



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

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REACTIVIDAD MECÁNICA DE 18
MUESTRAS DE MATERIALES VOLCÁNICOS DE GUATEMALA**

Pablo José Bautista Gallardo

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

Guatemala, septiembre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REACTIVIDAD MECÁNICA DE 18
MUESTRAS DE MATERIALES VOLCÁNICOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

PABLO JOSÉ BAUTISTA GALLARDO

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

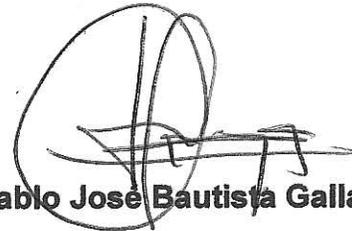
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila
EXAMINADOR	Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REACTIVIDAD MECÁNICA DE 18 MUESTRAS DE MATERIALES VOLCÁNICOS DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería de Civil, con fecha 03 de agosto de 2011.



Pablo José Bautista Gallardo



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



Nº 25607

Guatemala, 22 de febrero de 2012

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

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **"Determinación del índice de reactividad mecánica de 18 muestras de materiales volcánicos de Guatemala"**, desarrollado por el estudiante universitario **Pablo José Bautista Gallardo**, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante **Bautista Gallardo** satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,


Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
Ingeniero Civil Colegiado No. 1941

FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ
Ingeniero civil colegiado No. 1941



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



Guatemala, 5 marzo de 2012

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

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado "Determinación del índice de reactividad mecánica de 18 muestras de materiales volcánicos de Guatemala", desarrollado por el estudiante universitario Pablo José Bautista Gallardo, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante Bautista Gallardo satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,


Ing. Francisco Javier Quirón de la Cruz
Coordinador

Unidad de Investigación Escuela de Ingeniería Civil -UIEIC-



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



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



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador de la Unidad de Investigación Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación del estudiante Pablo José Bautista Gallardo, titulado **DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REACTIVIDAD MECÁNICA DE 18 MUESTRAS DE MATERIALES VOLCÁNICOS DE GUATEMALA** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, Septiembre de 2012.

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REACTIVIDAD MECÁNICA DE 18 MUESTRAS DE MATERIALES VOLCÁNICOS DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Pablo José Bautista Gallardo**, autoriza la impresión del mismo..

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, septiembre de 2012

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por su grande amor y misericordia hacia mí vida, sin él nada fuese posible.
Mis padres	Juan Domingo Bautista Godínez y Rosa María Gallardo Arellano de Bautista.
Mis abuelos y abuelas	Alipio Bautista (q.e.p.d.) y Francisca Godínez de Bautista (q.e.p.d.), Rogelio Gallardo (q.e.p.d) y Victoria Arellano de Gallardo.
Mis hermanos	Ana Raquel Bautista Gallardo y Juan Alejandro Bautista Gallardo.
Familiares	Familia Bautista y familia Gallardo.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la sabiduría, determinación y capacidad de terminar lo que empecé.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de mi formación como profesional en esta casa de estudios.
Mis padres	Por darme su amor, tiempo, motivación y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.
Mis hermanos	Por su cariño y amistad.
Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz	Por la oportunidad, confianza y conocimiento transmitido a mí persona, así como el ejemplo de la excelencia profesional.
Sección de Ecomateriales	Por brindar los medios para la culminación de este documento.
Mis amigos y compañeros	Por su compañía en especial a Rodrigo Ruiz, Carlos Cermeño, Oscar Esquivel, Carlos López, Fernando Castro, Edgar López, Francisco Castellanos, Allan Mejía y Martín Jofre.

1.7.	Disposición de materiales volcánicos en Guatemala	21
2.	MARCO EXPERIMENTAL	23
2.1.	Características de las muestras seleccionadas.....	23
2.1.1.	Características geográficas	24
2.1.2.	Características físicas	26
2.2.	Metodología	29
2.2.1.	Equipo	30
2.2.1.1.	Diseño y construcción de cámara de humedad	30
2.2.1.2.	Diseño y construcción de cámara de inmersión	35
2.2.1.3.	Instalación de la cámara de curado a vapor	38
2.2.1.4.	Máquina universal	41
2.2.1.5.	Vernier electrónico	42
2.2.1.6.	Balanza	43
2.2.1.7.	Mezcladora	44
2.2.1.8.	Mesa de flujo.....	45
2.2.1.9.	Moldes	46
2.2.2.	Materiales.....	47
2.2.2.1.	Cemento tipo I (ASTM C 150-11).....	47
2.2.2.2.	Arena graduada estándar (ASTM C 778 – 06)	49
2.2.2.3.	Cal hidratada.....	50
2.2.2.4.	Material volcánico	52
2.2.2.5.	Agua desmineralizada	53
2.2.3.	Mezclas de mortero (IRC e IAR)	54
2.2.3.1.	Mezclas cemento-puzolana (IAR)	54

2.2.3.2.	Mezclas cal-puzolana (IRC)	65
2.2.3.3.	Ensayo de especímenes IAR e IRC	66
2.2.3.4.	Parámetros IAR e IRC.....	71
2.3.	Resultados.....	73
2.3.1.	Flujo de mezclas IAR e IRC.....	73
2.3.2.	Especímenes para su evaluación como IAR	75
2.3.3.	Especímenes para su evaluación como IRC	80
3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
3.1.	Ensayo de laboratorio	85
	CONCLUSIONES	91
	RECOMENDACIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	97
	APÉNDICES	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proceso de hidratación del cemento	8
2.	Detalle microscópico del fenómeno de la hidratación del cemento	11
3.	Proceso de hidratación de los conglomerados del cemento bajo el microscopio.	13
4.	Resistencia de cementos mixtos conteniendo una puzolana o escoria de alto horno	17
5.	Efecto de la sustitución del cemento por puzolana natural en el calor de hidratación del cemento.....	18
6.	Efecto del tiempo de curado y el contenido de puzolana (escoria) sobre el contenido de hidróxido de calcio en la pasta de cemento ..	19
7.	Disposición de material volcánico	22
8.	Localización de los departamentos donde provienen los materiales volcánicos.	26
9.	Cámara de humedad según requerimientos de la Norma C 511-09	34
10.	Cámara de humedad en funcionamiento	35
11.	Cámara inmersión según requerimientos de la Norma ASTM C 511-09	36
12.	Cámara de inmersión en funcionamiento, saturada con agua y cal, a una altura de 8 cm	37
13.	Arriba la cámara de humedad y abajo la cámara de inmersión en funcionamiento desde una vista lateral	38
14.	Parte interna de la cámara de curado a vapor, donde se aprecia el sistema de funcionamiento	39

15.	Control electrónico regulador de la temperatura en funcionamiento...	40
16.	Cámara de curado a vapor generando humedad saturada	41
17.	Maquina universal de 60 000 kg de capacidad y 0,5 kg de aproximación	42
18.	Vernier digital marca Mituyoyo, con una capacidad de 200 mm y una precisión de 0,02 mm	43
19.	Balanza analítica marca OHAUS, con una capacidad de 2 610 g y una precisión 0,1 g.....	44
20.	Mezcladora protegida con un molde de madera que evita la evaporación del agua durante el proceso de mezclado	45
21.	Mesa de flujo según requerimientos de ASTM C 230-08.....	46
22.	Moldes de cobre, con capacidad de 3 cubos de 5x5x5 cm marca FORNEY	47
23.	Cemento tipo I (ASTM C 150-11), en vista frontal y lateral.....	48
24.	Arena graduada estándar (ASTM C 778-06)	50
25.	Cal hidratada HORCALSA, Norma ASTM C 207 -06	51
26.	Materiales volcánicos a tres horas de molienda	53
27.	Materiales utilizados en IAR e IRC	54
28.	Materiales para un lote. Arena estándar, cemento tipo 1, material volcánico y agua	56
29.	Adición de la arena estándar durante el mezclado	58
30.	Mezclado final para dar paso al ensayo de flujo	58
31.	Preparación de la mezcla previo a realizarse el ensayo de flujo	59
32.	Ensayo de flujo de una muestra combinada con cemento	60
33.	Lectura de 4 diámetros con un vernier luego del ensayo de flujo	60
34.	Apisonamiento del material, que consiste en 32 golpes en cada capa, para un total de 64	62

