura de la falla del Motagua. Denominada Cordillera Central.

- La cuarta provincia geológica está compuesta, básicamente por depósitos sedimentarios profundos a someros al norte del país. Conocida como tierras bajas del Petén.

Figura 5. Zonas fisiográficas de Guatemala



Fuente: ROSALES, Víctor. *Geología y caracterización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala*. p. 27.

“La geología de Guatemala es sumamente compleja y variada, debido a la complejidad espacial y los diferentes ambientes geológicos que han sido generados por la interacción y la dinámica de tres placas tectónicas (del Caribe, de Cocos y Norteamericana)”⁶.

“Por esa misma complejidad geológica, en Guatemala se pueden encontrar yacimientos de metales base (plomo, zinc y cobre), metales preciosos asociados a ambientes epitermales (oro y mercurio), metales de ambientes ultramáficos níquel, paladio, platino, y cadmio, petróleo y gas asociado a ambientes sedimentarios. Y una gran variedad de rocas con diferentes usos industriales. Asimismo, Guatemala tiene uno de los ambientes de tipo ultramáfico que permite la ocurrencia de jadeita un material semipreciosos utilizado por los mayas para confección de alhajas y adornos”⁷.

2.1.2.2. Ambiente tectónico

“Guatemala está limitada por varios rasgos estructurales mayores, a lo largo de la costa del Pacífico la Fosa Mesoamericana es la frontera sur de la placa del Caribe, al centro del país una falla transcurrente define el contacto de la placa del Caribe y Norteamericana. El segmento de corteza terrestre al norte de la falla Motagua se conoce como bloque Maya, mientras que al segmento al sur de la falla Motagua se lo conoce como bloque Chortí. Muchos de los aspectos geológicos y geomorfológicos actuales pueden definirse por la configuración de los rasgos estructurales y tectónicos”⁸.

⁶ COSILLO, Alan; et al. *La geología en Guatemala*. p. 18.

⁷ Ibid.

⁸ Ibid.

2.1.2.3. Bloques tectónicos

Se denominó a la sección al norte de la zona de sutura de la falla Motagua como bloque Maya y a la sección sur como bloque Chortí, por las diferencias de origen y complejidad geológica, (ver figura 6).

2.1.2.3.1. Bloque Maya

Cosillo, menciona, en su artículo La geología en Guatemala, que el bloque Maya subyace al sureste de México (al este del istmo de Tehuantepec), la parte norte de Guatemala, y Belice. Las unidades más antiguas consisten en rocas metasedimentarias y granitos de edad Grenville. Rocas metamórficas de similares características son el grupo Chuacús.

Se ha determinado que porciones del grupo Chuacús fueron deformadas y metamorizadas en el Cretácico Tardío. Las serpentinitas de la sierra de Santa Cruz y probablemente el alto Cuchumatanes, al norte de la sierra de Chuacús, están emplazadas en secciones de sobre corrimiento, las cuales aparentemente permitieron el afloramiento de rocas metamórficas hacia el norte una espesa secuencia de depósitos carbonatados son responsables de la topografía cárstica en el norte de Guatemala. La deformación regional del Paleozoico y Mesozoico, ocurrió durante una orogenia de choque, resultado del levantamiento del bloque Maya y la formación del plegamiento y de un cinturón deformado que compone la cordillera central de Guatemala. Rocas terciarias cercanas a la zona de sutura del Motagua son en su mayoría clástico marinas y volcánicas, indicando un volcanismo activo, actividad tectónica y tasas de erosión muy altas.

2.1.2.3.2. Bloque Chortí

“El bloque Chortí subyace al sur de Guatemala, El Salvador, Honduras, y el escarpe de Nicaragua, y Jamaica. Su evolución geológica aún es poco conocida. Rocas de alto grado de metamorfismo de posible edad Precámbrica o Paleozoica (esquisto Cacaguapa) afloran en Honduras y probablemente son equivalentes a los esquistos y gneises del grupo las Ovejas. Estos están sobreyacidos por las filitas de la formación San Diego. Las Jurásico Medio a Cretácico Temprano. Estas últimas están sobreyacidas conformablemente rocas sedimentarias más antiguas datadas por métodos paleontológicos de edad Triásico Superior es de la formación agua fría, areniscas, limonitas y calizas de aguas someras de la formación Última de edad Aptiano a Albiano”⁹.

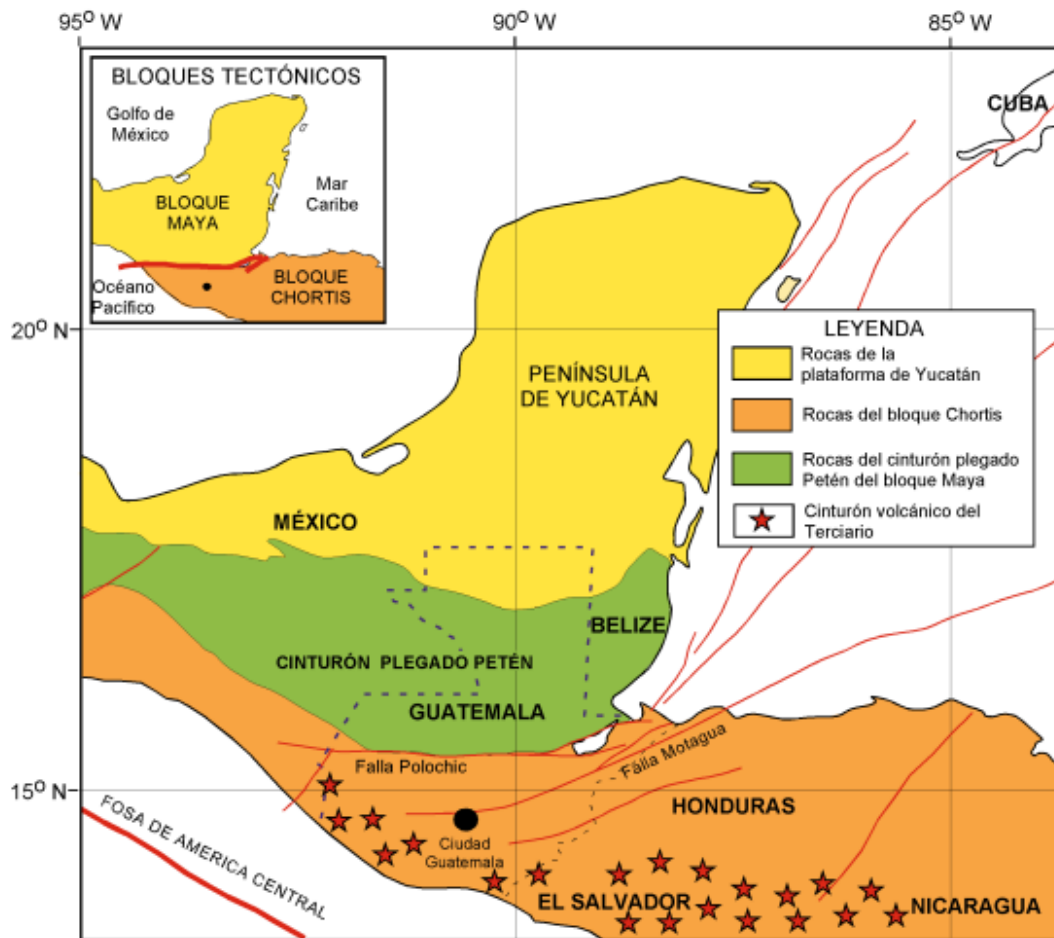
“El grupo del Valle de Ángeles sobreyace confortablemente a las rocas de edad Cretácica. Consiste en una secuencia de conglomerados rojos que gradan positivamente hacia las calizas de edad Cenomaniano/Huroniano de las formaciones Jatique y Esquias y las areniscas rojas de grano fino de edad Campaniano. Rocas volcánicas y plutónicas se encuentra a través de toda la secuencia. Abundantes rocas volcánicas del arco de Centro América sobreyacen la mayor parte del suroccidente del Guatemala”¹⁰.

Según Cosillo, en su artículo La geología en Guatemala, el bloque Chortí pudo haberse localizado en un principio al noroccidente de México y posteriormente fue desplazado a lo largo de un arco paralelo, formado por fallas transcurrentes laterales izquierdas hasta su posición actual. La colisión entre el bloque Chortí y el bloque Maya probablemente sucedió en el Campaniano/Maastrichtiano.

⁹ COSILLO, Alan; et al. *La geología en Guatemala*. p. 20

¹⁰ Op. Cit. p. 21

Figura 6. Mapa geológico simplificado de Guatemala y su entorno



Fuente: Universidad del Valle de Guatemala. *Biodiversidad de Guatemala*, Vol II. p. 2.

2.2. Puzolana

Es un material que pertenece a las adiciones minerales, son incorporados al cemento o al concreto, en diferentes porcentajes, con el fin de mejorar sus propiedades.

2.2.1. Origen e historia

La puzolana es el nombre que recibe la ceniza volcánica que proviene de la población de Puzzuoli, en las faldas del Vesubio, Italia, donde ya era explotada en tiempos de los romanos. Posteriormente el término fue extendiéndose a todos aquellos materiales que, por sus propiedades similares a la puzolana de origen natural, podían tener usos sustitutivos.

La civilización romana fue la que descubrió todo el potencial que estos materiales podían ofrecer. Uno de los mejores exponentes que se pueden encontrar es el Panteón de Roma, construido en el año 123, fue durante 1 500 años la mayor cúpula construida, y con sus 43,3 metros de diámetro aún mantiene récords como ser la mayor construcción de hormigón no armado que existe en el mundo. Esta construcción fue realizada mezclando cal, puzolana y agua; añadiendo en las partes inferiores ladrillos rotos a modo de los actuales áridos, aligerando el peso en las capas superiores usando materiales más ligeros como piedra pómez y puzolana no triturada.

En la provincia de Ciudad Real fue utilizada en la construcción de las murallas de la ciudad medieval de Alarcos mezclándola con cal, razón del color que poseen, y que recuerdan más a un moderno búnker de concreto que a una muralla medieval.

2.2.2. Definición

Actualmente por puzolana se conoce a una diversidad de rocas, arenas y piedras volcánicas. Las puzolanas son materiales silíceos o alumino-silíceos, compuestas principalmente, por aluminosilicatos, a partir de los cuales se producía históricamente el cemento, desde la era romana hasta la invención del

cemento Portland en el siglo XIX. Estos materiales poseen poca o ninguna propiedad cementante, sin embargo, al pasar por algún proceso físico o químico y mezclado con agua y cal, da lugar a una nueva formación de compuestos estables con características cementantes, es decir capaces de desarrollar resistencia por endurecimiento hidráulico.

La Norma ASTM C 595M-13, *Especificación normalizada para cementos adicionados hidráulicos*, define a las puzolanas como: un material silíceo y aluminio, el cual en sí mismo posee un pequeño o ningún valor cementicio pero que, finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionará químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas comunes, para formar compuestos que poseen propiedades cementicias.

La definición anterior ha tenido críticas y ha sido un tema que ha sido polémico entre investigadores, puesto que se han encontrado ciertas puzolanas que, aun no cumpliendo con esta definición, han proporcionado resultados excepcionales. “Por lo que, Hammond, Day y Quiñónez, sugieren que la definición básica de una puzolana debiera ser cambiada a: un material silíceo, aluminoso y ferroso que por sí solo no es cementante, pero que bajo ciertos estados de cristalinidad y estructural, podría reaccionar con cal en presencia de humedad, a temperatura y presión normales, para formar productos cementantes”¹¹.

Day, traducido por Quiñónez, en su libro Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos, expone que las puzolanas tienen la potencialidad de reducir el costo de la construcción. Estos materiales pueden ser mezclados con cemento Portland

¹¹ OCHOA, Luis. *Caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala*. p. 2.

para producir cementos mezclados los cuales pueden sustituir el cemento Portland puro, comúnmente utilizado en materiales de construcción tales como: concreto, bloques de mampostería, mortero de mampostería, ladrillos y otras unidades de construcción.

“Es importante hacer notar que, debido al incremento en el uso de puzolanas, debe tenerse cuidado en prevenir fallas. Para evaluar una puzolana, es necesario entender los mecanismos de reacción puzolánica y aquellos factores fundamentales y prácticos que afectan la reactividad”¹².

2.3. Clasificación de las puzolanas

Se han propuesto diferentes sistemas de clasificación a través de los años en las distintas investigaciones realizadas. Estos pueden dividirse en dos categorías:

- Sistemas basados en la química y mineralogía del material.
- Sistemas basados en la reactividad y características de comportamiento.

2.3.1. Clasificación de sistemas basados en la química/mineralogía

Quiñónez, en su libro Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos, expone que, el sistema más común de clasificación utilizado en la actualidad es aquel que divide a las puzolanas en dos clases: artificiales y naturales.

¹² QUIÑÓNEZ, Francisco J. *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*. p. 6.

2.3.1.1. Puzolanas artificiales

Son provenientes de procesos manejados por el hombre, que a su vez tienen implicaciones ecológicas, debido a la forma en que son obtenidas.

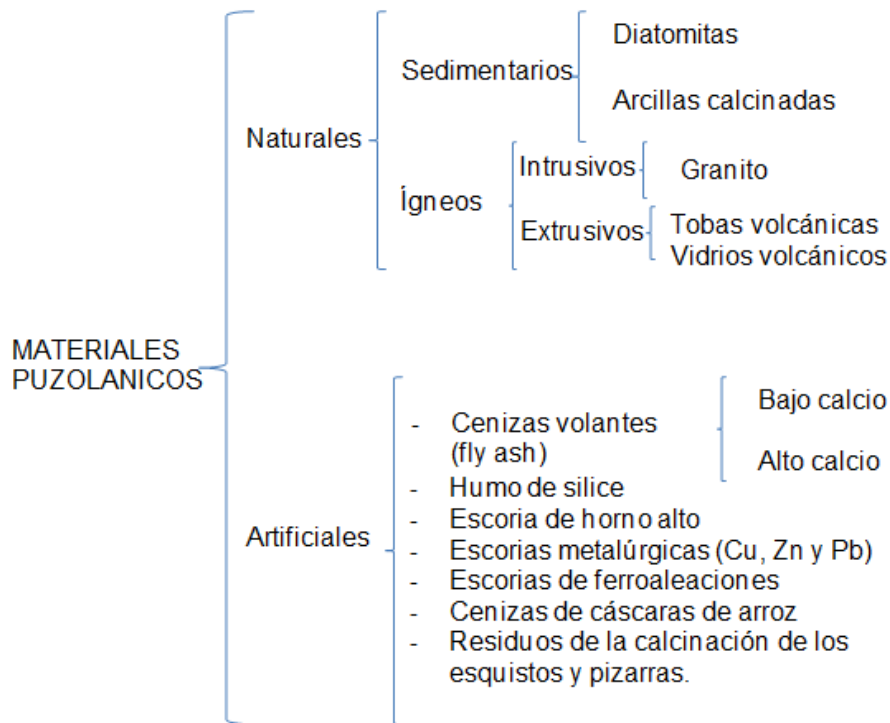
“Las puzolanas artificiales, son productos obtenidos por tratamiento térmico de materiales naturales, tales como las arcillas, ciertas rocas silíceas, y ceniza volante (*fly ash*). La ceniza volante proviene de la calcinación del carbón natural, y es considerada una de las puzolana que mejor reaccionan con el cemento Portland”¹³.

2.3.1.2. Puzolanas naturales

Los materiales denominados puzolanas naturales pueden tener dos orígenes distintos, uno puramente mineral y otro orgánico. Las puzolanas naturales de origen mineral son productos de transformación del polvo y cenizas volcánicas que, como materiales piroclásticos incoherentes procedentes de erupciones explosivas, ricos en vidrio y en estado especial de reactividad, son aptos para sufrir acciones endógenas (zeolitización y cementación) o exógenas (agilización), de las cuales las primeras son favorables y las segundas desfavorables. Por una continuada acción atmosférica (meteorización) se convirtieron en tobas, esto es en rocas volcánicas, más o menos consolidadas y compactas, cristalinas, líticas o vítreas, según su naturaleza. El origen volcánico de las puzolanas naturales es determinante de su estructura. La estructura de las rocas, que se han originado por el enfriamiento de grandes masas de lava que han fluido completamente, depende de la velocidad en que se ha producido el fenómeno.

¹³ ZECEÑA, Carlos. *Caracterización físico-mecánica y química del cemento puzolánico*. p. 25

Figura 7. **Clasificación de materiales puzolánicos**



Fuente: elaboración propia, con base en

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion10.CEMENTOS.MaterialesAdicion.pdf>. Consulta: 18 de julio de 2014.

Las puzolanas naturales de origen orgánico son rocas sedimentarias abundantes en sílice hidratada y formadas en yacimientos o depósitos que en su origen fueron submarinos, por acumulación de esqueletos y caparazones silíceos de animales (infusorios radiolarios) o plantas (algas diatomeas).

Todas las propiedades de las puzolanas naturales y, en particular, aquellas que las hacen especialmente aptas para su aprovechamiento en la industria del cemento, dependen fundamentalmente de su composición y de su textura, las cuales a su vez están íntimamente relacionadas con su origen y formación.

Los materiales puzolánicos naturales están constituidos, principalmente, por rocas eruptivas y en particular efusivas y volcánicas, y dentro de éstas, por extrusivas, salvo las de naturaleza orgánica que son de origen y formación sedimentaria.

2.3.2. Sistema de clasificación con base en el comportamiento

“Un sistema de clasificación conveniente basado en el comportamiento requiere de una base de datos muy grande. Un examen exhaustivo de muestras de puzolanas naturales americanas fue desarrollado por el Bureau of Reclamation de los Estados Unidos de América en 1969. Exámenes petrográficos y ensayos físicos con métodos de ASTM se realizaron y cada puzolana fue incluida en una clase dependiendo de su respuesta física”¹⁴.

El comportamiento está basado en cuatro ensayos: resistencia (actividad puzolánica), trabajabilidad (requerimientos de agua), serviciabilidad (contracción) y durabilidad (ataque álcali agregado). En general se puede determinar que del total de puzolanas naturales, 55 por ciento fueron eliminadas por la oficina después de un examen petrográfico preliminar. Muy pocas, 2.64 por ciento de las puzolanas, no requirieron preparación y solamente 3.40 por ciento de las puzolanas tuvieron una calificación perfecta (clase 1 en cada uno de los requerimientos físicos mostrados), según Quiñónez, en su libro *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*.

¹⁴ QUIÑÓNEZ, Francisco J. *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*. p. 24.