35.	Especímenes preparados para ingresar a la cámara de humedad.....	62
36.	Molde en cámara de humedad, protegido en su superficie contra el goteo por una plancha de plástico	63
37.	Especímenes almacenados en agua saturada con cal.....	64
38.	Cubos en proceso de medición y determinación de su peso	67
39.	Cubo en la máquina universal durante el ensayo a compresión.....	68
40.	Depósito de material desecho luego de ser ensayado	69
41.	Cubos IAR e IRC debidamente identificados	70
42.	Cubos cal-puzolana con la nomenclatura correspondiente (IRC)	70
43.	Cubos cemento-puzolana fallados a compresión luego del ensayo	71
44.	Desarrollo de la resistencia de 18 muestras con cemento durante el período de 28 días	79
45.	Desarrollo de la resistencia de 18 muestras con cal durante el período de 28 días	83

TABLAS

I.	Ubicación de las 18 muestras de material volcánico.....	24
II.	Características de la granulometría de los materiales	27
III.	Características físicas naturales	28
IV.	Requerimientos químicos del cemento tipo I ASTM C 150-11	48
V.	Composición química de la cal mediante el método de Fluorescencia de Rayos X (FRX).....	51
VI.	Nomenclatura utilizada en los ensayos.....	52
VII.	Mezcla de control	55
VIII.	Mezcla de prueba.....	55
IX.	Materiales para una mezcla IRC	65
X.	Parámetros IRC	71
XI.	Parámetros IAR.....	72
XII.	Valor del flujo respecto a la cantidad de agua requerida (IAR)	73

XIII.	Cantidad de agua requerida para cada muestra con respecto a su valor de flujo (IRC).....	74
XIV.	Resultados de la resistencia a 7 días (IAR).....	75
XV.	Resultados de la resistencia a 28 días (IAR).....	76
XVI.	Aumento de resistencia de 7 a 28 días (IAR).....	77
XVII.	Resultados de la resistencia a 7 días (IRC).....	80
XVIII.	Resultados de la resistencia a 28 días (IRC).....	81
XIX.	Variación de la resistencia de 7 a 28 días (IRC).....	82
XX.	Tabla comparativa de resultados de resistencia para IAR e IRC.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
P	Carga
cm²	Centímetros cuadrados
cc	Centímetros cúbicos
Cv	Coeficiente de variación
H	Contenido de humedad muestra
σ	Desviación Estándar
°C	Grados centígrados
G	Gramo
IAR	Índice de actividad reactiva
IRC	Índice de reactividad mecánica
Kg	Kilogramos
Mpa	Megapascal
ml	Mililitro
mm	Milímetro

%	Porcentaje
A/C	Relación agua cemento
f'c	Resistencia a la compresión
t	Tiempo

GLOSARIO

Abrasión	A la acción mecánica de rozamiento y desgaste que provoca la erosión de un material o tejido.
Adhesión	Es la propiedad de la materia por la cual se unen dos superficies de sustancia iguales o diferentes cuando entran en contacto.
Aglomerante	Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por métodos exclusivamente físicos.
Amorfa	Se aplica al cuerpo cuyas partículas forman una estructura interna desordenada.
ASTM	Siglas en inglés de American Society of Testing Materials. (Sociedad Americana para Ensayos en los Materiales).
Bitumen	Mezcla de líquidos orgánicos altamente viscosa, negra, pegajosa y compuesta por hidrocarburos.
Ceniza volcánica	Composición de partículas de roca y mineral muy finas eyectadas por un viento volcánico.

Clinker	Principal componente del cemento Pórtland, el cemento más común y, por lo tanto, del concreto.
Cohesión	Atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas de una sustancia.
Ensayo	Acción y resultado de ensayar.
Exotérmica	Se aplica al proceso químico o físico que se produce con desprendimiento de energía.
Evaporación	Es el proceso físico que consiste en el pasaje lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso.
Fraguar	Llegar a endurecerse el cemento u otra sustancia parecida en una obra de construcción.
Filamento	Cuerpo que tiene forma de hilo muy fino.
Hidratación	Combinación de un cuerpo o compuesto químico con el agua.
Lixiviación	Proceso en que un disolvente líquido pasa a través de un sólido pulverizado para que se produzca la dilución de uno o más componentes solubles del sólido.
Lote	Conjunto de cosas que tienen unas características comunes y que se agrupan con un fin.

Mezcla	Es un material formado por dos o más sustancias puras pero no combinadas químicamente.
Mineralogía	Rama de la geología que estudia las propiedades físicas y químicas de los minerales que se encuentran en el planeta en sus diferentes estados de agregación.
Molienda	Proceso que consiste en triturar una materia hasta reducirlo a trozos muy pequeños o a polvo.
Partícula	Es la menor proporción de materia de un cuerpo que conserva sus propiedades químicas.
Pasta	Parte del cemento que tiene la propiedad de rigidizarse progresivamente hasta constituir un sólido de creciente dureza.
Petrografía	Se ocupa del estudio e investigación de las rocas.
Puzolana	Materiales con alto contenido de silicio y aluminio, con poca o ninguna propiedad cementante si no hasta pasar por algún proceso físico o químico y combinadas con cal y agua.
Reactividad	Capacidad de reacción química que presenta ante otros reactivos.
Rigidez	Incapacidad o gran dificultad para torcerse.

RESUMEN

En este trabajo se evaluaron mecánicamente muestras de materiales seleccionados en el oriente y occidente de Guatemala, atendiendo a las recomendaciones que están establecidas en las Normas ASTM C 593-06 (2011) Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime y ASTM C 618-08 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. El objetivo fundamental fue evaluar el grado de reactividad de las muestras.

De acuerdo con los parámetros de las normas adoptadas, se demostró a través de los resultados obtenidos el alto grado de reactividad que los materiales desarrollaron durante el proceso de reacción. Se elaboraron gráficas que engloban todos los resultados, evidenciando la influencia de estos materiales sobre el cemento y la cal.

Esta investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. El trabajo forma parte del proyecto de investigación FODECYT No 023-2010, que actualmente se realiza en la Sección Eco-materiales del Centro de Investigaciones de Ingeniería -CII-, con el cofinanciamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología –CONCYT-, a cuyas instituciones se agradece el apoyo brindado.

OBJETIVOS

General

Evaluar experimentalmente el grado de reactividad mecánica en 18 muestras de puzolanas volcánicas de Guatemala, mediante procedimientos establecidos en los estándares internacionales.

Específicos

1. Determinar experimentalmente el grado de reactividad mecánica de 18 muestras de puzolanas volcánicas de Guatemala para uso con cemento Pórtland, mediante los requerimientos de la Norma ASTM C 618 -08 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
2. Determinar experimentalmente el grado de reactividad mecánica de 18 muestras de puzolanas volcánicas de Guatemala para uso con cal mediante los requerimientos de la Norma ASTM C 593-06 (2011) Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime.

INTRODUCCIÓN

Una puzolana de origen natural es aquél material cuya formación proviene de procesos naturales sin la intervención del hombre, estos materiales son productos de minerales que contienen una composición química silico-aluminosa, una estructura imperfecta o amorfa y, una textura de grano muy fino, que hacen adecuado el material para su uso como un aglomerante.

El territorio guatemalteco ha sido conformado por la intensa actividad volcánica, dando lugar a extensiones amplias de suelos y montañas formadas por materiales volcánicos depositados a lo largo de la historia geológica. Estos materiales, en su mayoría cenizas, al ser provenientes de las explosiones volcánicas han atravesado un proceso de formación que los caracterizan como puzolanas naturales; características como su estructura, textura, composición y granulometría han motivado investigaciones de numerosos bancos a lo largo del país que confirman efectivamente que Guatemala es un lugar que posee materiales altamente puzolánicos.

Precisamente en investigaciones anteriores se ha evaluado la reactividad mecánica de bancos de El Progreso, Ciudad de Guatemala y Chimaltenango, que han demostrado resultados aceptables de resistencia.

Para este trabajo se seleccionaron dieciocho muestras, nueve del oriente y nueve muestras del occidente de Guatemala para las cuales se evaluó la reactividad mecánica. Las muestras antes mencionadas precedían de una caracterización física, para la cual posteriormente correspondió evaluar la resistencia a la compresión; elaborando muestras para siete y veintiocho días de edad, resguardando las condiciones necesarias para que el proceso de reacción fuera el más adecuado posible.

La metodología empleada para la elaboración, ensayo y determinación de la reactividad mecánica de las muestras, corresponde a las Normas Internacionales de la ASTM C 593-06 (2011) Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime, para mezclas con cal, y la ASTM C 618-08 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, para mezclas con cemento.

Los resultados obtenidos en los ensayos a compresión de los materiales volcánicos evaluados, cumplen satisfactoriamente con los parámetros que establecen las Normas ASTM para siete y veintiocho días, esto permite aseverar que las muestras seleccionadas poseen un alto índice de reactividad puzolánica.

Esta investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. El trabajo forma parte del proyecto de investigación FODECYT No 023-2010, que actualmente se realiza en la Sección Eco-materiales del Centro de Investigaciones de Ingeniería -CII-, con el cofinanciamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología –CONCYT– a cuyas instituciones se agradece el apoyo brindado.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Definición de puzolana

Se considera en todas las definiciones posibles de puzolana como un material poseedor de un alto contenido especialmente de silicio y aluminio, con poca o ninguna propiedad cementante si no hasta pasar por algún proceso físico o químico y combinadas con cal y agua.

Una definición más amplia y acertada se refiere a una puzolana como “productos naturales o artificiales, silicios o silico-aluminosos que en sí mismos poseen poca o ninguna propiedad aglomerante ni de actividad hidráulica, pero finamente molidas, a temperaturas ordinarias y en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio formando compuestos que si tienen propiedades aglomerantes e hidráulicas”¹.

Se sobreentiende entonces por definición que la presencia de sílice en una puzolana es muy importante para la reactividad del material y su capacidad cementante, un material con un alto contenido de este mineral puede ser objeto de investigación.

1.2. Clasificación de las puzolanas

La clasificación de puzolanas es una herramienta útil que se hace para indicar la reactividad en función de diferentes propiedades significativas, en grupos que faciliten la selección.

¹ TOBON, J.I. Puzolanas en los alrededores de Irra. p. 78.

Muchos sistemas de clasificación se han propuesto, pero pueden ubicarse en dos categorías: “sistemas basados en la química y mineralogía del material y sistemas basados en la reactividad y características de comportamiento”².

1.2.1. Según su origen

Existen tres clasificaciones según las condiciones en que las puzolanas fueron formadas y que son muy importantes para determinar su comportamiento:

1.2.1.1. De origen natural

“Son todos aquellos materiales de origen mineral que provienen de erupciones volcánicas, sedimentaciones o algún proceso de formación natural sin intervención del hombre”³. Las puzolanas naturales son productos minerales con características composicionales (silico-aluminosos), estructurales (estructura imperfecta o amorfa) y texturales (grano fino) que los hacen aptos para su uso como aditivos activos en la industria del cemento y se dividen en:

- Orgánicas

Estas puzolanas de origen natural son aquellas provenientes de algún organismo vivo. Las puzolanas de origen orgánico como las Diatomeas, son sedimentos lacustres muy finos que se encuentran en depósitos, por la acumulación de algas microscópicas unicelulares que al morir se asentaron en el lecho marino. Como toda una buena puzolana, contienen una alta capacidad de retención de sílice al impregnar en sus membranas o paredes con ella.

² DAY, Robert. Pozzolans for use in low-cost housing. p.26.

³ TOBON, J.I. Puzolanas en los alrededores de Irra. p. 80.

- Inorgánicas

Estos materiales provenientes siempre de procesos naturales, pero no de seres vivos, son definidos “como materiales vítreos procedentes de las erupciones volcánicas que no llegaron a cristalizarse en su conformación estructural. Según su naturaleza, las puzolanas de origen volcánico más comunes se pueden encontrar como ceniza volcánica o arena pómez”⁴.

1.2.1.2. De origen artificial

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 Pórtland”⁵.

1.2.2. Según su comportamiento mecánico

Un sistema de clasificación conveniente basado en el comportamiento mecánico requiere de una base de datos de ensayos muy grande. Diversos estudios han sido realizados en evaluar materiales diferentes como puzolanas, en las cuales han requerido desarrollar diversos ensayos, un ejemplo es la evaluación de más de 530 muestras de puzolanas naturales de Estados Unidos que fue desarrollado por el *Bureau of Mines* del mismo país en 1969.

⁴ ZECEÑA, Carlos. Caracterización Físico-Mecánica y Química del Cemento Puzolánico. p. 25.

⁵ *Ibíd.*

En dicha evaluación se caracterizó el comportamiento mecánico basado en cuatro ensayos: “resistencia (actividad puzolánica), trabajabilidad (requerimientos de agua), serviciabilidad (contracción) y durabilidad (ataque álcali agregado), al igual que petrografía y ensayos físicos con métodos de ASTM fueron realizados y cada puzolana fue incluida en una clase dependiendo de su respuesta física, de la cual muy pocas (14) de las puzolanas no requirieron preparación y solamente 18 puzolanas tuvieron una calificación perfecta en cada uno de los requerimientos. Aludido al documento de investigación científica de Robert L. Day, publicado en 1990.

También se han caracterizado otros materiales, cenizas volcánicas y piedra pómez han sido evaluadas mecánicamente en Guatemala por su alta disponibilidad, Zeceña realizó un trabajo de graduación evaluando bancos de El Progreso, Ciudad de Guatemala, Chimaltenango y Alta Verapaz, cumpliendo tres de estos bancos con los requerimientos mínimos de resistencia a la compresión a excepción del banco proveniente de Alta Verapaz, dichos resultados fueron variables, el mejor banco según su resistencia fue El Progreso, seguido del banco de Ciudad de Guatemala y Chimaltenango.

Otras investigaciones han sido realizadas en el mundo. “En Ecuador se ha estudiado el uso de la zeolita y se ha comprobado la eficiencia al ser utilizado como material puzolánico al ser remplazado un porcentaje de cemento. Con este material se sustituyó un 20% de cemento, obteniendo resultados favorables del índice de reactividad puzolánica, ya que las resistencias a edades de 7 y 28 días, cumplieron satisfactoriamente lo que dictan las normas internacionales”⁶.

⁶ QUIÑONEZ, Francisco. Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos. p. 68.

Este tipo de clasificación parece ser más práctico que los otros. “El criterio para cada clase podría variar de país a país, pero los elementos básicos indicados en el sistema (resistencia, trabajabilidad, deformación y durabilidad) son los elementos esenciales de una buena puzolanidad”⁷.

“Una clasificación más simplificada basada en la resistencia (actividad) de morteros curados por 8 días a 50 grados centígrados, es la clasificación hindú”⁸. Que presenta los siguientes límites de resistencia y su interpretación:

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

En cuanto a la clasificación la ASTM 618 -08 “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Concrete”, tiene una clasificación y caracterización de la puzolana dividiéndola en tres grupos:

- 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.

⁷ QUIÑONEZ, Francisco. Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos. p. 71.