Este tipo de clasificación parece ser más práctico que los otros. El criterio para cada clase podría variar en cada región del mundo, pero los elementos básicos indicados en el sistema (resistencia, trabajabilidad, deformación y durabilidad) son los elementos esenciales de una buena puzolanidad.

Hammond citado por Quiñónez, en su libro Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos, propone una clasificación más simple con base en la resistencia de morteros curados. Esta es la clasificación hindú, la cual presenta los siguientes límites de resistencia y su interpretación:

- Muy inactiva: si la resistencia es menor de 1,4 MPa
- Inactiva: si la resistencia está entre 1,4 y 2,8 MPa
- Pobremente activa: si la resistencia está entre 2,8 y 4,1 MPa
- Intermedia: si la resistencia está entre 4,2 y 5,5 MPa
- Activa: si la resistencia está entre 5,5 y 6,9
- Muy activa: si la resistencia es mayor de 6,9 MPa

La Norma ASTM C618-12 *Standard Specification For Coal Fly Ash And Raw Or Calcined Natural Pozzolan For Use In Concrete*, tiene una clasificación y caracterización de la puzolana dividiéndola en tres grupos, (ver tabla I):

- Clase N: puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tobas y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y varios materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas.
- Clase F: ceniza volante producida por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Estas cenizas poseen propiedades puzolánicas.

- Clase C: ceniza volante producida por la calcinación de carbón lignito o subbituminoso. Esta clase de ceniza además de tener propiedades puzolánicas, también tiene propiedades cementicias.

Tabla I. **Características físico-químicas**

Características químicas		Clase		
		N	F	C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	Min. %	70,0	70,0	50,0
SO ₃	Máx. %	4,0	5,0	5,0
Contenido de humedad	Máx. %	3,0	3,0	3,0
Pérdida de ignición	Máx. %	10,0	6,0	6,0
Características físicas				
Finura + malla No. 325	Min. %	34,0	34,0	34,0
Fuerza índice de actividad	Máx. %	75,0	75,0	75,0
Requerimiento de agua	Máx. %	115,0	105,0	105,0
Autoclave expansión o contracción	Máx. %	0,8	0,8	0,8
Requisitos de uniformidad				
Densidad Var. Máx.	Máx. %	5,0	5,0	5,0
% retenido malla No. 325	Máx. %	5,0	5,0	5,0

Fuente: elaboración propia, con base en la Norma ASTM C618-12^a.

2.3.3. Clasificación basada en la economía de la producción

“En la práctica, en los países en desarrollo hay poco interés si una puzolana es natural o artificial, o si una puzolana es más o menos reactiva que otra, o cual es el origen geológico o mineralógico de una puzolana. Lo que los

dueños o clientes requieren de la puzolana son dos cosas: que sea suficiente buena para cumplir con los requerimientos de las normas nacionales, y que su utilización provoque una reducción en los costos de construcción, cuando se compara con materiales tradicionales (como el cemento Portland)”¹⁵.

“Una alternativa más, basada en ingeniería práctica, podría ser un sistema que clasifica a las puzolanas dependiendo de la cantidad de energía que se requiere incorporar en el lugar para hacerla conveniente y útil. Una base simple para esa clasificación podría ser, por ejemplo: (a) materiales que no requieren energía más que la de mezclado (cenizas volcánicas de grano fino; cenizas volantes); y (b) materiales que requieren significativa energía incorporada en el proceso (extracción, calcinación, molienda)”¹⁶.

Tal sistema de clasificación podría ser utilizado conjuntamente con una clasificación de comportamiento, para producir una clasificación promedio que sea utilizada regularmente tanto por personas prácticas, inversionista e ingenieros, indica Quiñónez, en su libro Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos.

2.4. Puzolanas en Guatemala

Las puzolanas de mayor trascendencia, en Centro América y el Caribe, parecen estar localizadas en Guatemala. Existen cenizas volcánicas y depósitos de pómez cerca de la ciudad de Guatemala, los cuales son potencialmente convenientes para los asentamientos en la ciudad.

¹⁵ QUIÑÓNEZ, Francisco J. *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*. p. 25.

¹⁶ Op. Cit. p. 26.

Según Williams, citado por Quiñónez, en su libro Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos, se realizó un reconocimiento geológico en el estudio: *Volcanic History of the Guatemalan Highlands*, para Guatemala, en donde la unidad pómez ya es caracterizada, describe 6 unidades y se discute su posible origen.

Tomando como base el estudio de Williams, se detectó material piroclástico en las cercanías de Salamá y Cobán.

Se cartografió el material piroclástico como una unidad estratigráfica y muy importante, en Bonis (1965) y Bonis; et al. (1966). Estudios muy completos se han realizado sobre estos materiales, desde el punto de vista geológico, tales como: *Stratigraphy, mineralogy and distribution of the Sumpango Group Pumice deposits*, por McLean, en 1970 y *Stratigraphy, mineralogy and distribution of the San Cristobal Group Pumice deposits in Guatemala*, por Koch, en 1970.

El Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, desarrolló una reseña del material volcánico en Guatemala, El Progreso y parte de Chimaltengo y Alta Verapaz.

2.5. Adiciones minerales incluidas en mezclas de concreto

A través de la incorporación de las adiciones minerales durante el proceso de fabricación del concreto, se reduce la producción de clinker, la cual es una de las medidas que se deben tomar para disminuir las emisiones de CO₂ durante la producción del cemento.

El uso reportado de las adiciones minerales ha llegado solo a un 22 por ciento de reducción de las emisiones, debido a que las mejoras tecnológicas dependen del nivel económico del país donde la producción tiene lugar, según Dopico; et al., en el artículo Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario.

“Progresos en el conocimiento de la ciencia del concreto, el uso de modernas técnicas en la investigación de la química y microestructura del concreto, así como del desarrollo de la industria de los aditivos químicos, han abierto nuevas perspectivas para el uso del concreto como un material de construcción moderno. Estos resultados han revelado nuevas caminos hacia el desarrollo de concretos con pocas cantidades de cemento Portland. El uso de pequeñas cantidades de cemento Portland y grandes cantidades de adiciones puzolánicas y otros subproductos combinados con aditivos de alto poder dispersante, son vistos como una atractiva vía para mejorar el perfil medio ambiental del concreto”¹⁷.

Las cenizas volantes, escorias granuladas microsílíce y otras puzolanas naturales o calcinadas son reportadas como las adiciones minerales más utilizadas actualmente en los cementos mezclados. La naturaleza de los productos formados durante la reacción puzolánica en los cementos mezclados depende de las propiedades de las puzolanas y del clinker utilizado para elaborar el concreto.

Según Dopico; et al., en el artículo Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario, las adiciones minerales de alta finura pueden ayudar al mejoramiento de las

¹⁷ DOPICO, Juan J.; et al. Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario. p. 172

características del concreto. Estos pueden ser efectos físicos tal como el incremento de la compacidad, o efectos físico-químicos como los nuevos productos de reacción formados durante la reacción puzolánica. En ambos casos el efecto final es similar, la porosidad del concreto disminuye y la distribución y tamaño de los poros se hacen más pequeños. El uso de las puzolanas puede modificar las propiedades reológicas, mecánicas y la durabilidad del concreto.

En concretos de resistencias normales, las puzolanas son añadidas para reducir los costos y mejorar los valores de resistencia y durabilidad de la mezcla endurecida. Explica Dopico; et al., en el artículo Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario, que en estos casos, las puzolanas ayudan a mejorar la compacidad de los sólidos, pero el rol primario es proveer silicato cálcico hidratado adicional por medio de la reacción con el agua y con el hidróxido cálcico proveniente de la reacción del cemento Portland. Algunas de estas puzolanas altamente reactivas son añadidas en pequeñas proporciones y ayudan a mejorar los valores de resistencias a edades tempranas, como también, la durabilidad a mayores edades.

En concretos de alta y ultra-altas resistencias, el fin principal es optimizar la distribución de tamaño de partículas, especialmente las finas. El uso de plastificantes de alto poder dispersante permiten disminuir la relación agua-aglomerante en las mezclas. El concreto resultante tiene una alta resistencia, alta compacidad y por ende baja porosidad. En muchas de estas mezclas, sin embargo, la sustitución de cemento Portland es menos del 15 por ciento, indica Dopico; et al., en el artículo Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario.

Según Dopico, et al., la reacción puzolánica en muchas puzolanas es significativa después de los 7 días, cuando la mayoría de los productos de reacción del cemento ya se han formado y la concentración alcalina es considerable para romper los enlaces y facilitar la formación de productos de reacción del cemento. En muchos casos y dependiendo de la reactividad de la puzolana, muchas de las reacciones finalizan en los primeros 60 días. Sin embargo, el uso de grandes cantidades de adiciones minerales incrementan el riesgo de la auto-neutralización, y la caída del pH en un valor significativo puede causar la disolución de otros productos de reacción y la destrucción de la matriz cementicia.

2.6. Normas para elaboración de testigos de concreto, ensayos de laboratorio para mezclas de concreto en estado fresco y endurecido

El asegurar la calidad en los laboratorios de ensayo incluye una gran variedad de actividades para prevenir problemas y optimizar la precisión, exactitud y confiabilidad de los ensayos, por lo que en este trabajo de graduación todo procedimiento, equipo y materiales utilizados, se rigen bajo normas internacionales, ASTM y su equivalente en normas nacionales, COGUANOR.

2.6.1. ASTM C31/C31M-12 Making And Curing Concrete Test Specimens In The Field y COGUANOR NTG-41061

La Norma ASTM C31 establece el procedimiento para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en campo.

- Equipo necesario
 - Moldes: deben ser de acero, hierro forjado, PVC u otro material no absorbente y que no reaccione con el cemento. Antes de usarse los moldes deben ser cubiertos ligeramente con aceite mineral o un agente separador de encofrado no reactivo.
 - Varilla: debe ser de hierro liso diámetro 16 milímetros (5/8 pulgadas), de 60 centímetros de largo y con una de sus extremos boleados.
 - Mazo: debe usarse un mazo de goma que pese entre 0,60 y 0,80 Kilogramos.

- Equipo adicional
 - Espátula, plancha de metal y depósito que contenga el íntegro de la mezcla a colocar en la probeta (una carretilla de obra cumple este requerimiento).

- Muestreo
 - Los especímenes deben ser cilindros de concreto vaciado y fraguado en posición vertical, de altura igual a dos veces el diámetro, siendo el espécimen estándar de 15,24x30,48 centímetros (6x12 pulgadas), o de 10,16x20,32 centímetros (4x8 pulgadas) para agregado de tamaño máximo que no excede los 2,54 centímetros (2 pulgadas).
 - Las muestras deben ser obtenidas al azar, por un método adecuado y sin tener en cuenta la aparente calidad del concreto. Se deberá obtener una muestra por cada 120 metros cúbicos de

concreto producido o 500 metros cuadrados de superficie llenada y en todo caso no menos de una diaria. Este ya es un tema sujeto al criterio del ingeniero residente o del supervisor de obra, ya que la importancia de determinado elemento estructural puede ameritar la toma de un mayor número de muestras para control.

- Colocar el molde sobre una superficie rígida, horizontal, nivelada y libre de vibración.
- Colocar el concreto en el interior del molde, depositándolo con cuidado alrededor del borde para asegurar la correcta distribución del concreto y una segregación mínima.
- Llenar el molde en tres capas de igual volumen. En la última capa agregar la cantidad de concreto suficiente para que el molde quede lleno después de la compactación. Ajustar el sobrante o faltante de concreto con una porción de mezcla y completar el número de golpes faltantes. Cada capa se debe compactar con 25 penetraciones de la varilla, distribuyéndolas uniformemente en forma de espiral y terminando en el centro. La capa inferior se compacta en todo su espesor; la segunda y tercera capa se compacta penetrando no más de 2,54 centímetros (1 pulgada) en la capa anterior. Después de compactar cada capa golpear los lados del molde ligeramente de 10 a 15 veces con el mazo de goma para liberar las burbujas de aire que puedan estar atrapadas (es usual dar pequeños golpes con la varilla de fierro en caso de no contar con el mazo de goma).
- Enrasar el exceso de concreto con la varilla de compactación y completar con una llana metálica para mejorar el acabado superior. Debe darse el menor número de pasadas para obtener una superficie lisa y acabada.

- Identificar los especímenes con la información correcta respecto a la fecha, tipo de mezcla y lugar de colocación. Hay que proteger adecuadamente la cara descubierta de los moldes con telas humedecidas o películas plásticas para evitar la pérdida de agua por evaporación.
 - Después de elaboradas las probetas se transportarán al lugar de almacenamiento donde deberán permanecer sin ser perturbadas durante el periodo de curado inicial. Si la parte superior de la probeta se daña durante el traslado se debe dar nuevamente el acabado. Durante las primeras 24 horas los moldes deberán estar a las siguientes temperaturas: para $f'c > 422$ kilogramo/centímetro cuadrado: entre 20 y 26 grados Celsius y para $f'c < 422$ kilogramo/centímetro cuadrado: entre 16 y 27 grados Celsius.
 - No deben transcurrir más de 15 minutos entre las operaciones de muestreo y moldeo del pastón de concreto. Se deben preparar al menos (2) probetas de ensayo de cada muestra para evaluar la resistencia a la compresión en determinada edad por el promedio. Lo usual es evaluar resistencias a los 7 y 28 días.
- Desmoldado

Las probetas se retirarán de los moldes entre las 18 y 24 horas después de moldeadas. Hecho esto se marcará en la cara circular de la probeta las anotaciones de la tarjeta de identificación del molde. Luego de esto deben pasar a curado.

- Curado

Después de desmoldar las probetas y antes de que transcurran 30 minutos después de haber removido los moldes, almacene las probetas en condiciones adecuadas de humedad, siempre cubiertas por agua a una temperatura de entre 23 y 25 grados Celsius. Deben mantenerse las probetas en las mismas condiciones de la estructura origen (protección, humedad, temperatura, etc.).

El laboratorio, además de certificar la resistencia, debe dejar constancia del peso y dimensiones de las probetas, de la fecha y hora del ensayo.

2.6.2. Ensayo de temperatura: ASTM C1064/C1064M-12 Standard Test Method For Temperature Of Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete y COGUANOR NTG-41053

La temperatura es uno de los factores más importantes que influyen en la calidad, tiempo de fraguado y resistencia del concreto. Sin el control de la temperatura del concreto, predecir su comportamiento es muy difícil, si no imposible.

Un concreto con una temperatura inicial alta, probablemente tendrá una resistencia superior a lo normal a edades tempranas y más baja de lo normal a edades tardías. La calidad final del concreto probablemente se verá también disminuida. Por el contrario, el concreto mezclado y curado a temperaturas bajas desarrollará su resistencia a una tasa más lenta, pero finalmente tendrá una resistencia más alta y será de mayor calidad. La temperatura del concreto se usa para indicar el tipo de curado y protección que se necesitará, así como el

lapso de tiempo en que deben mantenerse el curado y la protección. Al controlar la temperatura del concreto dentro de los límites aceptables se podrán evitar problemas tanto inmediatos como futuros. Cuando hay que evaluar diferentes tipos de concreto, la temperatura de las mezclas de cada concreto debe ser tan idéntica como sea posible.

La temperatura del concreto afecta el comportamiento de los aditivos químicos, los aditivos inclusores de aire, los materiales puzolánicos y otros tipos de aditivos y adicionantes.

A continuación se describe brevemente lo que dice la Norma ASTM C1064 respecto a este ensayo:

- Alcance

Este método de prueba permite medir la temperatura de mezclas de concreto recién mezclado, dosificado con cemento Portland. Puede usarse para verificar que el concreto satisfaga requerimientos específicos de temperatura.

- Equipo

- Recipiente: debe estar elaborado de un material no absorbente y debe tener dimensiones tales que permitan un recubrimiento de al menos 75 milímetros (3 pulgadas) de concreto en todas las direcciones alrededor del sensor medidor de temperatura. La cantidad de concreto que debe cubrir, tiene que ser mínimo tres veces el tamaño máximo del agregado grueso.
- Medidor de temperatura: calibrarlo para medir la temperatura del concreto recién mezclado con una variación de $\pm 0,5$ grados

Celsius (1 grado Fahrenheit), dentro de un rango entre 0 a 50 grados Celsius (30 a 120 grados Fahrenheit). El dispositivo que mide la temperatura (sensor) requerirá la inmersión de 75 milímetros (3 pulgadas) o más en el concreto, durante la operación.

- Calibración del medidor de temperatura: el aparato medidor de temperatura debe calibrarse anualmente o cuando se tenga duda de su grado de exactitud. La calibración de los medidores de temperatura puede ser realizada en aceite u otras inmersiones que tenga densidad uniforme, si este está provisto para:
 - Mantener la temperatura de la inmersión constante en (0,2 grados Celsius) durante el período de la prueba.
 - Mantener la temperatura y el medidor de temperatura inmersos por un mínimo de cinco minutos antes de tomar lectura.
 - Mover continuamente la cantidad de agua para mantener la temperatura uniforme.

- Muestra

La temperatura de la mezcla de concreto puede medirse en el equipo de transporte, si es que el aparato medidor está cubierto por al menos 75 milímetros de concreto (3 pulgadas) en todas las direcciones.

La temperatura de la mezcla de concreto puede obtenerse después de vaciar el concreto.

Si no se mide la temperatura en el equipo de transporte, debe prepararse una muestra como se indica a continuación:

- Humedezca (con agua) el recipiente en el que obtendrá la muestra del concreto.
- Obtenga una muestra de concreto recién mezclado según la Norma ASTM C172.
- Coloque el concreto recién mezclado en el recipiente no absorbente.

Cuando el concreto contenga agregados de tamaño máximo nominal mayor a 75 milímetros (3 pulgadas), puede requerir 20 minutos antes de que la temperatura se estabilice.

- Procedimiento

- Obtener una muestra de concreto dentro de un contenedor no absorbente, de tamaño suficiente para proveer un mínimo de 75 milímetros (3 pulgadas) de concreto alrededor del sensor de temperatura en todas las direcciones.
- Utilizar un termómetro con una exactitud de $\pm 0,5$ grados Celsius (1 grado Fahrenheit), e intervalo de temperatura de 0 a 50 grados Celsius (30 a 120 grados Fahrenheit).
- Colocar el termómetro dentro de la muestra cubriendo el sensor con un mínimo de 75 milímetros (3 pulgadas) en todas las direcciones. Cierre desde la izquierda presionando con delicadeza el concreto alrededor del medidor de temperatura en la superficie del concreto para así prevenir que la temperatura ambiente afecte la lectura en el instrumento.