⁸ DAY, Robert. Pozzolans for use in low-cost housing. p.34.

- 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.

1.3. Proceso de reacción del cemento

Este proceso se lleva a cabo durante una interacción química de los compuestos del cemento al combinarse con el agua, que da como resultado final una pasta de cemento, que es muy compleja, multicomponente, de composición variable y porosa. Si bien no ha sido mencionado, es muy importante en este proceso la relación A/C, ya que cuando está fuera de los parámetros normales la resistencia de la estructura resultante no es buena.

Sin embargo, dentro de los diferentes componentes de la pasta, el más importante es sin duda el gel C-S-H o silicato cálcico hidratado, dicho gel representa el 70% de la pasta y es el principal responsable de la cohesión y propiedades mecánicas del material, pero muchos aspectos del gel incluyendo su composición exacta, son aún desconocidos o están bajo investigación.

1.3.1. Hidratación del cemento

Este proceso de hidratación es una reacción exotérmica muy importante que se da a partir de la interacción de los componentes básicos del cemento con el agua.

Luego del proceso de sintetización se llegó a que el origen de dichos componentes básicos del cemento son: silicato tricalcico o alita (C_3S), silicato dicalcico o belita (C_2S), aluminato tricalcico o celita (C_3A) y ferroaluminato tetracalcico o felita (C_4AF), tales componentes son los que forman el llamado clínker, parte fundamental del cemento.

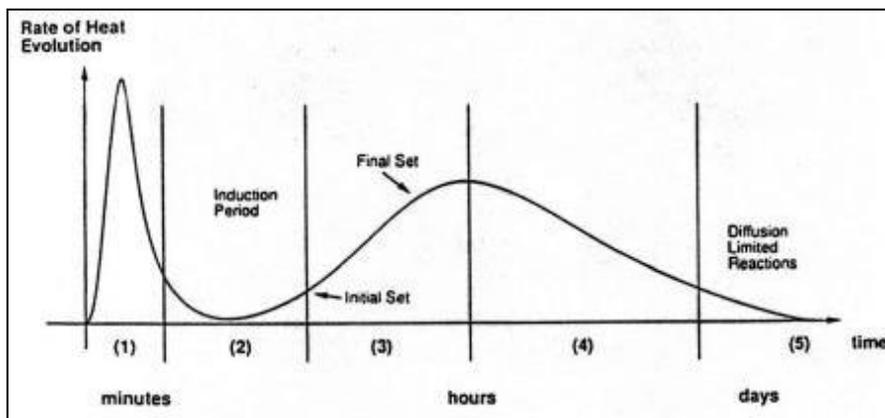
Se sabe que cada componente contribuye de manera distinta en el comportamiento mecánico del cemento:

- Silicato tricalcico o alita: es el primer componente básico del clínker, se encuentra aproximadamente en una proporción del 50-60%, en forma de cristales angulares o hexagonales y es importante en la resistencia inicial del cemento.
- Silicato dicálcico o belita: es el segundo componente y se encuentra en una proporción del 20-25%, con forma de cristales esféricos o redondeados, siendo responsable del endurecimiento inicial del cemento.
- Aluminato tricalcico o celita: en proporciones del 5-10% es el tercer componente básico del clínker, con forma de agujas grises agrietadas responsables del endurecimiento inicial en el cemento.
- Ferroaluminato tetracalcico: la más conocida C_4AF , es el cuarto componente básico del clínker, posee poco efecto en la funcionalidad del cemento.

Estos minerales al tener contacto con el agua reaccionan dando como resultado los siguientes productos hidratados: los silicatos tricálcicos se transforman en silicatos cálcicos hidratados (CSH) e hidróxido de calcio (CH), el aluminato tricálcico y el ferroaluminato tetracálcico forman Aft (etringita) y cloroaluminatos de calcio o sal de Friedel (Afm).

Estos compuestos se diferencian en el proceso ya que reaccionan a distintas velocidades y liberan cantidades diferentes de calor, siendo los aluminatos los que se hidratan más rápido definiendo el fraguado del cemento y liberan mucho calor en comparación con los silicatos; y entre silicatos la alita se hidrata más rápido que la belita, contribuyendo al tiempo de fraguado final y la ganancia de resistencia inicial.

Figura 1. **Proceso de hidratación del cemento**



Fuente: <<http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Microestructura%20del%20cemento.pdf>>. [Consulta: septiembre de 2011].

Como se puede observar existen 5 etapas:

- **Preinducción:** es una hidratación inicial rápida que ocurre cuando las partículas de cemento entran en contacto con las partículas de agua, liberando calor mediante un proceso exotérmico en la reacción.
- **Inducción:** se lleva a cabo una reducida hidratación y no se sabe aún la razón.
- **Aceleración:** se realiza un incremento en la tasa de hidratación. En esta etapa comienza el fragüe.
- **Desaceleración:** disminuye la tasa de hidratación a medida que el material hidratado cubre las partículas, formando una estructura de CSH, más densa.
- **Difusión limitada:** la hidratación y la conglomeración ocurren en pequeñas cantidades ya que están limitadas a las tasas de difusión de las especies dentro de la red densa de poros.

1.3.1.1. El agua en la hidratación

Durante el proceso de hidratación el agua puede encontrarse en diferentes estados:

- **Agua químicamente ligada:** es aquella que forma parte de la reacción química con los compuestos del cemento.

- Agua físicamente ligada: es aquella que se encuentra absorbida a la superficie de la partícula del gel y ocupa los poros del gel.
- Agua libre: resto del agua que se encuentra en la pasta saturada y ocupa los poros capilares.

Adam Neville, deduce que la cantidad de agua no evaporable (químicamente ligada) es de aproximadamente un 18% del peso del material no hidratado y cerca del 23% en un cemento completamente hidratado.

1.3.1.2. Proceso de hidratación en la microestructura del cemento

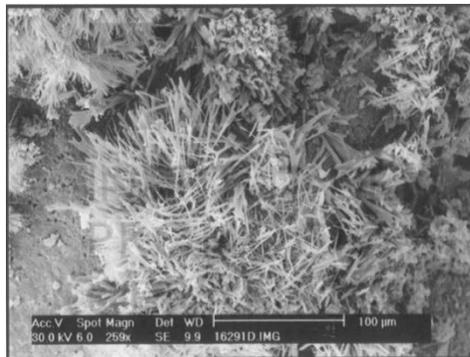
La importancia del estudio del proceso de reacción del cemento a nivel microestructural, ayuda a comprender las propiedades y características de uno de los componentes más importantes de la pasta de cemento, el gel C-S-H, que se forma durante la hidratación.

Para conocer cómo se desarrolla el proceso de hidratación en una mezcla, se han realizado varios modelos en función de diferentes aspectos como el tamaño, tipo, cantidad de partículas o incluso el volumen, la temperatura, la relación A/C y su composición química, tomando uno o varios de estos aspectos puede predecirse de forma aproximada el comportamiento microestructural durante este proceso.

Pero actualmente con el uso de la tecnología puede observarse este proceso mediante fotografías digitales haciendo uso de un microscopio de barrido electrónico que provee imágenes (en blanco y negro) internas de la formación microestructural del material.

Con esta tecnología, puede visualizarse a detalle qué ocurre durante la hidratación del cemento. La adherencia mecánica se manifiesta en los morteros de cemento en procesos sucesivos conforme el tiempo pasa. En la figura 2, pueden observarse los filamentos del cemento hidratado.

Figura 2. **Detalle microscópico del fenómeno de la hidratación del cemento**



Fuente: RAMACHANDRAN, V.S. Concrete admixture Handbook. p. 24.

La adhesión mecánica se produce por el enlazamiento que se crea en la hidratación del cemento (CSH), al producirse silicato cálcico hidratado. Los filamentos o agujas actúan a corta distancia y proveen de cohesión al mortero, enlazan y aglomeran los áridos presentes, son responsables de las características físicas del mortero una vez endurecido y constituyen el anclaje a los poros y textura de las superficies con las que entran en contacto.

Tras varios años de investigación del proceso de hidratación del cemento a nivel micro, se ha logrado, entre otras cosas, establecer una clara relación entre las propiedades mecánicas del gel C-S-H y la estructura interna de las nanopartículas que lo componen.

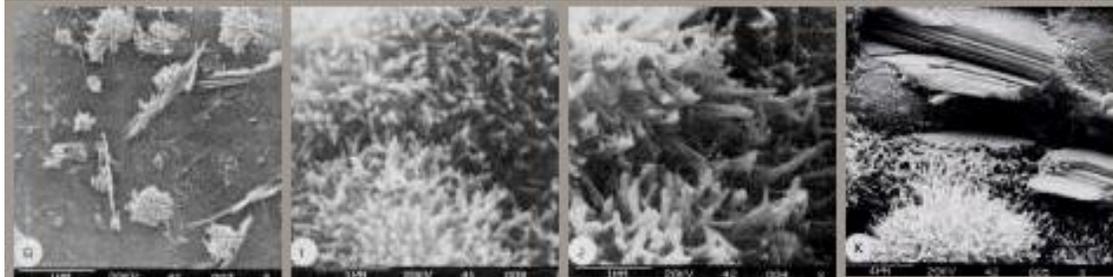
El gel C-S-H se compone de nanopartículas coloidales que se agregan de diferentes maneras para formar el material. La manera en que dichas nanopartículas se ordenan entre sí es probablemente el factor que más influye en las propiedades mecánicas del cemento. Cuanto más juntas estén y menos espacio haya entre ellas, el gel C-S-H es más denso y sus propiedades mecánicas mejoran.

Pero no es este el único factor a tener en cuenta. La estructura interna de cada una de estas partículas también afecta al total. Se sabe que cada partícula está formada por láminas de óxido de calcio rodeadas de cadenas de silicatos de diferente longitud. Manzano ha comprobado que, cuanto más largas son estas cadenas de silicato, las propiedades individuales de cada partícula mejoran, lo que provoca una mejora de las cualidades totales del gel C-S-H.

A partir de estos resultados, Manzano concluye que las propiedades mecánicas del cemento podrían mejorar hasta en un 30% si durante su hidratación se consigue promover la formación de cadenas de silicato más largas y geles C-S-H más compactos.

En la figura 3, se aprecia el desarrollo de estos filamentos (hidratación) a partir del momento de la aplicación del mortero y paralelamente a su endurecimiento y en la fase final de endurecimiento del mortero, una vez completada en su mayor parte la hidratación, se produce el enlace de estos filamentos. Este es el proceso que explica las propiedades mecánicas de los morteros una vez endurecidos y también explica la rigidez de los mismos.

Figura 3. **Proceso de hidratación de los conglomerados del cemento bajo el microscopio**



Fuente: RAMACHANDRAN, V.S. Concrete admixture Handbook. p. 25.

En la secuencia de imágenes de izquierda a derecha de la figura 3, se observa que en la primera fotografía no se ha producido la hidratación del silicato tricálcico, luego la siguiente es una representación de lo que sucede a los tres días, en las que partículas se cubren con los filamentos de hidratación, luego la aproximación a las fibras o filamentos de cada partícula se llevan a cabo en la imagen posterior y por último el enlace entre fibras plenamente desarrolladas y formaciones tabulares de Ca(OH)_2 a los 28 días.

1.3.1.3. Influencia de la temperatura de curado en el proceso de hidratación

La velocidad con la que se desarrolla la resistencia a compresión en una pasta de cemento, va en función de la velocidad con que se hidratan sus cuatro componentes principales, a temperaturas normales de curado de 10-25 grados centígrados el porcentaje de alita que se hidrata a los 28 días es cercano al 100%. La belita, en cambio, es más lenta de reaccionar y es la principal responsable de la hidratación una vez superados los 28 días.

El aumento de temperatura tiene un efecto acelerador del proceso de hidratación de la alita, que es más marcado que en el caso de la belita. Diferentes investigaciones han enmarcado la influencia que tiene las elevadas temperaturas en la disminución de la resistencia a la compresión a largo plazo, así como, el riesgo que se produzcan microfisuras.

1.4. Reactividad en puzolanas

El gran aporte de las puzolanas es fundamentalmente el sílice y aluminio, y por ende poseen un Ph (potencial de hidrógeno) ácido, lo cual las hace afines a combinarse con la cal en presencia de agua a temperatura ambiente. Además la puzolana está compuesta de fase vítrea en su mayor parte, siendo la fase cristalina muy pequeña, convirtiéndoles en materiales muy reactivos.

Debe aclararse que “la cantidad de vidrio no necesariamente determina la puzolanidad, un ejemplo es el trass Bavariano que tiene mayor contenido de vidrio que el Rhenish, el trass Rhenish es más puzolánico a causa que su vidrio tiene una reactividad más alta”⁹.

Por lo tanto “destaca que no todos los materiales volcánicos deben su reactividad solamente a la presencia de vidrio en su estructura interna, ya que también la reactividad se ve afectada por la presencia de compuestos zeolíticos alterados en materiales volcánicos según su origen. Tales zeolitas son aluminosilicatos hidratados, que no contienen barro que es quien disminuye la resistencia de la mezcla y por lo tanto la reactividad. Su estructura porosa retiene la humedad lo que facilita que la mezcla cure más rápidamente”¹⁰.

⁹ QUIÑONEZ, Francisco. Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos. p. 74.

¹⁰ Ibid.

Las puzolanas necesitan tener ciertas características así como de estar prestas a modificaciones en su forma física, al variar el tamaño de sus granos a más finos para ser más reactivas, necesitando estar en un ambiente de alta humedad para reaccionar con el hidróxido de calcio $CA(OH)_2$, que desempeña la función de activador a temperatura ambiente, dando lugar a compuestos estables, poco solubles en agua que poseen características cementantes, es decir, capaces de desarrollar resistencia por endurecimiento hidráulico (por medio de agua).

1.4.1. Proceso de reacción puzolánica

Al igual que en la reacción del cemento, en puzolanas se forma el silicato cálcico hidratado (C-S-H) de manera similar y tiene la misma gran importancia en el desarrollo de la pasta, en su contribución a la cohesión y propiedades mecánicas.

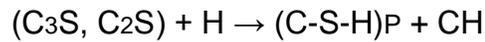
Cuando una puzolana se usa en combinación con el cemento Pórtland, este durante su hidratación, es la fuente de hidróxido de calcio que reacciona con los aluminosilicatos presentes en la puzolana para formar compuestos cementantes.

La reacción puzolánica está representada en la siguiente relación estequiométrica:



Donde (C-S-H)_s, es el silicato de calcio hidratado de estequiometría no definida.

Análogamente puede ilustrarse la reacción de hidratación de cemento como:



Como puede observarse en las relaciones estequiométricas, efectivamente el cemento es el proveedor del hidróxido de calcio necesario para que la puzolana pueda activarse y ser reactiva en su combinación con el cemento y otros componentes.

1.5. Reactividad mecánica en puzolanas

La reactividad mecánica es la capacidad adecuada del material a soportar esfuerzos mecánicos provocados por la aplicación de una fuerza externa, tal capacidad de resistencia depende de numerosos factores que han sido explicados anteriormente.