- Tomar la lectura de temperatura después de un tiempo mínimo de 2 minutos o hasta que la lectura se estabilice, luego lea y registre.
 - Completar la medición de la temperatura dentro de 5 minutos siguientes a la obtención de la muestra compuesta. Excepto para concretos que contiene un tamaño máximo nominal de agregado mayor a 75 milímetros (3 pulgadas).
 - Registrar la temperatura con una precisión de 0,5 grados Celsius (1 grado Fahrenheit).
- Reporte

Registre la temperatura del concreto recién mezclado con una precisión de 0,5 grados Celsius (1 grado Fahrenheit).

- Consideraciones generales

Tiempo: 5 minutos para realizar el ensayo y mínimo 2 minutos para que la lectura se estabilice. En el caso de concreto con agregados mayores a 75 milímetros se podrá requerir hasta 20 minutos.

2.6.3. Ensayo de peso unitario: ASTM C138/C138M-13a Standard Test Method For Density (Unit Weight), Yield And Air Content (Gravimetric) Of Concrete y COGUANOR NTG-41017h5

La prueba del peso unitario es una herramienta importante utilizada para controlar la calidad del concreto recién mezclado. Después de que se ha establecido un proporcionamiento para la mezcla de concreto, un cambio en el peso unitario indicará un cambio en uno o más de los otros requisitos del

desempeño del concreto. Un peso unitario más bajo puede indicar, (1) que los materiales han cambiado, (2) un mayor contenido de aire, (3) un mayor contenido de agua, (4) un cambio en las proporciones de los ingredientes y/o, (5) un menor contenido de cemento. Inversamente, el peso unitario más alto indicará lo contrario de las características del concreto antes mencionadas. Un peso unitario más bajo que las proporciones de la mezcla de concreto establecidas, en general indicará un sobrerendimiento esto significa que el contenido de cemento requerido para un metro cúbico disminuye para producir un mayor volumen de concreto. Por lo tanto, son de esperarse resistencias más bajas así como una reducción de las otras cualidades deseables del concreto.

Si la reducción del peso unitario del concreto se debe a un incremento en el contenido de aire, posiblemente el concreto será más durable en su resistencia a ciclos de congelación y deshielo, pero las cualidades de resistencia a la compresión, a la abrasión, al ataque de químicos, a la contracción y al agrietamiento del concreto, se verán adversamente afectadas. La prueba de peso unitario se debe usar para controlar concretos ligeros y pesados. Un cambio en el peso unitario podría afectar inversamente la bombeabilidad, colocación, acabado y resistencia de todos los tipos de concreto. Ya que la prueba de peso unitario es tan importante para regular la calidad del concreto, es fundamental que la prueba se realice de acuerdo con los procedimientos estándar especificados. Se debe conocer el volumen exacto del contenedor; después de que la muestra de concreto se enrase al nivel del recipiente, todo el concreto adherido a la parte exterior del recipiente debe removerse antes de pesar la muestra.

A continuación se describe brevemente lo que dice la Norma ASTM C138.

- Alcance

Este método de prueba cubre la determinación de la densidad del hormigón fresco y señala las fórmulas para calcular el rendimiento, contenido de cemento, y contenido de aire del hormigón fresco. Rendimiento es definido como el volumen del concreto producido por una mezcla de materiales de características conocidas.

- Equipo

- Balanza: con una exactitud de 45 gramos (0,1 libras) o dentro del 0,3 por ciento de la carga de prueba.
- Varilla: tiene que ser recta, de acero, 16 milímetros (5/8 pulgadas) de diámetro y aproximadamente 600 milímetros (24 pulgadas) de longitud, el final de la barra termina en una punta redondeada hemisférica cuyo diámetro es de 16 milímetros.
- Vibrador interior: los vibradores interiores pueden ser rígidos o flexibles, preferentemente impulsado por motores eléctricos. La frecuencia de vibración debe ser de 7 000 vibraciones por minuto o más mientras se lo usa. El diámetro externo o la dimensión lateral del elemento vibrante será por lo menos 19 milímetros (0,75 pulgadas) y no mayor que 38 milímetros (1,50 pulgadas). La longitud del elemento será por lo menos 600 milímetros (24 pulgadas).
- Recipiente: debe ser cilíndrico, de acero u otro metal. La capacidad mínima del recipiente se determinará de acuerdo al tamaño nominal máximo del agregado, especificado en la tabla II. Todas las medidas, excepto las medidas de los recipientes, medidores de aire, los cuales son utilizados en los ensayos ASTM

C138 deben estar en conformidad a los requerimientos del método de ensayo ASTM C29. Cuando las mediciones de los recipientes u medidores de aire son utilizados, estas deben cumplir con los requerimientos del método de prueba ASTM C231.

- Placa para enrasado: una placa rectangular llana de metal, de por lo menos 6 milímetros (¼ pulgadas) de espesor o una placa de acrílico de espesor de por lo menos 12 milímetros (½ pulgadas), con una longitud y anchura de por lo menos 50 milímetros (2 pulgadas) más que el diámetro del recipiente. Los bordes de la placa serán rectos y lisos dentro de una tolerancia de 2 milímetros (1/16 pulgadas).
- Mazo de goma: con una masa de 600 ±200 gramos (1,25 ±0,50 libras) para el uso con los moldes de 14 litros (0,5 pies cúbicos) o más pequeños, y un mazo con una masa de 1 000 ±200 gramos (2,25 ±0,50 libras) para usar con los moldes más grandes que 14 litros.

Tabla II. **Capacidad de recipiente para ensayo de peso unitario**

Tamaño máximo nominal del agregado grueso		Capacidad de recipiente	
Milímetros	Pulgadas	Metros cúbicos	Litros
25	1	0,0057	6
37,5	1 ½	0,0113	11
50	2	0,0142	14
75	3	0,0283	28
112	4 ½	0,0708	70
150	6	0,0991	100

Fuente: elaboración propia, basada en la Norma ASTM C 138.

- Muestra

Se obtiene la muestra de concreto fresco de acuerdo con la Norma ASTM C172.

- Procedimiento

- Establecida la selección del método de consolidación del concreto en el ensayo de revenimiento, a menos que el ensayo tenga especificaciones bajo las cuales se debe realizar. El método de consolidación puede ser de varillado y vibración interna. Se varilla concreto con un revenimiento mayor a 75 milímetros (3 pulgadas). Varillar o vibrar concreto con un revenimiento de 25 milímetros a 75 milímetros (1 a 3 pulgadas). Consolidar concretos con un revenimiento menor a 25 milímetros (1 pulgada) por vibración. Determinar la masa del recipiente de medición vacío.
- Colocar el concreto dentro del recipiente, en tres capas de aproximadamente igual volumen (compactación por varillado).
- Compactar cada capa penetrando 25 veces con la varilla en recipientes de 14 litros o menores y 50 veces para recipientes de 28 litros.
- Golpear firmemente de 10 a 15 veces los lados del recipiente con el mazo, cada una de las tres capas.
- Después de la consolidación se remueve el exceso de concreto de la superficie superior y se debe dar un acabado, suavemente con la placa plana de enrasado, teniendo cuidado de dejar el recipiente adecuadamente lleno y nivelado.
- Después de enrasar, limpiar todo el concreto del exterior del recipiente y determinar la masa del concreto del recipiente lleno.

- Calcular la masa neta (kilogramos o libras).
- Calcular la densidad del concreto (kilogramo/metro cúbico o libra/pie cúbico).

**2.6.4. Ensayo de contenido de aire (método de presión):
ASTM C231/C231M Standard Test Method For Air
Content Of Freshly Mixed Concrete By The Pressure
Method y COGUANOR NTG-41017h7**

A continuación se describe lo que dice la Norma ASTM C231.

- Alcance

Esta prueba determina la cantidad de aire que puede contener el concreto recién mezclado, excluyendo cualquier cantidad de aire que puedan contener las partículas de los agregados. Por esta razón este ensayo es aplicable para concretos con agregados relativamente densos y que requieran la determinación del factor de corrección del agregado.

- Equipo

- Medidor de aire: existen aparatos satisfactorios, de dos diseños básicos de operación, que trabajan con el principio de la ley de Boyle. Se hará referencia de medidores de tipo A y B.

- Medidor tipo A: la principal operación de este medidor de aire consiste en introducir agua hasta una determinada altura por encima de la muestra de concreto de volumen conocido y la aplicación de una determinada presión de aire

sobre el agua. La determinación consiste en la reducción en el volumen del aire en la muestra de concreto por la observación del nivel de agua más bajo.

- Medidor tipo B: la operación principal de este medidor consiste en igualar el volumen de aire y la presión conocida en una cámara con el volumen desconocido de aire de la muestra de concreto. Un medidor de aire que consiste en un recipiente de forma cilíndrica y una sección superior que lo cubre. El recipiente debe ser de metal u otro material no reactivo al cemento, debe tener un diámetro de 0,75 a 1,25 veces la altura y una capacidad por lo menos de 5,7 litros. La forma en que trabaja este medidor consiste en igualar un volumen conocido de aire a una presión conocida en una cámara de aire hermética con el volumen de aire desconocido de la muestra de hormigón. La aguja en el medidor de presión se calibra en términos de porcentajes de aire de presión en la cual se igualan ambas presiones.
- Varilla: debe ser redonda, de acero de 16 milímetros (5/8 pulgadas) de diámetro y no menor a 400 milímetros (16 pulgadas) de longitud, teniendo el extremo redondeado o semihemisférico con diámetro de 16 milímetros (5/8 pulgadas).
- Placa para remover exceso de hormigón: rectangular y plana de metal o al menos 6 milímetros (¼ pulgadas) de espesor, de vidrio o acrílico de al menos 12 milímetros (½ pulgadas) de espesor con una longitud y ancho de al menos 50 milímetros (2 pulgadas).
- Mazo: con cabeza de goma, de peso aproximadamente 600 ±200 gramos para usarse con recipientes de 14 litros o menores.

- Muestra

La muestra se obtendrá conforme al procedimiento indicado en la Norma ASTM C 172.

- Procedimiento

- Seleccionar una muestra representativa.
- Humedecer el interior del tazón y colocarlo en una superficie plana nivelada y firme.
- Llenar el recipiente con tres capas de igual volumen, sobrellenando ligeramente la última capa.
- Compactar cada capa con 25 penetraciones de la punta semihemisférica de la varilla, distribuyendo uniformemente las penetraciones en toda la sección.
- Compactar la capa inferior en todo su espesor, sin impactar en el fondo del recipiente con la varilla.
- Compactar la segunda y tercera capa penetrando 25 milímetros de la capa anterior.
- Golpear firmemente los lados del tazón de 10 a 15 veces con el mazo, después de compactar cada capa. Para evitar que las burbujas de aire queden atrapadas en el interior de la muestra.
- Enrasar el concreto utilizando la regla enrasadora apoyada sobre el borde superior del molde; y luego limpie el exceso de muestra del borde del recipiente.
- Limpiar y humedecer el interior de la cubierta antes de acoplarla con las mordazas a la base; las mordazas se sujetan dos a la vez y en cruz.
- Abrir ambas llaves de purga.

- Cerrar la válvula principal de aire entre la cámara y el tazón y abrir ambas llaves de purga a través de la cubierta.
 - Inyectar agua a través de una de las llaves de purga hasta que se salga por la otra.
 - Continuar inyectando agua por la llave de purga, mientras mueve y golpee el medidor para asegurar que todo el aire es expulsado.
 - Cerrar la válvula de escape de aire y bombear aire dentro de la cámara hasta que el manómetro esté en la línea de presión inicial.
 - Esperar unos segundos para que el aire comprimido llegue a una temperatura normal y se establezca la lectura de presión.
 - Ajustar el manómetro en la línea de presión inicial por bombeo o dejar escapar aire si es necesario dando ligeros golpes con la mano.
 - Cerrar ambas llaves de purga.
 - Abrir la válvula principal entre la cámara de aire y el tazón.
 - Dar pequeños golpes en los lados del tazón con el mazo.
 - Leer el porcentaje de aire, golpeando con la mano ligeramente el manómetro para estabilizar la lectura.
 - Cerrar la válvula de aire principal y abrir las llaves de purga para descargar la presión, antes de remover la cubierta.
 - Calcular correctamente el contenido de aire.
- Reporte

El contenido de aire se reporta con una aproximación de 0.1 por ciento.

2.6.5. Ensayo de asentamiento (prueba de Slump): ASTM C143/C143M-12 Standard Test Method For Slump Of Hydraulic Cement Concrete y COGUANOR NTG-41052

El propósito de la prueba de revenimiento es determinar la consistencia del concreto. Esta es una medida de la fluidez o movilidad relativa de la mezcla de concreto. El revenimiento no mide el contenido de agua o la trabajabilidad del concreto. Es verdad que el incremento o disminución en el contenido de agua causará el correspondiente aumento o disminución en el revenimiento del concreto, siempre y cuando todos los otros materiales y condiciones permanezcan constantes. Sin embargo, muchos factores pueden causar que el revenimiento del concreto cambie sin que cambie el contenido de agua. Además, el contenido de agua puede aumentar o disminuir sin sentirse un cambio aparente en el revenimiento del concreto. Ciertos factores como el cambio de las propiedades de los agregados o granulometría, proporciones de la mezcla, contenido de aire, temperatura del concreto o el uso de aditivos especiales pueden influir en el revenimiento del concreto, o inversamente, pueden resultar en un cambio en el requerimiento de contenido de agua para mantener un revenimiento dado.

A continuación se describe brevemente lo que dice la Norma ASTM C143.

- Alcance

El método cubre la determinación del asentamiento del concreto tanto en el laboratorio como en el campo. Consiste en colocar una muestra de concreto recién mezclado (se compacta por varillado) dentro de un molde en forma de cono truncado. El molde se levanta, y se deja que el concreto se desplome. Se

mide la distancia vertical al centro desplazado y se registra el valor del asentamiento del concreto.

Este ensayo es aplicable al concreto plástico preparado con agregado grueso de hasta 37,5 milímetros (1½ pulgadas) de tamaño máximo nominal. Si el agregado grueso es mayor de 37,5 milímetros el método de prueba se aplica a la fracción de concreto que pasa la malla de 37,5 milímetros (1½ pulgadas) de acuerdo con ASTM C172.

- Equipo
 - Molde: el molde será metálico, resistente al ataque de la pasta de cemento, con un espesor no menor que 1,5 milímetros (0,060 pulgadas), y si se forma con el proceso de repujado en ningún punto del molde el espesor será menor de 1,15 milímetros (0,045 pulgadas) de grosor. El molde deberá tener la forma de la superficie lateral de un cono truncado con una base de 200 milímetros (8 pulgadas) de diámetro y la parte superior de 100 milímetros (4 pulgadas) de diámetro, con una altura de 300 milímetros (12 pulgadas). Las dimensiones del diámetro y altura deberán tener una tolerancia de ± 3 milímetros (1/8 pulgadas) con respecto a las dimensiones especificadas. El interior del molde deberá ser relativamente liso y libre de cualquier protuberancia. El molde no deberá presentar abolladuras, deformaciones o restos de concreto en su interior.
 - Varilla: deberá ser una barra recta de acero de sección circular de 16 milímetros (5/8 pulgadas) de diámetro y aproximadamente 600 milímetros (24 pulgadas) de largo, con el extremo de

apisonamiento redondeado en forma semiesférica con un diámetro de 16 milímetros (5/8 pulgadas).

- Instrumento de medida: es una regla de metal rígida, la cual esta graduada con incrementos de 5 milímetros (0,25 pulgadas) o menor. El largo de la regla debe de ser por lo menos de 200 milímetros (12 pulgadas).

- Muestra

La obtención de la muestra se realizará de conformidad con la norma ASTM C172.

- Procedimiento

- Humedecer el molde y el piso o placa base, ejecutar sobre una superficie rígida no absorbente.
- Apoyar firmemente el molde sobre la base colocando y presionando con los dos pies los estribos del molde. Por ningún motivo debe moverse los pies durante el llenado del molde.
- Llenar el molde en tres capas de igual volumen, la primera capa a una profundidad de 70 milímetros ($2\frac{5}{8}$ pulgadas) la segunda hasta de 160 milímetros ($6\frac{1}{8}$ pulgadas) y la tercera hasta el borde superior del molde.
- Compactar cada capa en toda su profundidad con 25 penetraciones de la varilla, distribuyendo las penetraciones en toda la superficie de cada capa.
- Compactar la segunda y tercera capa penetrando la capa anterior 25 milímetros (1 pulgada) y varillar desde cerca del perímetro y

continuar progresivamente en forma espiral hacia el centro del molde.

- Cuando compacte la última capa, mantener un excedente de concreto sobre el molde antes de comenzar el varillado, si el concreto es insuficiente detener el varillado y colocar una cantidad representativa para mantener un exceso de concreto sobre el molde todo el tiempo.
 - Enrasar el concreto rodando la varilla de compactación sobre el borde superior del molde.
 - Continuar manteniendo el molde firme y remover el concreto alrededor del área circundante de la base del molde para prevenir la interferencia en el momento del asentamiento del concreto.
 - Levantar el molde por encima de 300 milímetros (12 pulgadas) de un solo movimiento sin giros. En un tiempo de 5 ± 2 segundos.
 - Medir con una precisión de 5 milímetros ($\frac{1}{4}$ pulgadas) el revenimiento, desde la parte superior del molde hasta el centro desplazado de la superficie original del espécimen. Si al levantar el cono se produce una falla por corte, es necesario descartar la prueba y realizar el ensayo con una nueva porción de mezcla, si la falla se repite, es posible que el concreto no tenga la plasticidad necesaria o sea cohesivo para aplicar este ensayo de revenimiento.
 - Ejecute la prueba, desde su inicio hasta el final sin interrupciones en no más de 2,5 minutos.
- Reporte

Anote el asentamiento en pulgadas (milímetros) con una aproximación de 5 milímetros ($\frac{1}{4}$ pulgadas).

- Consideraciones generales
 - Si se observa una clara caída o desmoronamiento de un lado o una parte de la masa del concreto después de levantar el molde (cono), se debe descartar la prueba y hacer una nueva con otra parte de la muestra.
 - La variación de los moldes alternativos es de 6 milímetros máximo.
 - El revenimiento del concreto disminuye con el tiempo y las altas temperaturas.
 - Tamaño máximo agregado: 37,5 milímetros (1 ½ pulgadas).
 - Tamizado en húmedo: de requerirse en tamiz de 37,5 milímetros (1 ½ pulgadas).
 - Número de capas: 3
 - Tiempos: 2,5 minutos para realizar todo el ensayo y 5 ±2 segundos para levantar el molde.
 - Compactación: 25 inserciones por capa con una varilla de 600 milímetros de longitud y 16 milímetros de diámetro.