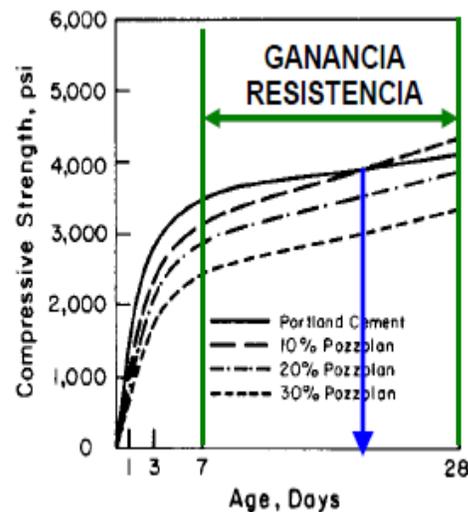
El uso de puzolanas en cemento atribuye una mejora en varias propiedades mecánicas del cemento:

- Mayor durabilidad del cemento
- Mejora la resistencia frente al agua de mar
- Mejora la defensa ante los sulfatos y cloruros
- Aumento de la resistencia a la compresión
- Incremento de la impermeabilidad por la reducción de grietas en el fraguado
- Disminución del calor de hidratación
- Mejora en la resistencia a la abrasión
- Menor necesidad de agua

Estas mejoras son la contribución de la puzolana durante el proceso de reacción con el cemento, siendo las más significativas el aumento de la resistencia, la disminución del calor de hidratación, la prolongada durabilidad y mayor impermeabilidad debida a la reducción de vacíos, ya que la puzolana para esta propiedad se comporta como un *filler*.

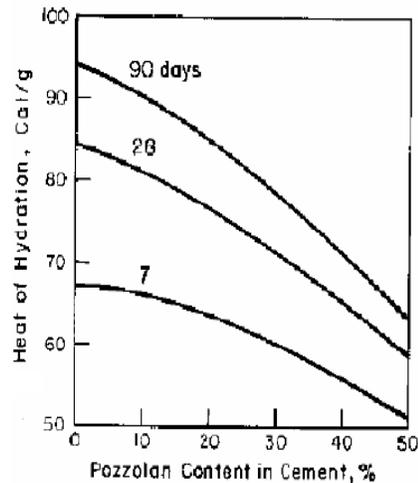
En la figura 4, puede observarse el comportamiento mecánico de una puzolana a diferentes porcentajes de sustitución por el cemento, donde puede apreciarse que a partir de la edad de 7 días, la contribución de la puzolana en la resistencia es importante.

Figura 4. **Resistencia de cementos mixtos conteniendo una puzolana o escoria de alto horno**



Fuente: <<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Reaccion.PUZOLANICA.pdf>>. [Consulta: octubre de 2011].

Figura 5. **Efecto de la sustitución del cemento por puzolana natural en el calor de hidratación del cemento**

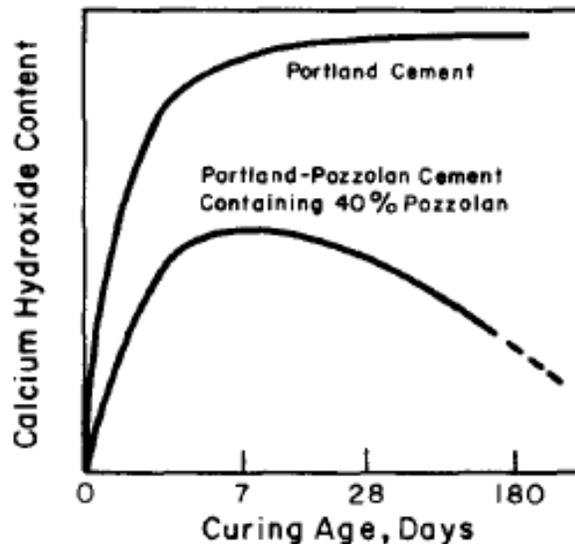


Fuente: <<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Reaccion.PUZOLANICA.pdf>>.

[Consulta: octubre de 2011].

El hidróxido de calcio sobrante en el cemento es el culpable que este tenga una resistencia baja a los sulfatos y ambientes ácidos, reduciendo su durabilidad. La puzolana al ser combinada con el cemento consume el hidróxido de calcio dando como resultado una alta resistencia en medios con alto contenido de sulfatos.

Figura 6. **Efecto del tiempo de curado y el contenido de puzolana (escoria) sobre el contenido de hidróxido de calcio en la pasta de cemento**



Fuente: <<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Reaccion.PUZOLANICA.pdf>>. [Consulta: octubre de 2011].

Como se puede observar en la figura 6, al principio del proceso de curado el contenido de hidróxido de calcio del cemento aumenta debido a la hidratación del cemento Portland presente. Sin embargo, comienza a disminuir con el progreso de la reacción puzolánica.

Entonces conforme haya más contenido de puzolana el hidróxido de calcio será mucho menor, pero generalmente en el cemento Portland puzolánico se utiliza un 20-30% de puzolana, para no afectar tanto las otras propiedades de la pasta de cemento que serían alteradas con un incremento demasiado alto en la cantidad de puzolana, como en la resistencia.

1.6. Como medir la reactividad mecánica

Por ensayos de resistencia se logra medir la reactividad puzolánica de una mezcla de material. Dichos ensayos de resistencia están especificados en normas internacionales como la ASTM C-593 "Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime" y C-618 "Standard especification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Concrete", que son las que se aplican para el ensayo de mezclas con cemento adicionado con puzolana y mezclas de cal con puzolana.

Estas normas indican parámetros de resistencia mínimos que debe cumplir en su resistencia a la compresión a 7 y 28 días, que son las edades en las que se conoce hay una evolución importante de la resistencia, dichos valores se profundizarán, así como, a las normas que les rigen, más adelante en el desarrollo experimental de este trabajo de investigación.

Como se dijo anteriormente, el grado de reactividad de una puzolana se mide en función a su valor de resistencia a la compresión. La ASTM da una clasificación de la reactividad:

- Pobre o inactiva, si la resistencia es menor de 2,6 megapascales
- Intermedia, si la resistencia está entre 2,6 y 5,6 megapascales
- Activa, si la resistencia es mayor de 7 megapascales

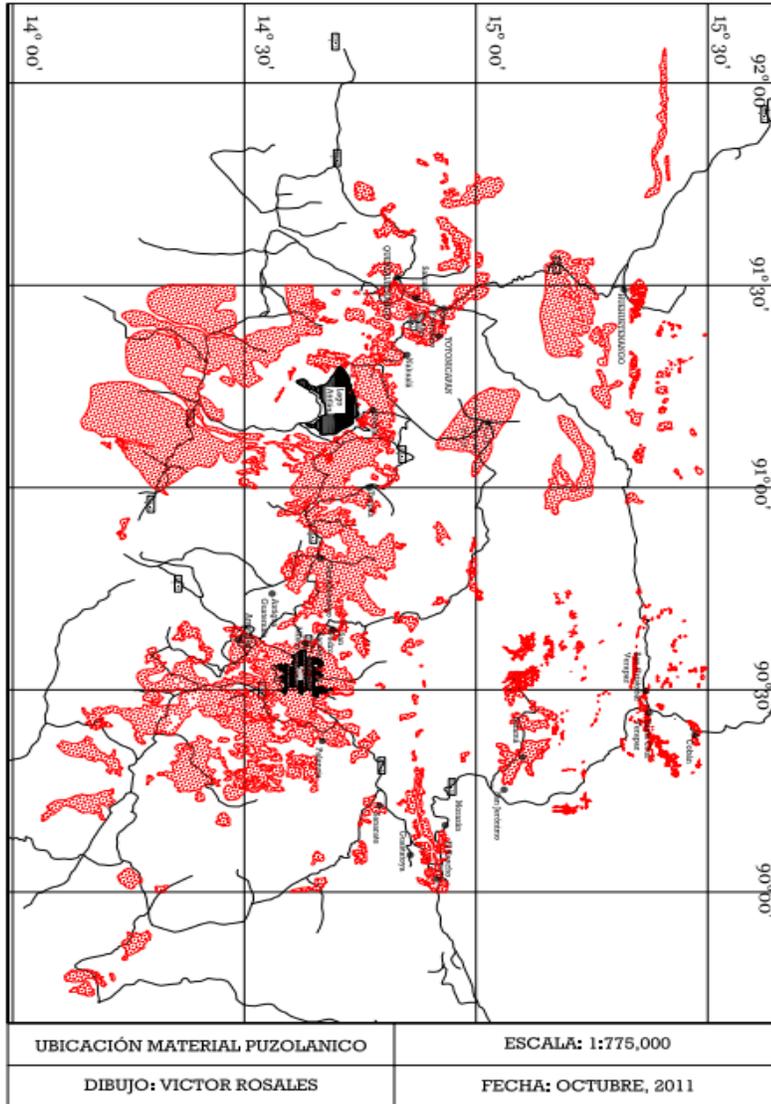
En países como Guatemala, no se necesita cumplir con estos requerimientos ya que las normas no fueron escritas para las prácticas de construcción en países en desarrollo, sin embargo, se pueden tomar como parámetros en la investigación de nuevos materiales de origen local.