2.6.6. Ensayo a compresión: ASTM C39/C39M - 12a Standard Test Method For Compressive Strength Of Cylindrical Concrete Specimens y COGUANOR NTG-41017

Esta Norma cubre la determinación del esfuerzo de compresión en especímenes cilíndricos, sean estos moldeados, o núcleos obtenidos por extracción. El esfuerzo a la compresión del espécimen es calculado dividiendo la máxima carga obtenida durante el ensayo por el área de la cara axial del espécimen. Los resultados a la compresión obtenidos pueden depender de forma y el tamaño del espécimen, la pasta del cemento, los procedimientos de

mezcla, los métodos de muestreo, fabricación, la edad y las condiciones de humedad durante el curado.

- Equipo
 - Máquina de ensayo: esta máquina de ensayo deberá tener la suficiente capacidad para abastecer el índice de cargas solicitadas. La calibración de la máquina se debe verificar de acuerdo a la Norma ASTM E4 y en las siguientes condiciones:
 - Se debe calibrar la máquina, por lo menos cada 13 meses
 - En la instalación original o relocalización de la máquina
 - Si se tiene duda de su precisión o exactitud

La máquina deberá ser operada con energía y será capaz de aplicar una carga continua durante todo el proceso de ensayo. El porcentaje de error permitido para máquinas de ensayo no debe exceder el $\pm 1,0$ por ciento de la carga indicada.

- Equipo adicional

Está compuesto de los siguientes materiales:

- Escuadras metálicas: deben ser como mínimo de 30 centímetros de longitud, para chequear la perpendicularidad.
- Equipo de láminas graduadas: el cual está provisto de láminas de espesor determinado que sirven para chequear

la planeidad y las depresiones en las caras del espécimen de concreto.

- Flexómetro: dispositivo para medir deflexiones.
- Tornillo micrométrico: se utiliza para medir el diámetro del cilindro, con una aproximación de 0,25 milímetros (0,01 pulgadas).

- Muestra

Las probetas cilíndricas de concreto deberán cumplir con lo siguiente:

- Medir dos diámetros en ángulo recto en la parte media de la altura del espécimen, con una aproximación de 0,25 milímetros (0,01 pulgadas).

Nota: si un diámetro difiere del otro en más del 2 por ciento los especímenes no serán probados.

- Chequear que el eje axial de perpendicularidad y los extremos planos del espécimen, no se alejen más de 0,5 grados (1 milímetro en 100 milímetros).
- Los especímenes que no tengan sus extremos planos dentro de 0,05 milímetros (0,002 pulgadas) se pulirán, esmerilarán o capearán según la Norma ASTM C617 o ASTM C1231.
- La longitud debe ser medida con precisión de 1 milímetro. En tres lugares espaciados alrededor de la circunferencia. Cuando la determinación de la densidad no es requerida y cuando la relación de la longitud con el radio es menor que 1,8 o mayor que 2,2, se debe medir la longitud del espécimen con una precisión de 0,05D.

- Procedimiento
 - Empezar el ensayo tan pronto como el espécimen ha sido retirado de la cámara de curado y conservar sus condiciones de humedad.

Tabla III. **Tolerancia permisible de tiempo de ensayo**

Edad	Tolerancia
24h00	± 0,5 h ó 2,1 %
3 días	2 h ó 2,8 %
7 días	6 h ó 3,6 %
28 días	20 h ó 3,0 %
90 días	2 días ó 2,2 %

Fuente: Norma ASTM C 39.

- Limpiar la superficie de los soportes superior e inferior de la prensa.
- Colocar el espécimen en el bloque de soporte inferior.
- Alinear los ejes del espécimen con el centro de bloque de empuje superior (soporte con cabeza movable).
- Verificar que el indicador de carga se encuentre en cero.
- Mover el bloque de soporte inferior lentamente para poner el espécimen en contacto con los platos de compresión de la prensa.
- Aplicar carga continuamente (sin choque) con un rango de velocidad de $0,25 \pm 0,05$ megapascal/segundo (35 ± 7 libra/pulgada cuadrada/segundo). Para máquinas de tornillo la proporción de carga dependerá del tamaño del espécimen de prueba, módulo de elasticidad del concreto y de la dureza de la máquina de comprobación.

- Durante el ensayo ajuste la válvula de inyección de aceite suavemente, con el objeto de mantener constante la velocidad de aplicación de la carga durante la última mitad de la fase de carga.
- Aplicar la carga hasta que el espécimen falle.
- Registrar la máxima carga soportada por el espécimen. Para máquinas con indicadores de carga automáticos, no detener la aplicación de la carga hasta que disminuya más del 95 por ciento de la máxima carga.
- Anotar el tipo de fractura y la apariencia del concreto.
- Calcular el esfuerzo de compresión con una aproximación de 0,1 megapascal (10 libra/pulgada cuadrada).
- Si la relación L/D es 1,75 o menor, el valor calculado de esfuerzo se debe multiplicar por el factor de corrección determinado en la tabla IV.
- Registrar los datos.

Nota: el promedio de la resistencia de cilindros en condiciones de campo de la misma muestra no debe variar en más de 8 por ciento para dos resultados y en más de 9,5 por ciento para tres resultados.

Tabla IV. **Factor de corrección según la relación L/D**

L/D	Factor de corrección
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

Fuente: elaboración propia, basada en la Norma ASTM C 39.

Tabla V. **Rango aceptable en fuerza individual de cilindros**

	Coeficiente de variación	Rango aceptable en fuerza individual de cilindros	
		2 cilindros	3 cilindros
15x30 centímetros (6x12 pulgadas)			
Condiciones de laboratorio	2,40 %	6,60 %	7,80 %
Condiciones de campo	2,90 %	8,00 %	9,50 %
10x20 centímetros (4x8 pulgadas) Condiciones de laboratorio	3,20 %	9 %	10,60 %

Fuente: elaboración propia, basada en la Norma ASTM C 39.

Tabla VI. **Diámetro máximo de la cara móvil de la máquina**

Diámetro de prueba de especímenes en milímetros (pulgada)	Diámetro máximo de la cara móvil de la máquina en milímetros (pulgada)
50 (2)	105 (4)
75 (3)	130 (5)
100 (4)	165 (6.5)
150 (6)	255 (10)
200 (8)	280 (11)

Fuente: elaboración propia, basada en la Norma ASTM C 39.

- Cálculos:
 - Calcular la resistencia a la compresión.

$$R = \frac{P}{A}$$

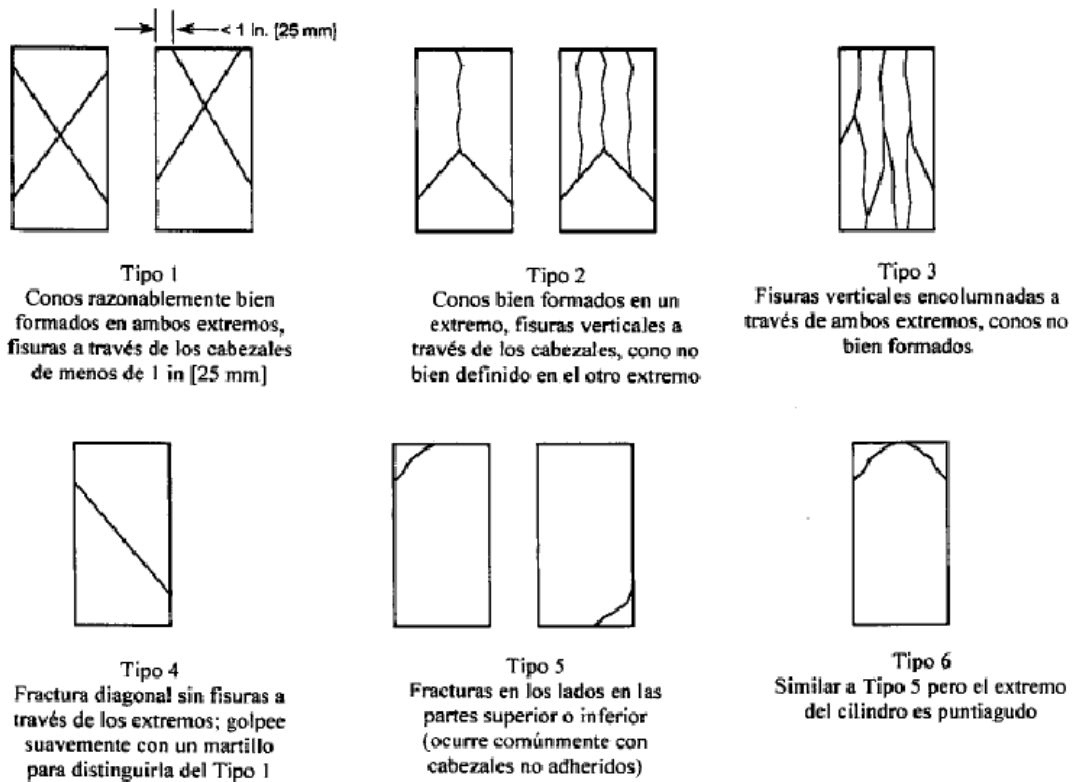
Donde:

R= esfuerzo a la compresión del espécimen (megapascal).

P= máxima carga aplicada (kilonewton).

A= área de la cara axial del espécimen (milímetros cuadrados).

Figura 8. Diagrama esquemático de los patrones típicos de fractura



Fuente: Norma COGUANOR NTG 41017h1. p.12

2.6.7. ASTM C-617/C617M-12 Standard Practice For Capping Cylindrical Concrete Specimens y COGUANOR NTG-41064

Esta práctica cubre el equipo, materiales y procedimientos para cabecear los cilindros moldeados de concreto fresco con pasta de cemento y los cilindros de concreto endurecidos y núcleos perforados con una pasta de yeso de alta resistencia o con un mortero de azufre, para proveer superficies planas sobre los extremos de los cilindros moldeados de concreto fresco, de los cilindros endurecidos, o de los núcleos perforados de concreto, cuando no cumplan con los requisitos de planicidad y perpendicularidad de las superficies de los extremos que se indican en las normas aplicables.

- Equipo para el cabeceado
 - Platos para el cabeceo: los cabeceos de pasta de cemento y de pasta de yeso de alta resistencia, deben ser elaboradas contra un plato de vidrio de al menos 6 milímetros (1/4 pulgadas) de espesor, un plato de metal maquinado de al menos 11 milímetros (0,45 pulgadas) de espesor, o un plato pulido de granito o diabasa de al menos 75 milímetros (3 pulgadas) de espesor, los cabeceos de mortero de azufre se deben elaborar contra platos similares de metal o piedra, excepto que el área de la presión que recibe el azufre fundido no sea más profunda que 12 milímetros (1/2 pulgadas). En todos los casos, los platos deben ser de al menos 25 milímetros (1 pulgada) más grandes en diámetro que de los especímenes de ensayo y las superficies de trabajo no se deben desviar del plano por más de 0,05 milímetros (0,002 pulgadas) en 150 milímetros (6 pulgadas). La superficie, cuando está nueva,

- debe estar libre de agujeros, surcos y hendiduras más allá de aquellas causadas por la operación de acabado. Los platos metálicos que han estado en uso deben estar libres de agujeros, surcos y hendiduras más profundas que 0,25 milímetros (0,010 pulgadas) o con área superficial mayor a 32 milímetros cuadrados.
- Dispositivos de alineación: tales como barras, guías o niveles, se deben utilizar en conjunto con platos para cabeceo, para asegurar que ningún cabeceo desvíe su perpendicularidad con el eje del espécimen cilíndrico por más de 0,5 grados (aproximadamente equivalente a 3,2 milímetros en 305 milímetros). Se aplica el mismo requisito a la relación entre ejes del dispositivo de alineación y la superficie del plato para coronar cuando se utilizan barras guías. Además, la ubicación de cada barra con respecto a su plato debe ser tal que ninguna capa esté descentrada con el espécimen de ensayo por más de 2 milímetros (1/16 pulgadas).
 - Recipiente de fundición de morteros de azufre: los recipientes utilizados para derretir los morteros de azufre deben estar equipados con controles automáticos de temperatura y deben estar hechos de metal o cubiertos con un material que no reaccione con azufre fundido.
- Equipo adicional
 - Escuadras metálicas: deben ser como mínimo de 30 centímetros de longitud, para chequear la perpendicularidad.
 - Equipo de láminas graduadas: debe estar provisto de láminas de espesor determinado que sirven para chequear la planeidad y las depresiones en las caras del espécimen de concreto.

- Muestra:
 - Condiciones del espécimen: si se coloca una escuadra perpendicular al eje del espécimen en la superficie que será cabeceada, la distancia de cualquier punto con respecto al punto más alto de la cara del espécimen no debe exceder en más de 3 milímetros (1/8 pulgadas) en la vertical. Si la superficie excede este límite el espécimen deberá ser cortado, pulido o esmerilado previo al cabeceado.
 - Mortero de azufre: preparados por el laboratorio o patentados, se permiten si se dejan endurecer un mínimo de 2 horas antes de ensayar concreto con resistencia menos de 35 megapascales (5 000 libra/pulgada cuadrada). Para resistencias de concreto iguales o mayores de 35 megapascales (5 000 libra/pulgada cuadrada), se debe dejar endurecer al menos 16 horas antes de ensayar.

- Procedimiento
 - Preparar el mortero de azufre por calentamiento a 130 grados Celsius (265 grados Fahrenheit) aproximadamente. Chequear la temperatura del mortero de azufre cada hora. Se debe vaciar el recipiente y volverlo a llenar con material fresco, a intervalos, para asegurar que el material anterior en el recipiente no se haya utilizado más de cinco veces. Cuando se cabecean cilindros de concreto con resistencias mayores a 35 megapascales (5 000 libra/pulgada cuadrada) no se permite reutilizar un compuesto de material recuperado de operaciones para cabecear o de cabeceado antiguos.

- Comprobar que el plato de cabeceo se encuentre caliente.
- Verificar que el plato de cabeceo se encuentre limpio y libre de rugosidades.
- Aceitar ligeramente el plato de cabeceo.
- Verificar que la cara del espécimen esté libre de grasas, aceites y que no contenga exceso de humedad.
- Formar la capa de cabeceo en el cilindro. Se deben reemplazar las capas que posean espacios mayores a 6 milímetros (1/4 pulgadas).
- Chequear que la capa quede correctamente pegada al espécimen y no contenga espacios vacíos. Para el chequeo se puede utilizar una moneda, para golpear la cara del espécimen que ha sido cabeceada, en caso de producirse un sonido hueco, la capa deberá ser reemplazada.
- Verificar las condiciones de planeidad de la capa de azufre.
- Proteger el espécimen cabeceado de la rápida evaporación, y las pérdidas de humedad.

Tabla VII. **Resistencia a la compresión y espesor máximo de los materiales para cabecear**

Resistencia a compresión del cilindro MPa (psi)	Resistencia mínima del material para cabeceo	Máximo espesor promedio del cabeceo	Máximo espesor de cualquier parte del cabeceo
3,5 MPa a 50 MPa (500 psi a 7 000 psi)	35 MPa (5 000 psi) o la resistencia del cilindro la que sea mayor	6 milímetros (1/4 pulgadas)	8 milímetros (5/16 pulgadas)
Mayor que 50 MPa (7 000 psi)	Resistencia a compresión no menor que la resistencia de los cilindros	3 milímetros (1/8 pulgadas)	5 milímetros (3/16 pulgadas)

Fuente: Norma COGUANOR NTG-41064. p. 7

3. MARCO EXPERIMENTAL

En esta sección del trabajo de graduación se describen brevemente las características de la muestra evaluada; tanto geográficas, que ofrecen información acerca del lugar de origen, como físicas que definen el tipo de roca, tamaño de grano y color. Posteriormente se indica la metodología de trabajo apoyada por las normas internacionales, ASTM, y normas locales, COGUANOR, utilizadas para los diferentes tipos de ensayo aplicados a las mezclas de evaluación, que fundamentan los resultados obtenidos.

También se caracterizan los materiales utilizados para realizar las mezclas ensayadas, de la misma forma se presenta el equipo utilizado. Luego se describen las mezclas utilizadas para el estudio de esta investigación y por último se muestran los resultados obtenidos.

3.1. Características de la adición

Parte condicionante de la reactividad mecánica y de la disponibilidad del material puzolánico, son las características físicas, así como su ubicación geográfica.

Toda la información física y geográfica de la muestra utilizada para este trabajo, es una recopilación de la información presentada en los trabajos de graduación: *Geología y caracterización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala*, *Caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala* y *Determinación del índice de reactividad mecánica de 18 muestras de materiales volcánicos de*

Guatemala, de los ingenieros civiles Víctor Rafael Rosales Rivas, Luis Alfredo Ochoa Marroquín y Pablo José Bautista Gallardo, respectivamente, trabajos en los cuales podrá avocarse a consultar para obtener una información más detallada.

3.1.1. Características geográficas

La muestra del material mineral 2T 1,5 posee las siguientes características geográficas:

- Nombre del banco: Tecpán
- Ubicación: km. 86,3 Carretera CA-1
- ID muestra: 2T 1,5
- Coordenadas:
 - Latitud 14°45'23,7 pulgadas N
 - Longitud 90°58'32,8 pulgadas O
- Altura: 2 347 msnm
- Departamento: Chimaltenango

3.1.2. Características físicas

La muestra mineral 2T 1,5 presenta las siguientes características físicas:

3.1.2.1. Granulometría del material

- Porcentaje de humedad: 23,73
- Porcentaje que pasa tamiz ¼ pulgadas: 86,35

- Porcentaje que pasa tamiz No. 30: 71,00
- Porcentaje que pasa tamiz No. 200: 23,00
- Porcentaje que pasa tamiz No. 325 (3h): 99,64

Para los materiales volcánicos existen características que pueden identificarse a simple vista como el tipo de roca y el color, pero hay otras que es necesario la implementación de ensayos de laboratorio; a continuación se presentan estas características que se consideran importantes y que tienen relación de alguna manera con el desarrollo de la resistencia.

3.1.2.2. Características físicas naturales

- Densidad: 2,38 g/cc
- S.E (finura Blaine): 3 619 cm²/g
- Porcentaje FS: 20,75
- Pérdida de ignición: 2,75
- Color: beige
- Tipo de roca: pómez

Según estudios, a medida que los granos del material son más pequeños (aumento de fineza de Blaine), adquiere una mayor reactividad, hasta llegar a un valor máximo, esto quiere decir que el material no tendrá mayor reactividad si se continúa con el proceso de molienda.

La prueba de pérdida de ignición determina el contenido orgánico en la muestra en su estado natural, mientras menos sea la cantidad de impurezas que contenga la muestra, mayor será la cantidad de material reactivo, característica que influye en el aumento de la resistencia.

En el trabajo de graduación realizado por el ingeniero civil Pablo José Bautista Gallardo: *Determinación del índice de reactividad mecánica de 18 muestras de materiales volcánicos de Guatemala*, Bautista concluye que el material volcánico 2T 1.5 posee un grado de reactividad alto, comprobado ya que cumple en amplio porcentaje con los parámetros establecidos para identificar el nivel de reactividad mecánica.

3.2. Metodología de trabajo

A continuación se describe la metodología utilizada para la elaboración de este trabajo, se utilizan las Normas ASTM y sus equivalentes en la norma nacional COGUANOR. Se ilustra mediante fotografías el proceso de la parte experimental del trabajo.

3.2.1. Obtención de la adición 2T 1.5

Se obtuvo la adición, 2T 1,5, con base en los resultados del Proyecto de Investigación FODECYT No. 023-10 titulado: Determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez muestras de la franja volcánica de Guatemala.

3.2.2. Preparación de la adición 2T 1.5

Se procesó la adición, 2T 1,5 de acuerdo al procedimiento indicado en los trabajos de graduación titulados: *Caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala*, por el ingeniero Luis Alfredo Ochoa Marroquín y *Geología y caracterización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala*, por el

ingeniero Víctor Rafael Rosales Rivas, para la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el 2012.

3.2.3. Diseño de mezcla

Se diseñó la mezcla de control que contiene en su totalidad cemento Portland, como se muestra en la tabla VIII, siendo esta la utilizada como base para realizar las mezclas a evaluar con la adición mineral 2T 1,5.

Tabla VIII. **Diseño de mezcla utilizado**

Mezcla utilizada	
Cantidad	Material
430 kg	Cemento CFB (Cementos Progreso)
924 kg	Agregado de 3/8 pulgadas curva No. 8
945 kg	Arena triturada y base 0-1/4 pulgadas
	Relación a/c =0,45
7 310 ml	Aditivo Megaflo, reductor de agua de alto rango, tipo F

Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Mezclas con porcentajes de sustitución de adición 2T 1.5 por cemento Portland

Se definió porcentajes a utilizar de adición mineral 2T 1,5 para sustituir cemento Portland. A continuación se enumeran las mezclas que se trabajaron:

- Mezcla control.
- Mezcla con sustitución del 20 por ciento del cemento Portland por adición mineral 2T 1,5.
- Mezcla con sustitución del 40 por ciento del cemento Portland por adición mineral 2T 1,5.
- Mezcla con sustitución del 60 por ciento del cemento Portland por adición mineral 2T 1,5.
- Mezcla con sustitución del 80 por ciento del cemento Portland por adición mineral 2T 1,5.
- Mezcla con el 20 por ciento de adición 2T 1,5, como agregado a la mezcla de control.

Se definieron diferentes edades para realizar el ensayo a compresión en concreto endurecido:

- 7 días
- 28 días
- 56 días
- 112 días

3.2.5. Elaboración de testigos

El mezclado es muy importante debido a que una buena consistencia de la mezcla indica que la cantidad de los materiales pesados son los correctos y da un parámetro inicial de una buena mezcla que puede desarrollar una adecuada resistencia, que durante su proceso de desarrollo dependerá de otros factores.

Figura 9. **Mezclado de materiales**



Fuente: PreCon, planta No. 1.

Se procedió a elaborar 3 probetas por cada tipo de mezcla y para cada edad.

Las probetas se elaboraron de acuerdo al procedimiento indicado en la designación ASTM C-31/C31M *Standard Practice For Making And Curing Concrete Test Specimens In The Field* y Norma COGUANOR NTG-41061. Dichas normas tienen por objeto cubrir los procedimientos para la elaboración y curado de cilindros para muestras representativas de concreto fresco.

Figura 10. **Elaboración de testigos de concreto para ensayos**



Fuente: PreCon, planta No. 1.

3.2.6. Pruebas de laboratorio a concreto fresco

Las pruebas realizadas en las mezclas de concreto en estado fresco, se detallan a continuación, mostrando con fotografías su proceso.

3.2.6.1. Peso unitario

Para realizar el ensayo de peso unitario de concreto fresco, se basó en lo que dicta la Norma ASTM C138 y la Norma COGUANOR NTG-41017h5, descrita en el capítulo anterior.

Figura 11. **Preparación para ensayo de peso unitario**



Fuente: PreCon, planta No. 1.

3.2.6.2. **Prueba de contenido de aire (método de presión)**

Este ensayo se realizó de acuerdo a la Norma ASTM C 231 *Standard Test Method For Air Content Of Freshly Mixed Concrete By The Pressure Method* y Norma COGUANOR NTG-41017h7.

Figura 12. **Elaboración de la prueba de contenido de aire, parte 1**



Fuente: PreCon, planta No. 1.

Figura 13. **Elaboración de la prueba de contenido de aire, parte 2**



Fuente: PreCon, planta No. 1.

3.2.6.3. Asentamiento (prueba de Slump)

Para realizar el ensayo de revenimiento, se basó en lo que dice la Norma ASTM C143 y la Norma COGUANOR NTG-41052, explicada en el capítulo anterior.

Figura 14. **Prueba de asentamiento**



Fuente: PreCon, planta No. 1.

3.2.6.4. **Temperatura**

Para realizar el ensayo de temperatura del concreto fresco, se basó en lo que dicta la Norma ASTM C1064 y la Norma COGUANOR NTG-41053, descrita en el capítulo 2 de este trabajo.

Figura 15. **Ensayo de temperatura a concreto fresco**



Fuente: PreCon, planta No. 1.

3.2.7. Curado de cilindros de concreto

Se siguió la Normativa ASTM C31/C31M y Norma COGUANOR NTG-41061.

Figura 16. Curado de cilindros



Fuente: PreCon, laboratorio en Planta No. 1.

3.2.8. Prueba de ensayo a compresión a concreto endurecido

En el capítulo 2 se describe lo que la Norma ASTM C39/C39M-12a establece para la realización del ensayo a compresión.

Figura 17. Ensayo a compresión de cilindros de concreto



Fuente: PreCon, planta No. 1, laboratorio de control de calidad.

3.3. Materiales y equipo

Los materiales y el equipo utilizado para la elaboración de las mezclas de concreto, fueron proporcionados por una empresa especializada en sistemas industrializados de productos de concreto y sistemas estructurales y pre esforzados, se detallan a continuación.

3.3.1. Materiales

- Cemento CFB (Cementos Progreso)

Es un cemento Portland de alta resistencia inicial (ARI). Es de excelente calidad para fabricar bloques de concreto, tubos y otros elementos prefabricados de concreto (postes, viguetas, paneles, etc.). También es ideal para edificar estructuras con mayores resistencias mecánicas, como en edificios altos y puentes, o cuando se requiera un aumento de resistencia a edades tempranas.

Cumple con la Normativa ASTM C1157 / C1157M *Standard Performance Specification For Hydraulic Cement* y la norma correspondiente en Guatemala COGUANOR NTG-41095.

Figura 18. **Cemento utilizado para hacer las mezclas de concreto**



Fuente: PreCon, planta No. 1, laboratorio de control de calidad.

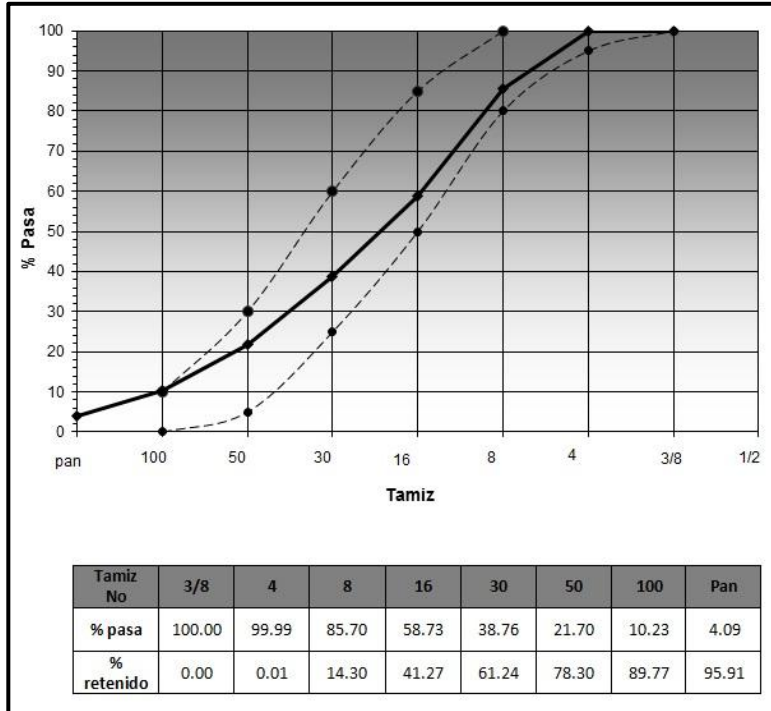
- Agregado fino

La arena utilizada para realizar las mezclas de concreto evaluadas en la investigación está analizada bajo lo que Norma la ASTM C33/C33M - 13 *Standard Specification For Concrete Aggregates*, define las exigencias para la clasificación y calidad para el agregado grueso y fino en las mezclas de concreto.

El análisis físico realizado en el laboratorio de Precon, presenta las siguientes características físicas:

- Peso específico: 2,67
- Peso unitario suelto: 1 166 kg/m³
- Peso unitario compactado: 1 397 kg/m³
- Porcentaje de vacíos: 0
- Porcentaje de absorción: 0,8
- Contenido de materia orgánica: 0
- Pasa tamíz 200: 4,08
- Humedad: 1,00
- Módulo de finura: 2,85

Figura 19. Límites ASTM C33, agregado fino



Fuente: PreCon.

Figura 20. Agregado fino, arena triturada



Fuente: PreCon, planta No. 1.

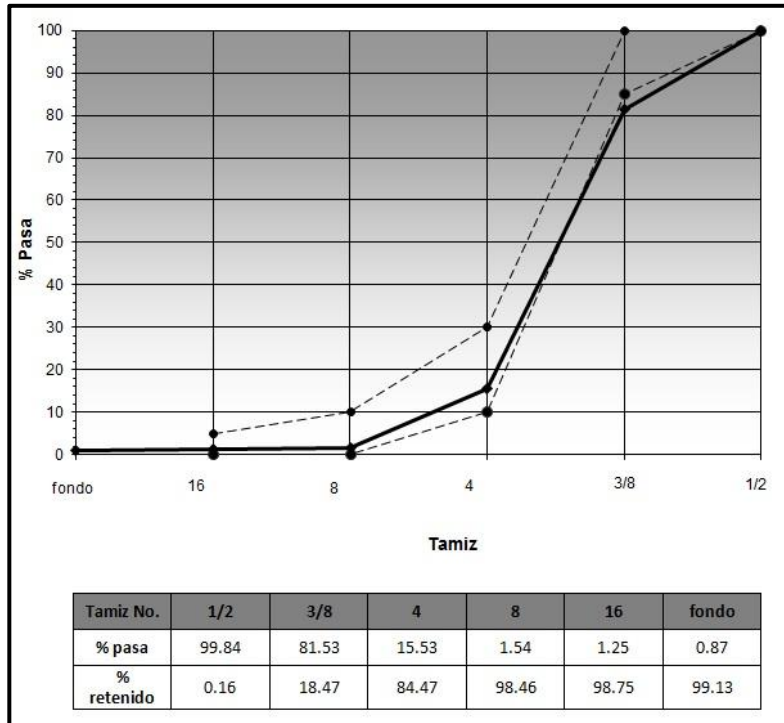
- Agregado grueso

El agregado grueso utilizado en las mezclas de concreto evaluadas en la investigación está analizado bajo lo que norma la ASTM C33 / C33M - 13 *Standard Specification For Concrete Aggregates*, define las exigencias para la clasificación y calidad para el agregado grueso y fino en las mezclas de concreto.

El análisis físico realizado en el laboratorio de Precon, presenta las siguientes características físicas:

- Peso específico: 2,70
- Peso unitario suelto: 1 439 kg/m³
- Peso unitario compactado: 1 569 kg/m³
- Porcentaje de vacíos: 0
- Porcentaje de absorción: 0,8
- Contenido de materia orgánica: 0
- Porcentaje de abrasión: 19,50
- Porcentaje que pasa tamiz 200: 0,87
- Porcentaje de Humedad: 0,50
- Módulo de finura: 6,00

Figura 21. Límites ASTM C33, agregado grueso



Fuente: PreCon.

Figura 22. Agregado grueso, piedrín 3/8



Fuente: PreCon, planta No. 1.

- Aditivo MEGAFLOW, reductor de agua de alto rango tipo F

Este tipo de aditivo es una clase especial de aditivo reductor de agua. Frecuentemente denominado superplastificante, los reductores de agua de alto rango reducen el contenido de agua de un concreto dado entre el 12 y el 25 por ciento. Estos aditivos están cubiertos por las especificaciones de la ASTM C494.

- Adición mineral 2T 1,5

Las características de la adición mineral utilizada para realizar las mezclas de concreto para el estudio de esta investigación, están descritas al principio de este capítulo.

Figura 23. **Adición mineral 2T 1,5 utilizada para realizar las mezclas evaluadas, en el yacimiento natural**



Fuente: km 86.3 carretera CA-1.

3.3.2. Equipo

- Cinta métrica metálica

La cinta métrica fue utilizada para medir el diámetro de los cilindros de concreto, ya que es especialmente para realizar éste procedimiento.

Figura 24. **Cinta métrica metálica**

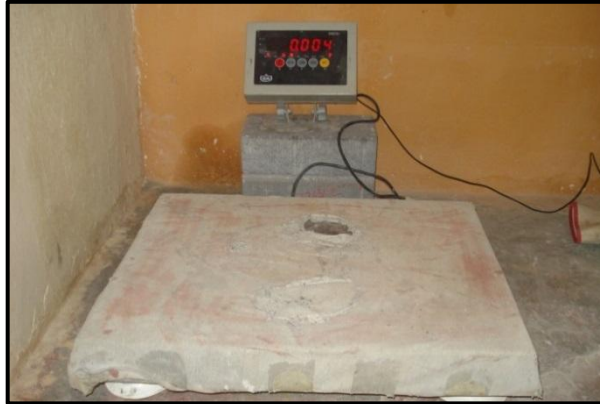


Fuente: <http://medicion.mx/tienda/p3-pi-tape-spring-steel-24-36/>. Consulta: 09 de junio de 2014

- Balanza digital

La balanza fue utilizada para pesar las diferentes cantidades que se necesitaban de material para realizar las mezclas de concreto, también se utilizó para pesar los cilindros de concreto.

Figura 25. **Balanza digital**



Fuente: PreCon, planta No. 1, laboratorio de control de calidad.

- Mezcladora para concreto

La mezcladora utilizada para hacer las mezclas de concreto es marca Menegotti con capacidad de 1½ sacos, y tiene las siguientes especificaciones:

- Tambor de metal, de fácil limpieza, que trabaja por medio de transmisión embalada con poleas.
- Descargador manual, basculante por ambos lados.
- Capacidad real del cuchumbo: 400 litros.
- Calibre del acero: fondo 10, laterales 12.
- Gabinete abatible 14.
- Producción aproximada por hora: 4,05 metros cúbicos.
- Revoluciones del tambor lleno por minuto: 20 revoluciones.
- Montado en bastidor con llantas neumáticas ring 13 y remolque.
- Peso operacional: 750 libras.
- Motor gasolina Robin Subaru 4 tiempos/ 6 hp o 9 hp 100 por ciento Japonés.

- Medidas de la Mezcladora
 - Largo: 2,10 metros
 - Alto: 1,60 metros
 - Ancho: 1,40 metros

Figura 26. **Mezcladora para concreto**



Fuente: PreCon, planta No. 1.

- **Moldes plásticos para testigos**

Los moldes plásticos son marca Forney, sus dimensiones son de 15,24x30,48 centímetros (6x12 pulgadas), no tienen tapa. Estos moldes cumplen con las siguientes normas:

- ASTM C31, C39, C192 y C470
- AASHTO M205, T22, T23 y T126

Figura 27. **Moldes para cilindros de concreto**



Fuente: PreCon, planta No. 1.

- Recipiente cilíndrico de acero, varilla de acero, placa de acero, mazo de goma

El recipiente se utilizó para realizar el ensayo de peso unitario, donde se colocó la muestra a pesar, también nos sirvió para la prueba de contenido de aire, la varilla nos sirvió para apisonar la mezcla, con el mazo de goma se golpeó a los lados del recipiente para eliminar cualquier burbuja de aire en la mezcla, y la placa de acero se utilizó para eliminar el exceso de mezcla en la parte superior del recipiente y hacer un enrasado, (ver figura 29).

- Equipo para prueba de contenido de aire

Este consta de dos partes principales: la base (cámara de medición) y el conjunto de la cubierta.

El conjunto de la cubierta incorpora un manómetro, la palanca de liberación de aire, válvula de purga de aire, bomba de aire y válvulas y grifos se utilizan para realizar las dos pruebas y calibraciones de acuerdo con la Norma ASTM C231.

El equipo cuenta con las siguientes especificaciones:

- Marca: Forney,
- Modelo: LA - 0316
- Tipo de medidor: tipo B, utiliza el principio de la ley de Boyle
- Capacidad de la base: 0,01 metros cúbicos (1/4 pies cúbicos)
- Cumple con la Norma ASTM C231

Figura 28. **Equipo para ensayo de contenido de aire**



Fuente: PreCon, planta No. 1.

- Equipo para prueba de asentamiento

Molde con forma de cono truncado, debe ser metálico. También se cuenta con una varilla de acero y una cinta métrica para medir en asentamiento.

Figura 29. **Equipo para prueba de asentamiento**



Fuente: PreCon, planta No. 1.

- Máquina para ensayo a compresión

La máquina de compresión utilizada para evaluar los testigos de concreto, es marca Forney, serie F, y posee las siguientes características:

- Los marcos de carga exceden las recomendaciones indicadas en ACI 363R.
- Incluye puertas de material Lexan, que proporcionan seguridad al operador y el ensayo puede observarse sin problema.
- Válvula de seguridad de alta presión.
- Platina superior con diámetro de 150 milímetros / 6 pulgadas
- La capacidad del motor/bomba es de $\frac{3}{4}$ caballos de fuerza a 110 o 220 VAC.
- Unidad digital *Test pilot*.