1.7. Disposición de materiales volcánicos en Guatemala

Guatemala debido su amplia y diversa geología, ha sido objeto de diversas investigaciones geológicas, especialmente en el campo de la vulcanología, científicos extranjeros fueron los pioneros en la geología guatemalteca, geólogos y vulcanólogos de renombre como Von Seebach, Carl Sapper, entre otros comenzaron a indagar en territorio Guatemalteco en busca de respuestas al origen, formación y contenido de materiales volcánicos.

Estas investigaciones han sido importantes a causa de la información contenida, ya que han permitido la elaboración de mapas geológicos y topográficos del país mediante recorridos detallados de estos lugares. Esta información cartográfica involucra el origen, localización y hasta áreas que cubren los materiales puzolanicos presentes en Guatemala.

Figura 7. Disposición del material volcánico



Fuente: ROSALES RIVAS, Víctor Rafael. Geología y caracterización física de puzolanas de la zona Oriental de Guatemala, Anexos.

Se observa en la figura 7 la localización detallada de los bancos de materiales puzolanicos, para Guatemala son muy extensos. Investigaciones han determinado la mayoría de pómez y ceniza volcánica se encuentran presentes en estos lugares.

2. MARCO EXPERIMENTAL

En los siguientes apartados se describen las características de las muestras; tanto físicas como geográficas, que brindan información acerca del lugar de origen, color, fineza, tipo de roca, tamaño de grano, etcétera. Luego se indica la metodología sustentada por normas internacionales utilizadas para estos tipos de ensayo que fundamentaron los resultados obtenidos mediante las indicaciones en cuanto a las proporciones, material, equipo, procedimientos de elaboración de mezclas y ensayos, así como, los parámetros que cumplieron las muestras volcánicas que determinaron su reactividad.

2.1. Características de las muestras seleccionadas

Es necesario el conocimiento de las características físicas de las muestras, así como, su ubicación geográfica, ya que es una parte condicionante de la reactividad mecánica y de la disponibilidad del material respectivamente.

Cabe destacar que toda la información física y geográfica de las 18 muestras aquí presentadas luego de una preselección de varios materiales extraídos al oriente y occidente del país, es una recopilación de la información presentada en los trabajos de graduación de los ingenieros civiles Víctor Rafael Rosales Rivas y Luís Alfredo Ochoa Marroquín, trabajos en los cuales podrá consultarse este tipo de información de forma más detallada.

2.1.1. Características geográficas

Se seleccionaron 18 muestras, concretamente de lugares como Quetzaltenango, Totonicapán, El Progreso, Ciudad de Guatemala, entre otros son algunos de los departamentos a los cuales pertenecen estas muestras escogidas cuidadosamente, según varios documentos de investigación elaborados con anterioridad.

Tabla I. **Ubicación de las 18 muestras de material volcánico**

No	Nombre del banco	Ubicación	ID muestra	Coordenadas		Altura (msn)	Depto.
				Latitud (N)	Longitud (W)		
1	Guastatoya	Camposanto Guastatoya	1GC	14° 51' 24,6"	90° 4' 42,3"	538	El Progreso
2	Tecpán	km. 86,3 Carretera CA-1	2T	14° 45' 23,7"	90° 58' 32,8"	2 347	Chimalte-nango
3	San Cristóbal Verapaz	Carretera Santa Cruz Verapaz hacia San Cristóbal Verapaz	2SC	15° 22' 20,4"	90° 27' 4,2"	1 393	Alta Verapaz
4	Palencia	km 22 ruta CA-9 a Palencia	1P	14°41' 2,44"	90°22' 1,84"	989	Guatemala
5	La Canoa	km. 76+750 carretera a Patzún	LC	14° 39' 34,2"	90° 58' 17,7"	2 099	Chimalte-nango
6	Aristondo	Carretera Cobán a Morazán	ARIS	14° 56' 46,4"	90° 07' 33,1"	356	El Progreso
7	San Francisco el Alto	km. 187,13 Carretera CA-1, cerca de la entrada a la población de San Francisco el Alto.	SFA	14° 55' 40,2"	91° 26' 21,8"	2 442	Totonicapán

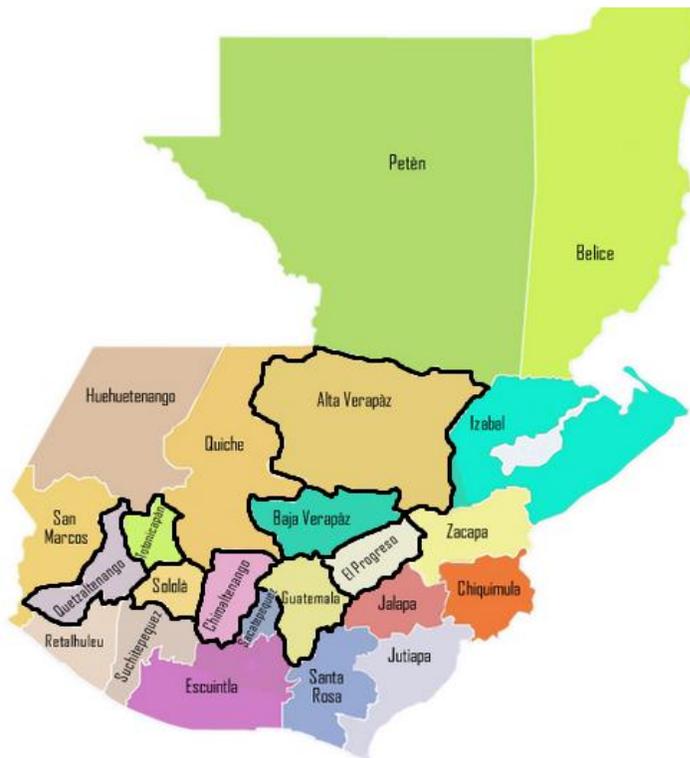
Continuación de la tabla I.

8	Barrio Santa Elena	Salamá	1S	15° 05' 53,7"	90° 18' 23,9"	941	Baja Verapaz
9	Salcaja	Bloquera San Francisco y gasolinera Santiago.	SX1	14° 51' 37,5"	91° 28' 20,4"	2 350	Quetzaltenango
10	Marujama	Carretera Cobán a Morazán	1M	14°55' 6,74"	90°06' 7,78"	368	El Progreso
11	Salcaja	Bloquera San Francisco y gasolinera Santiago.	SX2	14° 51' 37,5"	91° 28' 20,4"	2 350	Quetzaltenango
12	Nahualá	km. 160, carretera CA-1	1N	14° 50' 2,2"	91° 19' 51"	2 496	Sololá
13	Niño Perdido Salamá	km 147 de Rancho a Cobán	1NPS	15° 08' 8,8"	90° 10' 39"	1 494	Alta Verapaz
14	San Cristóbal Verapaz	Carretera Santa Cruz Verapaz hacia San Cristóbal Verapaz	1SC	15° 22' 20,4"	90° 27' 4,2"	1 393	Alta Verapaz
15	Bárceñas	Bárceñas camino a Villa Nueva.	BAR FINO 2	14° 33' 19"	90° 37' 34,5"	1 653	Guatemala
16	El Rancho	km 84 CA-9	1R	14° 54' 46,4"	90° 01' 12,6"	350	El Progreso
17	Tecpán	km. 86,3 Carretera CA-1	2T'	14° 45' 23,7"	90° 58' 32,8"	2 347	Chimaltenango
18	Comalapa	km. 74+800 de la CA-1 hacia Comalapa.	1C	14° 41' 57,9"	90° 54' 6,8"	2 046	Chimaltenango

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla I, la ubicación geográfica de los materiales seleccionados indica ocho departamentos de Guatemala, ejemplificando las regiones metropolitana, norte, oriente y occidente del país, como los lugares a los cuales pertenecen.