Figura 30. **Máquina de compresión**



Fuente: PreCon, planta No. 1, laboratorio de control de calidad.

3.4. Resultados

Se realizó un análisis estadístico, fundamentalmente utilizando dos tipos de parámetros estadísticos: uno que se refiere a la tendencia central (media aritmética) y el otro a la dispersión del conjunto de los datos que se analizan (desviación estándar y coeficiente de variación).

3.4.1. Resultados de pruebas a concreto fresco

Los resultados que se presentan a continuación, son la recopilación de información obtenida durante la elaboración de mezclas y ensayos realizados a estas mezclas en estado fresco.

3.4.1.1. Resultados de ensayo de asentamiento

Los valores de asentamiento en las mezclas utilizadas para realizar los cilindros para la evaluación en esta investigación, aplicando las indicaciones de la Norma ASTM C143 / C143M-12 *Standard Test Method For Slump Of Hydraulic Cement Concrete*, son los mostrados en la tabla IX.

Tabla IX. Ensayo de asentamiento

Mezcla	Asentamiento (pulgadas)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Control	7	± 0,06	0,86 %
2T 20%	7	± 0,21	3,00 %
2T 40%	5,5	± 0,54	2,36 %
2T 60%	5,5	± 0,06	1,09 %
2T 80%	7	± 0,86	0,56 %
2T C+20%	7,5	± 0,80	0,80 %

Fuente: elaboración propia.

3.4.1.2. Resultados de ensayo de temperatura

La tabla X muestra los resultados obtenidos en el ensayo de temperatura realizado a las mezclas de concreto, siguiendo lo indicado en la Norma ASTM C1064 / C1064M-12 *Standard Test Method For Temperature Of Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete*.

Tabla X. **Ensayo de temperatura**

Mezcla	Temperatura (grados Celsius)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Control	25,3	± 0,13	0,51 %
2T 20%	23,2	± 0,06	0,26 %
2T 40%	23	± 0,06	0,26 %
2T 60%	23	± 0,06	0,26 %
2T 80%	22	± 0,00	0,00 %
2T C+20%	21	± 0,1	0,47 %

Fuente: elaboración propia.

3.4.1.3. Resultados de ensayo de peso unitario

Los resultados mostrados en la tabla XI son los correspondientes al ensayo de peso unitario en las mezclas a evaluar, se realizó siguiendo lo indicado en la Norma ASTM C138 / C138M-13a *Standard Test Method For Density (Unit Weight), Yield And Air Content (Gravimetric) Of Concrete*.

Tabla XI. **Ensayo de peso unitario**

Mezcla	Peso unitario (kilogramos/metros cúbicos)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Control	2 325	± 0,58	0,02 %
2T 20%	2 316	± 0,58	0,03 %
2T 40%	2 294	± 0,00	0,00 %
2T 60%	2 272	± 0,58	0,03 %
2T 80%	2 271	± 0,00	0,00 %
2T C+20%	2 322	± 0,58	0,02 %

Fuente: elaboración propia.

3.4.1.4. Resultados de ensayo de contenido de aire

Los resultados obtenidos en el procedimiento para determinar el porcentaje de contenido de aire en las mezclas de concreto, siguiendo la Norma ASTM C231 / C231M *Standard Test Method For Air Content Of Freshly Mixed Concrete By The Pressure Method*, se encuentran en la tabla XII.

Tabla XII. **Ensayo de contenido de aire**

Mezcla	Contenido de aire (%)
Control	1,6
2T 20%	2,5
2T 40%	2,7
2T 60%	2,6
2T 80%	2,2
2T C+20%	3,5

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Resultado de prueba a concreto endurecido

Como se mencionó, al comienzo del apartado, de resultados, se realizó un análisis estadístico, el cual consiste en la determinación del valor de la desviación estándar y del coeficiente de variación.

La desviación estándar es el valor medio cuadrático de las variaciones obtenidas en un grupo de pruebas; este valor puede ser negativo o positivo y marca los límites máximos y mínimos en las resistencias obtenidas.

El coeficiente de variación es la relación entre la desviación estándar y el promedio aritmético del conjunto de resistencias consideradas. Este valor es el que indica en forma precisa la calidad en el control desarrollado durante la etapa de realización de las mezclas de concreto, ver tabla XIII.

Tabla XIII. **Valores de coeficiente de variación y grado de uniformidad que puede esperarse en el concreto**

V (%)	Uniformidad del concreto	Condiciones frecuentes en que se obtiene
0 - 5	Excelente	Condiciones de laboratorio
5 - 10	Muy bueno	Preciso control de materiales y dosificación por masa
10 - 15	Bueno	Buen control de los materiales y dosificación por masa
15 - 20	Mediano	Algún control de los materiales y dosificación por masa
20 - 25	Deficiente	Algún control de los materiales y dosificación por volumen
> 25	Muy deficiente	Ningún control de los materiales y dosificación por volumen

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en el ensayo de compresión a cilindros de concreto, basado en la Norma ASTM C39 / C39M - 12a *Standard Test Method For Compressive Strength Of Cylindrical Concrete Specimen*, son los que se muestran en la tabla XV a la XVIII.

Tabla XIV. Resistencia a la compresión, edad 7 días

Mezcla	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tipo de falla
Control	346,10	± 6,34	1,85%	Corte
2T 20%	258,90	± 14,56	5,41%	Cónica y corte
2T 40%	179,50	± 4,10	2,25%	Corte
2T 60%	83,70	± 0,41	0,50%	Corte
2T 80%	21,90	± 1,59	7,04%	Cónica y corte
2T C+20%	297,00	± 4,97	1,65%	Cónica y corte

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Resistencia a la compresión, edad 28 días

Mezcla	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tipo de falla
Control	455,00	± 3,95	0,87%	Corte
2T 20%	358,90	± 5,30	1,47%	Corte
2T 40%	273,60	± 3,92	1,42%	Corte
2T 60%	154,00	± 2,66	1,71%	Corte
2T 80%	62,40	± 1,52	2,48%	Corte
2T C+20%	387,90	± 10,10	2,62%	Corte

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Resistencia a la compresión, edad 56 días

Mezcla	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tipo de falla
Control	478,70	± 5,81	1,21%	Columnar
2T 20%	388,50	± 9,82	2,48%	Corte
2T 40%	344,60	± 6,20	1,82%	Corte
2T 60%	204,10	± 1,69	0,82%	Corte
2T 80%	76,90	± 2,49	3,17%	Corte
2T C+20%	434,70	± 13,8	3,11%	Columnar

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Resistencia a la compresión, edad 112 días

Mezcla	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tipo de falla
Control	570,80	± 8,80	1,56%	Columnar
2T 20%	457,40	± 8,14	1,80%	Columnar
2T 40%	365,00	± 7,63	2,06%	Columnar
2T 60%	243,50	± 3,48	1,42%	Corte
2T 80%	92,80	± 5,74	6,23%	Corte
2T C+20%	496,90	± 25,14	5,25%	Columnar

Fuente: elaboración propia.

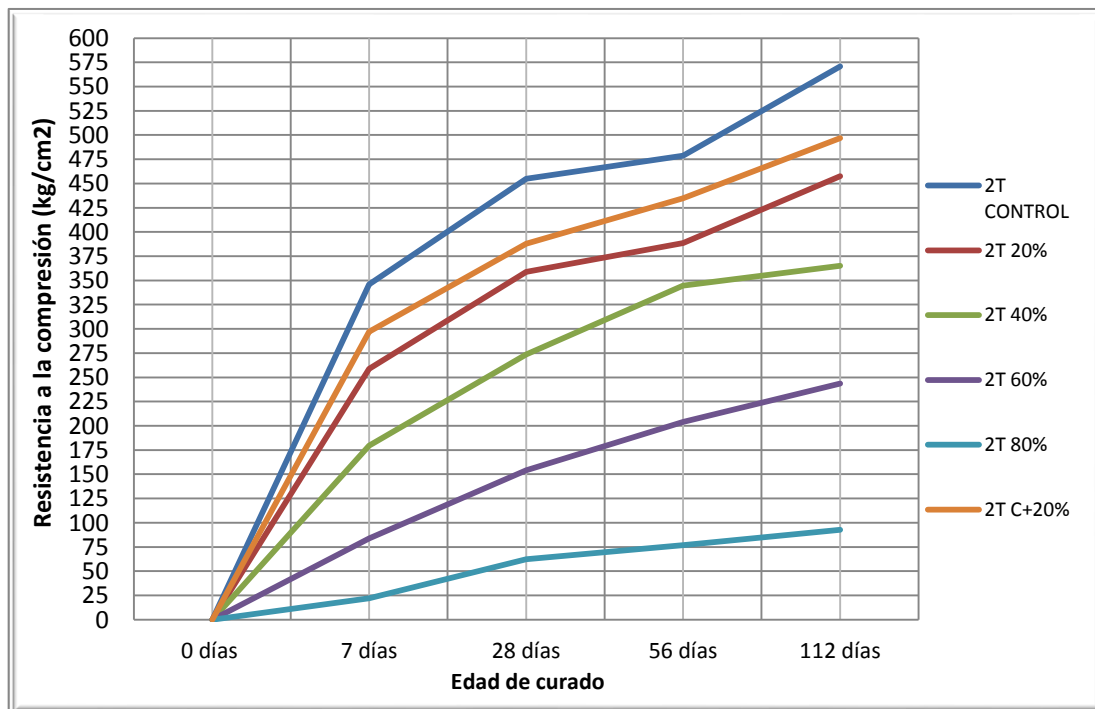
La tabla XVIII muestra un resumen de las resistencias a compresión de los cilindros ensayados y la figura 31, el comportamiento de las resistencias en cada edad de curado, para una mejor evaluación de los resultados obtenidos.

Tabla XVIII. Resumen de resistencias a compresión

Mezcla	Resistencia a la compresión (kilogramos/centímetros ²)			
	7 días	28 días	56 días	112 días
Control	346,10	455,00	478,70	570,80
2T 20%	258,90	358,90	388,50	457,40
2T 40%	179,50	273,60	344,60	365,00
2T 60%	83,70	154,00	204,10	243,50
2T 80%	21,90	62,40	76,90	92,80
2T C+20%	297,00	387,90	434,70	496,90

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Gráfica resistencia a la compresión del concreto vs edad de curado de mezclas evaluadas



Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo fundamental de este trabajo consistió en evaluar experimentalmente el efecto de la sustitución de cemento Portland por la adición mineral 2T 1,5 en la resistencia a compresión de mezclas de concreto. En un documento publicado anteriormente, a la adición mineral se le realizó una investigación geológica y una caracterización física relacionada con su reactividad puzolánica, además de haberse determinado que esta adición mineral tiene un alto grado de reactividad mecánica.

Para llegar al objetivo principal, se evaluaron las mezclas de concreto, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Para los distintos ensayos que se realizaron se empleó la metodología descrita en las Normas ASTM y las Normas COGUANOR, fueron involucradas más de un tipo de estas normas, debido a los diferentes ensayos que se aplicaron a cada una de las mezclas. Los procedimientos fueron seguidos a detalle.

Uno de los puntos básicos en el control de calidad es el muestreo el cual se rige por la Norma ASTM C172, la cual considera realizar ensayos de revenimiento, temperatura, contenido de aire y peso unitario.

De las mezclas en estado fresco ensayadas, se obtuvo que en las mezclas 2T 40% y 2T 60% hay una disminución de 1,5 centímetros comparadas con la mezcla control, diseñada para un asentamiento de 15 centímetros (7 pulgadas), por lo que estas mezclas manifiestan una menor trabajabilidad. Un hecho importante es que la mezcla 2T 80% mostró un asentamiento de igual magnitud que la mezcla control, no siguiendo la tendencia de a mayor

porcentaje de adición mineral menor asentamiento. Los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente mostrando un coeficiente de variación en el rango de 0,80 a 3,00 por ciento, demostrando una buena confiabilidad de los datos.

En el ensayo de temperatura el análisis estadístico mostró un coeficiente de variación en los datos de 0,00 a 0,51 por ciento, mostrando una confiabilidad excelente en los datos obtenidos. Las 6 mezclas evaluadas fueron fabricadas en temperaturas entre los 21 y los 25,3 grados Celsius, por lo que éste pudo ser un factor que haya afectado a las mediciones de la prueba de asentamiento en las mezclas.

Los resultados de la prueba de peso unitario en las mezclas de concreto fresco, mostraron un peso de 2 325 kilogramo/metro cúbico para la mezcla de control. Con excepción a la mezcla 2T C+20%, con un peso unitario de 2 322 kilogramo/metro cúbico, las demás mezclas mostraron un comportamiento de disminución en el peso unitario, al ir aumentando la cantidad de adición mineral por cemento Portland en las mezclas evaluadas, siendo los resultados obtenidos los siguientes: mezcla 2T 20%, 2 316 kilogramo/metro cúbico; mezcla 2T 40%, 2 294 kilogramo/metro cúbico; mezcla 2T 60%, 2 272 kilogramo/metro cúbico; mezcla 2T 80%, 2 271 kilogramo/metro cúbico. Esto evidencia que no existe cambio significativo en la gravedad específica de los agregados utilizados, sino que solamente el cambio en la dosificación de las mezclas, por la sustitución de la adición mineral. El análisis estadístico aplicado a los datos recopilados en esta prueba muestran un coeficiente de variación entre 0,00 y 0,03 por ciento, evidenciando una fuerte confiabilidad en los datos.

En lo que respecta al ensayo de contenido de aire, se obtuvo para la mezcla control un 1,6 por ciento, en las mezclas con adiciones del 20% al 80% se determinó un aumento de 1,0 por ciento aproximadamente para cada mezcla, y la mezcla 2T C+20% manifiesta un aumento de 2,1 por ciento en comparación a la mezcla control. Los valores de contenido de aire se encuentran dentro del rango especificado, donde el valor máximo permitido es 6 por ciento. La variación en el contenido de aire se ve afectado por la temperatura del concreto ya que las mezclas utilizadas contienen la adición mineral, la cual contiene un 23,00 por ciento de material fino inferior a la malla No. 200. También estos resultados se ven afectados por el tiempo y la velocidad de mezclado, así como el tipo y la condición de la mezcladora.

Se realizó la prueba de compresión de los especímenes de concreto, para finalmente poder llegar a cumplir con el objetivo principal, se ensayaron las 3 probetas de cada mezcla en las diferentes edades correspondientes, y los datos obtenidos se evaluaron estadísticamente, determinando el valor de la desviación estándar y el coeficiente de variación. Estos valores fueron importantes ya que la desviación estándar marcó los límites máximos y mínimos en las resistencias obtenidas, y el valor del coeficiente de variación indicó la calidad en el control desarrollado durante la fabricación del concreto.

Las pruebas a compresión realizadas a la edad de 7 días, mostraron una resistencia de 346,10 kilogramo/centímetro² para la mezcla control, para las siguientes mezclas evaluadas, se determinó que su resistencia disminuye conforme el porcentaje de adición mineral va aumentando. Una disminución del 25,20 por ciento en la resistencia de la mezcla 2T 20%, comparada con la mezcla control. La mezcla 2T 40% presentó una resistencia de 179,50 kilogramo/centímetro², que es el 51,86 por ciento de la resistencia de la mezcla control. 83,70 kilogramos/centímetros² y 21,90 kilogramos/centímetros² son las

resistencias obtenidas en el ensayo para las mezclas 2T 60% y 2T 80% respectivamente, que representan el 24,18 y 6,33 por ciento de la resistencia de la mezcla control. La mezcla 2T C+20% mostró un valor más cercano a la mezcla control en la resistencia a la compresión, 297,00 kilogramo/centímetro², que representa el 85,81 por ciento de la resistencia control. El coeficiente de variación se mantuvo en el rango de 0,50 a 7,04 por ciento, lo cual representa una uniformidad del concreto en el rango de excelente-muy bueno y un preciso control de materiales.

A los 28 días, la prueba de compresión reflejó una resistencia para la mezcla control de 455.00 kilogramo/centímetro², la mezcla 2T C+20% mostró una resistencia equivalente al 85.25 por ciento de la resistencia de la mezcla control, el resto de las mezclas mostraron resistencias comprendidas de 13 a 79 por ciento de la resistencia de la mezcla control. El coeficiente de variación para estos datos se mantuvo en el rango de 0,87 a 2,65 por ciento, reflejando una uniformidad del concreto excelente obtenido bajo condiciones de laboratorio.

Los resultados de la prueba de compresión a los 56 días, mostraron una resistencia en la mezcla de control de 478,70 kilogramo/centímetro², siguiendo el mismo comportamiento de las edades anteriores, en las mezclas que contienen adición mineral se notó una disminución en la resistencia, éstas oscilan entre el 16,06 y 81,16 por ciento de la resistencia de la mezcla control. El coeficiente de variación se mantuvo en el rango de 0,82 a 3,17 por ciento, representando una uniformidad del concreto excelente obtenido bajo condiciones de laboratorio.

La prueba de compresión realizada a los 112 días, reflejó resultados de resistencia con similar tendencia que en las edades anteriores, al aumentar el porcentaje de adición mineral la resistencia de las mezclas disminuye, las cuales se mantienen en el rango de 16,26 a 80,13 por ciento de la resistencia de la mezcla control. Se obtuvo una resistencia de 570,80 kilogramo/centímetro² para la mezcla control y para la mezcla 2T C+20% la resistencia disminuyó en un 12.95 por ciento de la resistencia de la mezcla control. El coeficiente de variación se mantuvo en el rango de 1,42 a 6,23 por ciento, lo cual refleja confiabilidad en los datos.

Utilizando la figura 31 se observan los resultados que se obtuvieron en la prueba de compresión, de todas las muestras incluyendo la de control, se observan las resistencias en cada edad de evaluación, e indica un comportamiento similar en todas las mezclas.

CONCLUSIONES

1. La adición mineral 2T 1,5 es una toba de pómez color beige, obtenida en un banco del occidente del país, en Térapan, departamento de Chimaltenango. Se comprobó que cumple con los parámetros establecidos para un nivel alto de reactividad mecánica, por lo que se utilizó para evaluarla en mezclas de concreto.
2. Se diseñó una mezcla de concreto denominada: mezcla control, la cual tenía como resistencia deseada 350 kilogramo/centímetro² (equivalente a 35 megapascales o 5 000 libra/pulgada cuadrada), a la edad de 7 días. Se utilizó en su diseño un cemento CFB, de alta resistencia inicial, los agregados utilizados fueron analizados bajo las Normas ASTM correspondientes, y experimentalmente se obtuvo una mezcla con 346,10 kilogramo/centímetro², equivalente a 98,89 por ciento de la resistencia deseada, corresponde a una mezcla bien elaborada bajo condiciones de laboratorio.
3. Se elaboraron 6 diferentes tipos de mezclas, incluyendo la de control. A cada una de ellas se le sustituyó un porcentaje de cemento Portland por adición mineral 2T 1,5. El comportamiento siguió la misma tendencia en las cuatro edades de curado evaluadas, al sustituir mayor porcentaje de cemento Portland por adición mineral, la resistencia a la compresión fue disminuyendo, y la mezcla 2T C+20% en las cuatro edades evaluadas, no alcanzó la resistencia de la mezcla control, sino mantuvo resultados entre el 85 y 91 por ciento de esta.

4. Siguiendo lo que rige la Norma ASTM C172, Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete, se desarrolló el procedimiento en las mezclas de concreto fresco, para los ensayos de revenimiento, temperatura, contenido de aire y peso unitario. Los resultados mostraron que las mezclas no presentan cambios significativos en la trabajabilidad del concreto, refleja que hubo variación en los valores de temperatura al momento de su fabricación, por lo que este puede ser un factor que afecte, no significativamente, a los resultados en las resistencias a compresión. Se obtuvo una disminución gradual en el peso unitario de las mezclas, aun así, esto solamente evidencia el cambio en la dosificación de las mezclas, debido a la adición. El porcentaje de contenido de aire en las mezclas se encuentran dentro del rango especificado, donde el valor máximo permitido es 6 por ciento y la variación en los resultados se debe a la cantidad que la mezcla contenga de adición mineral, ya que por contener material fino inferior a la malla No. 200, la mezcla se ve afectada por este factor.

5. En la determinación de la resistencia a compresión, de las mezclas que contenían adición mineral como sustituto del cemento Portland, la resistencia fue aumentando gradualmente con el aumento de la edad, mas ninguna pasó el 81,15 por ciento de la resistencia de la mezcla control. Los resultados de la prueba a compresión en los cilindros, demostraron que a mayor porcentaje de sustitución de cemento Portland por adición mineral, el concreto tiene menor resistencia a la compresión. La mezcla 2T C+20% mostró en sus resultados de resistencia a la compresión, teniendo la dosificación original y un 20 por ciento de adición mineral en la mezcla, que la adición mineral no genera más resistencia sino que le afecta a la mezcla mecánicamente, ya que

comparada con la mezcla control, la mezcla 2T C+20% solamente alcanzó el 90,81 por ciento de la resistencia a los 56 días.

6. El efecto de la sustitución de cemento Portland por la adición mineral 2T 1,5 no cumple con las expectativas esperadas, ya que los porcentajes de resistencia en relación con la mezcla control, que alcanzan las distintas mezclas, no es mayor al 81,16 por ciento, y los resultados obtenidos con la mezcla 2T C+20% alcanzan porcentajes de resistencia mayores en relación con la resistencia a la mezcla control, pero no cumple con el objetivo de ser un material sustituto del cemento Portland.

RECOMENDACIONES

1. Guatemala es un territorio con abundantes tipos de adiciones minerales, algunas de ellas ha sido comprobado que tienen alto índice de reactividad mecánica, lo cual las hace aptas para ser evaluadas como sustitutos de cemento Portland en mezclas de concreto, por lo que es recomendable su estudio y análisis, para proveer una alternativa científicamente comprobada, que permita fabricar concreto funcionalmente similar al concreto que actualmente se utiliza, solamente que más económico y de menor impacto ecológico.
2. Al realizar mezclas de concreto, hacer un buen diseño y cumplir con lo que dice la dosificación, así como utilizar los respectivos componentes para su fabricación, siguiendo las especificaciones y parámetros que rigen las normas para cada uno de ellos, es importante, ya que proporcionarán resultados más confiables.
3. Debido al comportamiento que mostraron los resultados de las mezclas evaluadas, no es recomendable la utilización de esta adición mineral como sustituto del cemento Portland en la fabricación de concreto con función estructural, sin embargo, podría ser considerado en la fabricación de obras menores, tales como banquetas, bordillos, obras de arte.

4. Consultar las Normas ASTM para realizar los ensayos correctamente, con los instrumentos adecuados y hacer una calibración de estos instrumentos antes de realizar las pruebas, es fundamental para obtener datos exactos y confiables de las muestras, para reflejar correctamente el comportamiento y propiedades del concreto.

5. Debido a que los resultados mostraron que la resistencia a la compresión disminuye proporcionalmente a la cantidad de adición mineral que tenga la dosificación de concreto, y que la mezcla con la sustitución del 20 por ciento de cemento Portland por adición en las últimas edades evaluadas alcanzó casi el 81 por ciento de la resistencia control, sería de utilidad evaluar otros tipos de adiciones minerales, para saber si sus características cumplen con el objetivo de mantener las propiedades del concreto, disminuyendo la cantidad de cemento Portland.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM. Annual Book of ASTM. Standards construction, volumen 4.02. Concrete and Aggregates. *Norma ASTM C31/C31M-12 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field* [en línea]. <http://www.astm.org>. [Consulta: 18 de junio de 2013].
2. _____. *Norma ASTM C39/C39M-12a Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens* [en línea]. <http://www.astm.org>. [Consulta: 01 de julio de 2013].
3. _____. *Norma ASTM C138/C138M-13a Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete* [en línea]. <http://www.astm.org>. [Consulta: 21 de junio de 2013].
4. _____. *Norma ASTM C143/C143M-12 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete* [en línea]. <http://www.astm.org>. [Consulta: 22 de junio de 2013].
5. _____. *Norma ASTM C231/C231M Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method* [en línea]. <http://www.astm.org>. [Consulta: 18 de junio de 2013].

6. _____. *Norma ASTM C617/C617M-12 Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens* [en línea]. <http://www.astm.org>. [Consulta: 31 de junio de 2013].
7. _____. *Norma ASTM C1064/C1064M-12 Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete* [en línea]. <http://www.astm.org>. [Consulta: 21 de junio de 2013].
8. BAUTISTA GALLARDO, Pablo José. *Determinación del índice de reactividad mecánica de 18 muestras de materiales volcánicos de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 153 p.
9. COSILLO, Alan; et al. *La geología en Guatemala*. Sociedad geológica de Guatemala - SGG -. Geo notas. Parte 1. Guatemala. 2008. 24 p.
10. DOPICO, Juan José; et al. *Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario*. Cuba: Revista Ingeniería de Construcción, 2008. Vol. 23, núm. 3.
11. OCHOA MARROQUÍN, Luis Alfredo. *Caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 133 p.

12. QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ, Francisco J. *Determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento*. Proyecto FODECYT No. 023-10. Guatemala: CONCYT-USAC, 2013. 106 p.
13. _____. *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*. Informe final del proyecto de investigación interno No. 01-2010. Guatemala: UIEIC/USAC, 2010. 75 p.
14. ROSALES RIVAS, Víctor Rafael. *Geología y caracterización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 150 p.
15. SHI, Caijun y MO, Yilung. *Engineering Materials for Technological Needs. High Performance Construction Materials. Science and Applications*. Volumen 1. Singapur: World Scientific Editorials, 2008. 431 p.
16. ZECEÑA GIRÓN, Carlos Efraín. *Caracterización física-mecánica y química del cemento puzolánico*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1989. 83 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Datos obtenidos en ensayos a compresión a cilindros de concreto**

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA DE CONTROL

ENSAYO A 7 DÍAS 04 - JUNIO - 2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,34	30,7	13,014	63 768,00	347,80	4 945,70
15,25	30,8				
15,25	30,7				
Promedio		Área		183,37	cm ²
15,28	30,73	Tipo de falla del cilindro		cónica	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,35	30,8	13,049	60 881,00	333,00	4 735,30
15,22	30,8				
15,2	30,8				
Promedio		Área		182,81	cm ²
15,26	30,80	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,25	30,7	12,991	62 376,00	344,50	4 898,80
15,1	30,7				
15,2	30,9				
Promedio		Área		181,06	cm ²
15,18	30,77	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA DE CONTROL

ENSAYO A 28 DÍAS 25-JUNIO-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,8	13,016	84 327,00	461,70	6 565,40
15,2	30,7				
15,4	30,5				
promedio		Área		182,65	cm ²
15,25	30,67	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,36	31	13,07	82 830,00	452,30	6 431,70
15,25	30,8				
15,2	30,8				
promedio		Área		183,13	cm ²
15,27	30,87	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,39	30,7	13,07	83 624,00	455,00	6 470,10
15,25	30,7				
15,25	30,5				
promedio		Área		183,77	cm ²
15,30	30,63	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA DE CONTROL

ENSAYO A 56 DÍAS 23-JULIO-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,18	30,7	13,02	88 561,00	478,80	6 808,50
15,46	30,4				
15,4	30,6				
promedio		Área		184,98	cm ²
15,35	30,57	Tipo de falla del cilindro		columnar	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,3	12,994	86 454,00	472,50	6 719,00
15,24	30,5				
15,4	30,5				
promedio		Área		182,97	cm ²
15,26	30,43	Tipo de falla del cilindro		columnar	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,05	30,4	12,973	88 781,00	486,70	6 920,90
15,27	30,4				
15,4	30,5				
promedio		Área		182,41	cm ²
15,24	30,43	Tipo de falla del cilindro		columnar	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA DE CONTROL

ENSAYO A 112 DÍAS 17-SEPTIEMBRE-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,04	30,1	13,055	103 753,00	572,00	8 133,80
15,2	30,5				
15,35	30,7				
promedio		Área		181,38	cm ²
15,20	30,43	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,1	30,5	13,064	103 800,00	569,50	8 098,30
15,15	30,7				
15,45	30,6				
promedio		Área		182,26	cm ²
15,23	30,60	Tipo de falla del cilindro		columnar	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,5	13,092	101 211,00	552,20	7 852,30
15,25	30,7				
15,43	30,6				
promedio		Área		183,29	cm ²
15,28	30,60	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 20%

ENSAYO A 7 DÍAS 06 - JUNIO - 2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,2	30,7	13,045	47 596,00	261,30	3 715,70
15,19	30,7				
15,3	30,7				
promedio		Área		182,18	cm ²
15,23	30,70	Tipo de falla del cilindro		cónica	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,3	13,087	46 780,00	256,50	3 647,40
15,22	30,5				
15,35	30,6				
promedio		Área		182,41	cm ²
15,24	30,47	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30,8	12,995	52 870,00	289,50	4 116,70
15,3	30,7				
15,15	30,8				
promedio		Área		182,65	cm ²
15,25	30,77	Tipo de falla del cilindro		cónica y cote	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 20%
ENSAYO A 28 DÍAS 27-JUNIO-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,4	30,5	13,018	67 340,00	367,90	5 231,50
15,25	30,7				
15,15	30,6				
promedio		Área		183,05	cm ²
15,27	30,60	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,1	30,7	13,048	66 424,00	358,90	5 103,60
15,5	30,5				
15,45	30,7				
promedio		Área		185,06	cm ²
15,35	30,63	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,34	30,7	13,045	65 183,00	355,30	5 052,40
15,32	30,7				
15,19	30,5				
promedio		Área		183,45	cm ²
15,28	30,63	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 20%

ENSAYO A 56 DÍAS 25-JULIO-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,4	30,5	13,03	71 459,00	389,50	5 538,70
15,25	30,5				
15,2	30,50				
promedio		Área		183,45	cm ²
15,28	30,50	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,5	12,991	74 836,00	409,20	5 818,80
15,25	30,5				
15,38	30,6				
promedio		Área		182,89	cm ²
15,26	30,53	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,5	12,95	71 137,00	387,40	5 508,80
15,35	30,3				
15,37	30,5				
promedio		Área		183,61	cm ²
15,29	30,43	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 20%
ENSAYO A 112 DÍAS 19-SEPTIEMBRE-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,5	13,095	83 576,00	456,00	6 484,30
15,35	30,5				
15,33	30,6				
promedio		Área		183,29	cm ²
15,28	30,53	Tipo de falla del cilindro		columnar	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30,6	13,032	84 343,00	458,80	6 524,10
15,2	30,5				
15,4	30,4				
promedio		Área		183,85	cm ²
15,30	30,50	Tipo de falla del cilindro		columnar	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,25	30,6	13,015	81 483,00	440,30	6 261,10
15,35	30,6				
15,45	30,5				
promedio		Área		185,06	cm ²
15,35	30,57	Tipo de falla del cilindro		columnar	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 40%

ENSAYO A 7 DÍAS 11 - JUNIO - 2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,32	30,3	12,796	34 434,00	188,20	2 676,20
15,25	30,5				
15,22	30,5				
promedio		Área		182,97	cm ²
15,26	30,43	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,32	30,52	12,945	32 727,00	179,00	2 545,40
15,3	30,5				
15,15	30,52				
promedio		Área		182,81	cm ²
15,26	30,51	Tipo de falla del cilindro		cónica	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,35	30,4	12,825	32 861,00	180,10	2 561,00
15,25	30,4				
15,12	30,2				
promedio		Área		182,41	cm ²
15,24	30,33	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 40%
ENSAYO A 28 DÍAS 2-JULIO-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30,5	12,879	50 253,00	276,00	3 924,70
15,23	30,5				
15,15	30,6				
promedio		Área		182,10	cm ²
15,23	30,53	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,7	12,899	51 190,00	280,80	3 993,00
15,26	30,6				
15,3	30,7				
promedio		Área		182,33	cm ²
15,24	30,67	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30,4	12,78	49 423,00	271,20	3 856,50
15,24	30,5				
15,16	30,6				
promedio		Área		182,26	cm ²
15,23	30,50	Tipo de falla del cilindro			

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 40%

ENSAYO A 56 DÍAS 30- JULIO -2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30,5	12,838	60 410,00	331,70	4 716,80
15,24	30,3				
15,14	30,30				
promedio		Área		182,10	cm ²
15,23	30,37	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,25	30,5	12,968	62 527,00	343,10	4 878,90
15	30,5				
15,45	30,4				
promedio		Área		182,26	cm ²
15,23	30,47	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,3	12,844	63 129,00	346,10	4 921,50
15,2	30,2				
15,37	30,4				
promedio		Área		182,41	cm ²
15,24	30,30	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 40%
ENSAYO A 112 DÍAS 24-SEPTIEMBRE-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,5	12,9	69 886,00	381,00	5 417,80
15,35	30,5				
15,35	30,6				
promedio		Área		183,45	cm ²
15,28	30,53	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,2	30,3	12,774	67 131,00	366,40	5 210,20
15,3	30,4				
15,32	30,3				
promedio		Área		183,21	cm ²
15,27	30,33	Tipo de falla del cilindro		cónica y vertical	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15	30,3	12,816	65 825,00	363,60	5 170,40
15,25	30,4				
15,3	30,4				
promedio		Área		181,06	cm ²
15,18	30,37	Tipo de falla del cilindro		columnar	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 60%

ENSAYO A 7 DÍAS 13 - JUNIO - 2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,7	12,367	15 253,00	83,90	1 193,10
15,2	30,8				
15,3	30,7				
promedio		Área		181,86	cm ²
15,22	30,73	Tipo de falla del cilindro		cónica y vertical	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30,4	12,355	15 181,00	83,50	1 187,40
15,2	30,4				
15,15	30,6				
promedio		Área		181,86	cm ²
15,22	30,47	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,2	30,6	12,455	15 432,00	84,50	1 201,60
15,25	30,7				
15,3	30,7				
promedio		Área		182,65	cm ²
15,25	30,67	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 60%
ENSAYO A 28 DÍAS 4-JULIO-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,34	30,6	12,77	28 169,00	154,00	2 189,90
15,24	30,7				
15,2	30,6				
promedio		Área		182,89	cm ²
15,26	30,63	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30,6	12,74	29 051,00	159,60	2 269,50
15,22	30,7				
15,15	30,6				
promedio		Área		182,02	cm ²
15,22	122,43	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30,4	12,71	28 053,00	153,90	2 188,50
15,25	30,5				
15,15	30,6				
promedio		Área		182,26	cm ²
15,23	30,50	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 60%

ENSAYO A 56 DÍAS 01-AGOSTO-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,12	30,7	12,698	37 068,00	204,30	2 905,10
15,18	30,7				
15,3	30,5				
promedio		Área		181,46	cm ²
15,20	30,63	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,6	12,685	37 790,00	207,60	2 952,10
15,22	30,5				
15,3	30,6				
promedio		Área		182,02	cm ²
15,22	30,57	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,12	30,3	12,548	36 919,00	203,80	2 898,00
15,14	30,3				
15,3	30,4				
promedio		Área		181,14	cm ²
15,19	30,33	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 60%
ENSAYO A 112 DÍAS 26-SEPTIEMBRE-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,2	30,5	12,727	44 524,00	243,80	3 466,80
15,15	30,4				
15,4	30,6				
promedio		Área		182,65	cm ²
15,25	30,50	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,2	30,5	12,717	46 003,00	250,80	3 566,40
15,25	30,6				
15,4	30,5				
promedio		Área		183,45	cm ²
15,28	30,53	Tipo de falla del cilindro		cónica y corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,25	30,3	12,687	44 894,00	243,10	3 456,90
15,3	30,4				
15,45	30,3				
promedio		Área		184,66	cm ²
15,33	30,33	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 80%

ENSAYO A 7 DÍAS 18 - JUNIO - 2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,32	29,7	12,382	3 848,00	21,10	300,00
15,25	30,5				
15,18	30,5				
promedio		Área		182,65 cm ²	
15,25	30,23	Tipo de falla del cilindro		corte	
CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,33	30,3	12,432	4 523,00	24,80	352,70
15,23	30,4				
15,15	30				
promedio		Área		182,33 cm ²	
15,24	30,23	Tipo de falla del cilindro		cónica	
CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30	12,291	3 988,00	21,90	311,40
15,25	30,3				
15,16	29,9				
promedio		Área		182,33 cm ²	
15,24	30,07	Tipo de falla del cilindro		cónica	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 80%

ENSAYO A 28 DÍAS 9-JULIO-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,32	30,5	12,431	11 312,00	61,90	880,20
15,25	30,3				
15,18	30,5				
promedio		Área		182,65	cm ²
15,25	30,43	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,31	30,3	12,475	11 486,00	62,90	894,40
15,26	30,4				
15,19	30,4				
promedio		Área		182,73	cm ²
15,25	30,37	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,32	30,1	12,445	10 867,00	59,30	843,20
15,3	30,3				
15,2	30				
promedio		Área		183,21	cm ²
15,27	30,13	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 80%

ENSAYO A 56 DÍAS 06-AGOSTO-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	30,1	12,275	14 060,00	76,50	1087,80
15,4	30				
15,35	30,2				
promedio		Área		183,85	cm ²
15,30	30,10	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,15	29,8	12,254	14 102,00	77,20	1097,80
15,25	29,7				
15,35	29,8				
promedio		Área		182,65	cm ²
15,25	29,77	Tipo de falla del cilindro		columnar	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,35	29,8	12,281	15 004,00	82,10	1167,50
15,25	29,7				
15,15	29,6				
promedio		Área		182,65	cm ²
15,25	29,70	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA 80%
ENSAYO A 112 DÍAS 01-OCTUBRE-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30,5	12,35	16 919,00	92,80	1319,60
15,2	30,3				
15,2	30,4				
promedio		Área		182,26	cm ²
15,23	30,40	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,35	30,4	12,381	18 234,00	98,70	1403,50
15,25	30,2				
15,4	30,5				
promedio		Área		184,66	cm ²
15,33	30,37	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,35	30,3	12,326	15 471,00	84,70	1204,40
15,25	30				
15,15	30,1				
promedio		Área		182,65	cm ²
15,25	30,13	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA CONTROL + 20%

ENSAYO A 7 DÍAS 20- JUNIO - 2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,35	30,7	13,055	54 592,00	296,90	4221,90
15,26	30,7				
15,29	30,4				
promedio		Área		183,85	cm ²
15,30	30,60	Tipo de falla del cilindro		corte	
CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,18	30,7	12,967	56 119,00	307,50	4372,70
15,25	30,6				
15,3	30,8				
promedio		Área		182,49	cm ²
15,24	30,70	Tipo de falla del cilindro		cónica	
CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,19	30,6	12,894	54 244,00	297,00	4223,30
15,25	30,6				
15,31	30,5				
promedio		Área		182,65	cm ²
15,25	30,57	Tipo de falla del cilindro		cónica	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA CONTROL + 20%

ENSAYO A 28 DÍAS 11-JULIO-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,31	30,3	12,872	67 732,00	371,30	5279,90
15,25	30,4				
15,16	30,5				
promedio		Área		182,41	cm ²
15,24	30,40	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30,4	12,913	72 214,00	395,50	5624,00
15,25	30,4				
15,19	30,2				
promedio		Área		182,57	cm ²
15,25	30,33	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,31	30,4	12,925	70 876,00	387,90	5515,90
15,25	30,4				
15,2	30,3				
promedio		Área		182,73	cm ²
15,25	30,37	Tipo de falla del cilindro		corte	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA CONTROL + 20%

ENSAYO A 56 DÍAS 8-AGOSTO-2013

CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30,5	13,066	80 958,00	436,50	6207,00
15,35	30,7				
15,45	30,7				
promedio		Área		185,46	cm ²
15,37	30,63	Tipo de falla del cilindro		columnar	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,32	30,4	12,942	84 606,00	463,80	6595,20
15,25	30,3				
15,15	30,3				
promedio		Área		182,41	cm ²
15,24	30,33	Tipo de falla del cilindro		columnar	

CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,37	30,5	13,038	80 011,00	432,90	6155,80
15,4	30,6				
15,25	30,5				
promedio		Área		184,82	cm ²
15,34	30,53	Tipo de falla del cilindro		columnar	

Continuación del apéndice 1.

ENSAYO A COMPRESIÓN MEZCLA CONTROL + 20%

ENSAYO A 112 DÍAS 03-OCTUBRE-2013

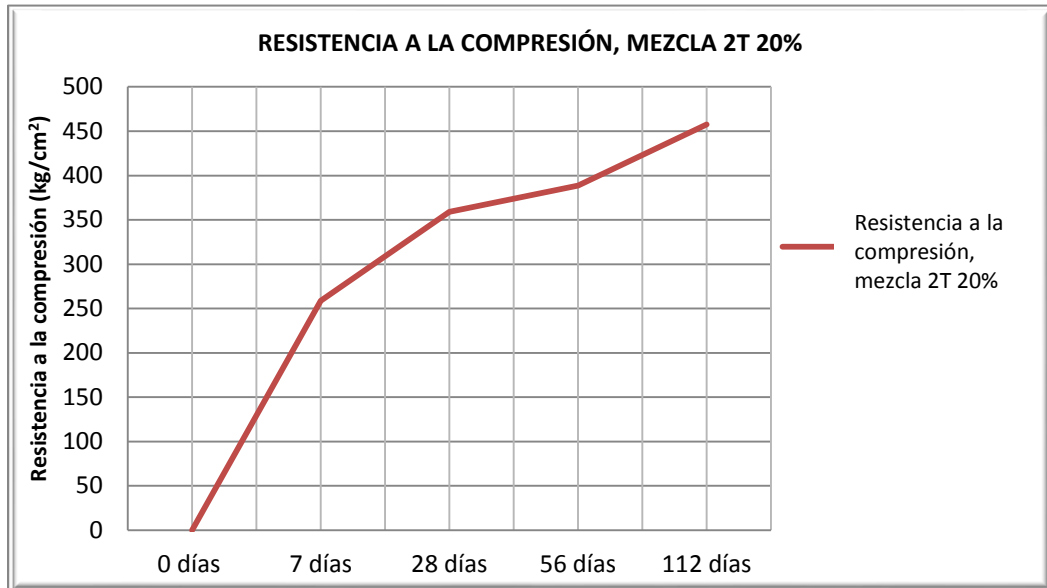
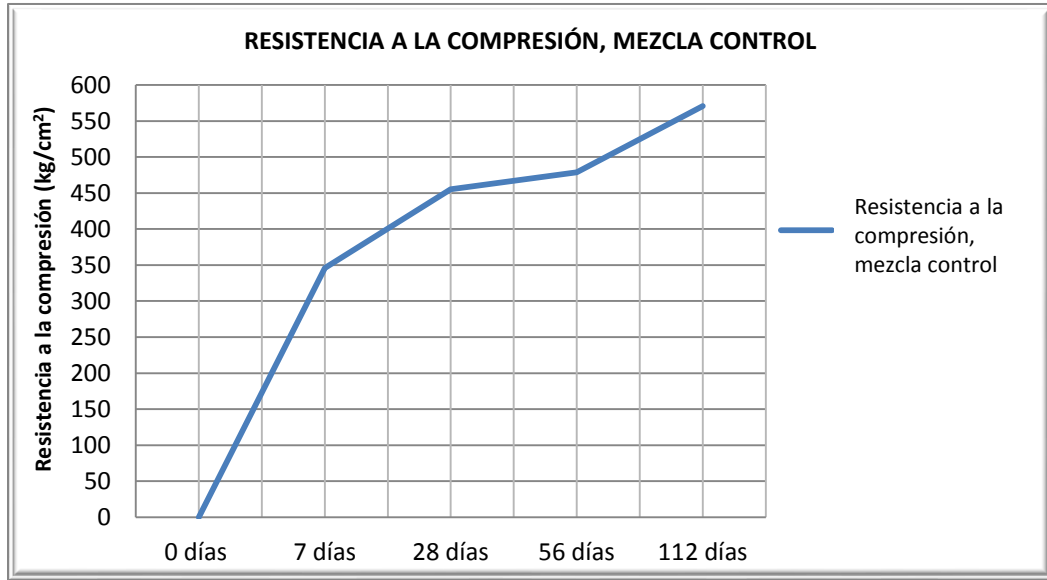
CILINDRO 1					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,32	30,7	12,95	81 811,00	443,60	6308,00
15,25	30,6				
15,4	30,5				
promedio		Área		184,42	cm ²
15,32	30,60	Tipo de falla del cilindro		corte	

CILINDRO 2					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,3	30,4	12,958	90 170,00	495,80	7050,30
15,15	30,5				
15,2	30,4				
promedio		Área		181,86	cm ²
15,22	30,43	Tipo de falla del cilindro		cónica y vertical	

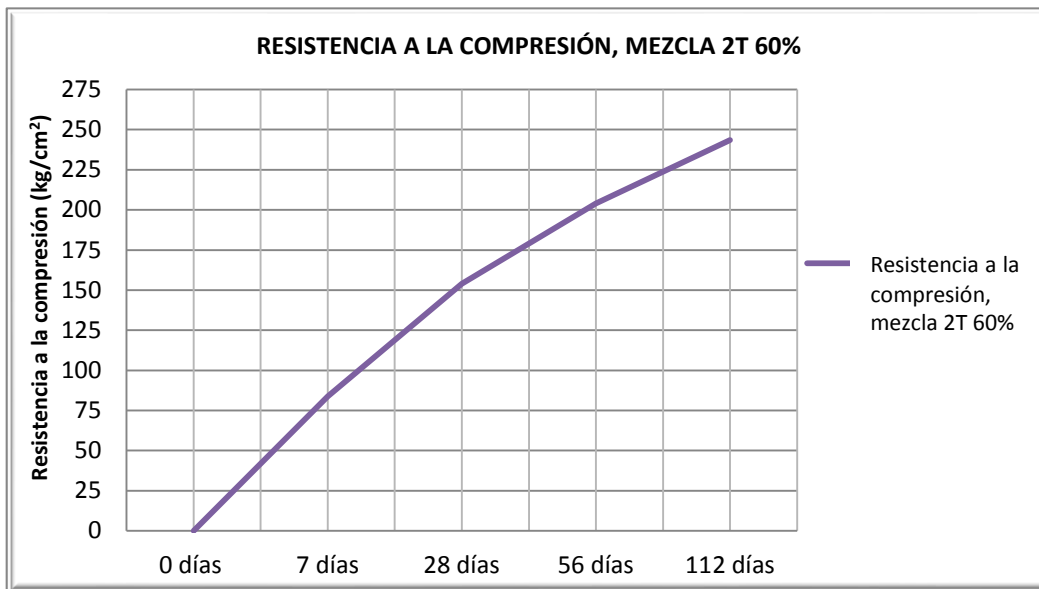
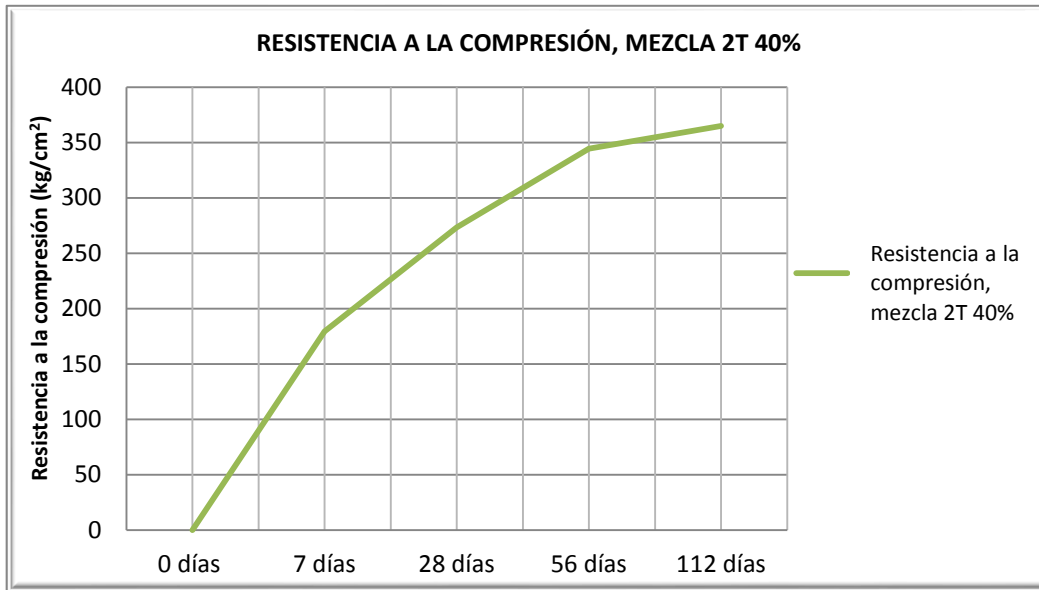
CILINDRO 3					
Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Carga (kg)	σ (kg/cm ²)	σ (psi)
15,4	30,5	12,91	91 754,00	498,00	7081,60
15,25	30,6				
15,3	30,5				
promedio		Área		184,25	cm ²
15,32	30,53	Tipo de falla del cilindro		cónica y corte	

Fuente: elaboración propia.

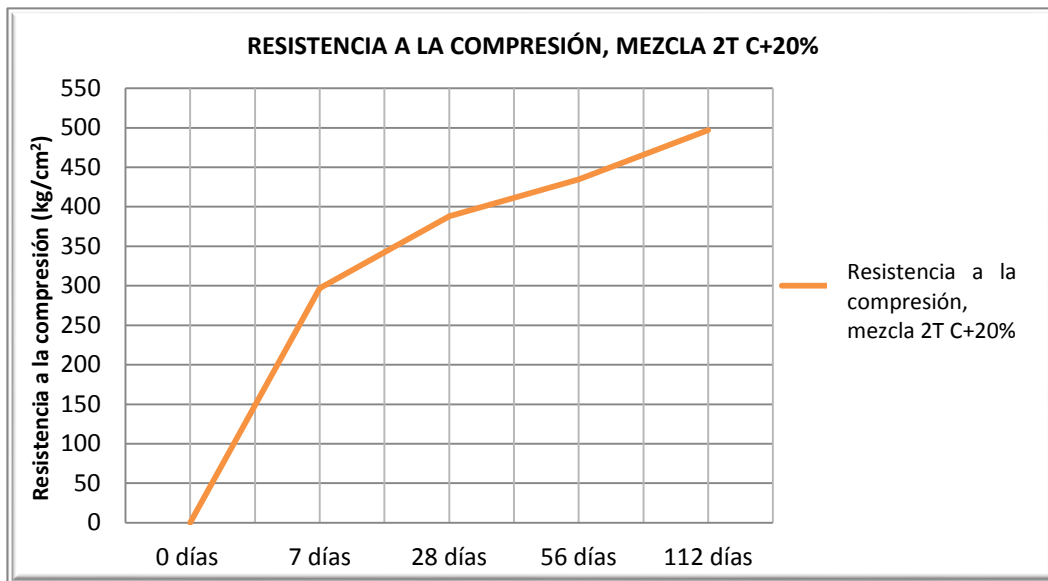
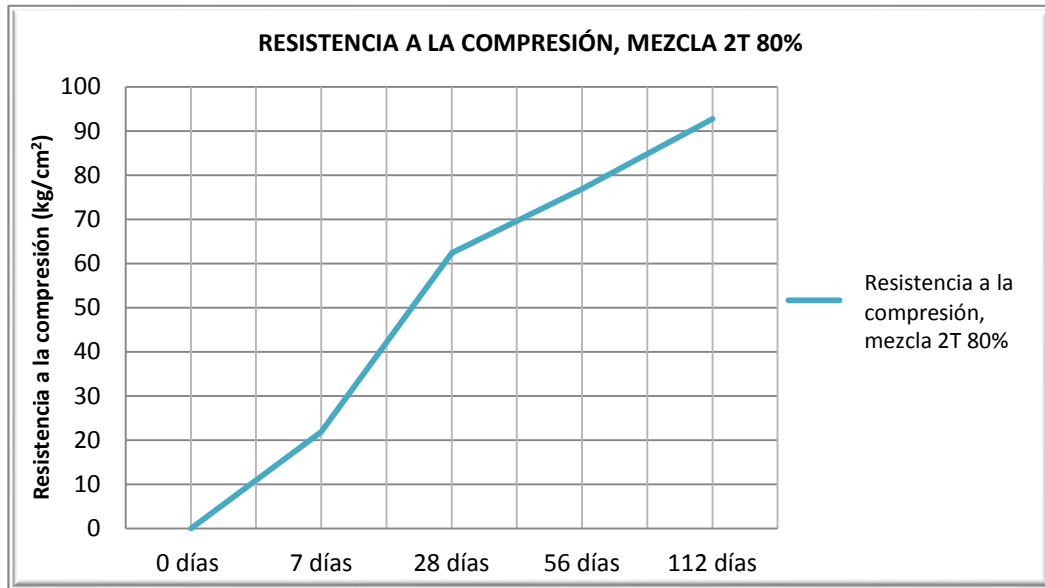
Apéndice 2. **Gráficas resistencia del concreto vs edad de curado de mezclas evaluadas**



Continuación del apéndice 2.



Continuación del apéndice 2.



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS



ANÁLISIS FÍSICO DE AGREGADO
AGREGADO FINO

PRE-CC-RE-05

INFORME No. 2

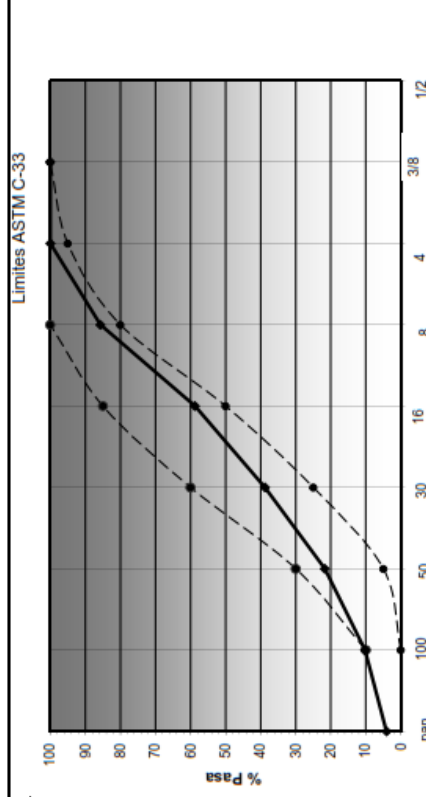
MUESTRA: Arena Triturada

FECHA: 15-ene-13

DESCRIPCION DEL INFORME: Arena Lavada PPO /Planta Precon

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGREGADO	
Peso Especifico	2.67
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1166
Peso Unitario Compactado (kg/m ³)	1397
Porcentaje de Vacíos	0
Porcentaje de Absorción	0.80
Contenido de Materia Orgánica	0
Pasa Tamiz 200	4.08
Humedad	1.00
Módulo de Finura	2.85

Observaciones _____



Tamiz No.	3/8	4	8	16	30	50	100	Pan
% Pasa	100.00	99.99	85.70	58.73	38.76	21.70	10.23	4.09
% Retenido Acum.	0.00	0.01	14.30	41.27	61.24	78.30	89.77	95.91



[Signature]

Ing. Jaime Manolo Samayoa González
Jefe de Laboratorio de Concreto
PreCon

Fuente: PreCon.