Figura 8. **Localización de los departamentos donde provienen los materiales volcánicos**



Fuente: <<http://www.mcd.gob.gt/2009/10/27/prueba-mapa/>>. [Consulta: octubre de 2011].

2.1.2. Características físicas

Los materiales volcánicos en estado natural presentaban granulometría diferente, teniendo que moler el material en estado natural para alcanzar una fineza adecuada, ya que algunos materiales como la piedra pómez eran de granos muy gruesos.

Tabla II. **Características de la granulometría de los materiales**

No	Muestra	% Humedad	% pasa tamiz ¼"	% pasa tamiz No. 30	% pasa tamiz No. 200	% pasa tamiz No. 325 (3 h)
1	1GC	12,12	99,11	88,00	47,00	99,68
2	2T	23,73	86,35	71,00	23,00	99,64
3	2SC	3,03	97,95	90,00	32,00	97,23
4	1P	16,67	-----	60,00	20,83	99,76
5	LC	9,09	---	65,25	20,83	99,16
6	ARIS	19,70	99,75	89,00	25,14	99,40
7	SFA	4,55	-----	75,75	31,27	99,64
8	1S	1,52	98,98	92,00	22,50	99,76
9	SX1	25,24	73,15	61,28	29,50	99,28
10	1M	10,00	-----	73,00	11,07	99,16
11	SX2	10,61	99,71	62,50	31,47	98,28
12	1N	32,21	---	39,00	5,33	99,64
13	1NPS	9,09	99,02	88,00	31,56	99,28
14	1SC	17,55	93,32	85,00	37,50	98,56
15	BAR FINO 2	2,50	----	68,13	29,00	98,80
16	1R	12,13	----	93,00	38,17	99,40
17	2T´	31,82	----	72,50	22,13	99,16
18	1C	6,97	95,60	78,50	27,00	74,86

Fuente: elaboración propia.

Para estos materiales existen características que pueden identificarse a simple vista como el color y tipo de roca, en otras se necesitan ensayos de laboratorio, en la siguiente tabla se conjuntan estas características que se consideran importantes y que pueden relacionarse de alguna manera con el desarrollo de la resistencia.

Tabla III. **Características físicas naturales**

No	Muestra	Densidad (g/cc)	S.E (cm ² / g) (Finura Blaine)	% FS	Pérdida por ignición	Color	Tipo de roca
1	1GC	2,376	2 922	12,40	2,35	Rosado	Ceniza
2	2T	2,381	3 619	20,75	2,75	Beige	Pómez
3	2SC	2,370	6 630	15,65	3,10	Rosado	Ceniza
4	1P	2,383	5 086	19,40	2,47	Blanco	Toba
5	LC	2,387	3 220	18,10	3,14	Beige	Pómez
6	ARIS	2,392	4 212	14,95	3,03	Blanca	Ceniza
7	SFA	2,364	3 036	11,85	2,26	Rosado	Ceniza
8	1S	2,457	4 712	12,25	2,65	Blanca	Ceniza
9	SX1	2,464	7 441	17,60	2,32	Blanca	Pómez
10	1M	2,548	4 612	13,05	1,87	Beige	Pómez
11	SX2	2,430	4 059	15,05	2,09	Blanca	Pómez
12	1N	2,522	5 469	12,45	1,67	Blanco	Pómez
13	1NPS	2,332	9 463	18,25	3,14	Beige	Pómez
14	1SC	2,374	6 769	17,25	3,46	Rosado	Ceniza
15	BAR FINO 2	2,600	3 983	16,84	1,91	Gris	Pómez
16	1R	2,376	4 274	12,90	2,60	Rosado	Ceniza
17	2T'	2,372	6 368	11,78	2,63	Beige	Pómez
18	1C	2,395	3 800	17,75	2,66	Rosado	Toba

Fuente: elaboración propia.

Estudios han verificado a medida que los granos del material son más pequeños (aumento de fineza Blaine), adquiere una mayor reactividad, hasta llegar a determinada fineza, esto significa que llegado a este valor por más que se intente moler, el material no será más reactivo.

El ensayo de pérdida por ignición se refiere a la pureza o más bien la cantidad de materia orgánica que hay contenida en la muestra en estado natural, mientras menos impurezas contengan las muestras, mas será la cantidad de material que reacciona, influyendo en el aumento de la resistencia.

La finalidad es encontrar alguna relación, si la hubiere, de las características físicas con el desarrollo de la resistencia. El tipo de roca y color, puede ser un medio para relacionar el desarrollo mecánico con el origen mineralógico y establecer de alguna manera un punto en común.

2.2. Metodología

La metodología descrita a continuación es una combinación del procedimiento indicado en las Normas ASTM y en cuyas fotografías se ilustra la forma en que se elaboró la parte experimental durante el proceso de investigación. De manera que la metodología en el trabajo de investigación se ilustra en las fotografías tomadas durante el desarrollo en el laboratorio.

Los dos tipos de mezclas elaboradas se utilizaron para determinar la reactividad mecánica de las 18 muestras de cuales se realizaron combinaciones de cal-puzolana y cemento-puzolana y están indicadas por las Normas ASTM C 593-06(2011) "Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime", para la combinación con cal, y ASTM C 618-08 "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", para la combinación con cemento. Dichas normas establecieron los procedimientos a seguir como el equipo y las condiciones necesarias. También hacen referencia a normas auxiliares que indican el procedimiento para la hechura de mezcla y realización de ensayos.

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Debido a la falta de equipo, materiales y herramientas requeridos por las normas internacionales se diseñó y construyó el equipo necesario para llevar a cabo dichos procedimientos.

A continuación serán descritos los materiales, equipos y herramientas utilizadas en el desarrollo de la parte experimental.

2.2.1. Equipo

En el equipo utilizado se tuvieron los mayores inconvenientes, ya que no se contaba con lo necesario, la cámara de humedad y almacenamiento, fueron construidas, mientras el diseño y construcción de la cámara de vapor tuvo que ser solicitada a una empresa especializada en este tipo de equipos en Guatemala debido a lo complejo de su diseño y funcionamiento.

2.2.1.1. Diseño y construcción de cámara de humedad

El diseño de la cámara de humedad se realizó para el almacenamiento de los especímenes hechos de las mezclas cal-puzolana y cemento-puzolana, ambos tipos de especímenes necesitaron de estas condiciones que brinda la cámara de humedad durante su proceso de curado.

La cámara de humedad se diseñó según los requerimientos de la Norma ASTM C 511-09 "Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes", dicha norma no especifica un patrón de diseño, pero sí condiciones que deben darse durante el curado de estos especímenes dentro de la cámara de humedad, siendo la de conservar una humedad relativa de por lo menos 95%, una temperatura de 23 +/- 2 grados centígrados, debe ser hecha de materiales durables, tener humedecidas las paredes de la cámara constantemente o teniendo un sistema de riego que permita la generación de dicha humedad.

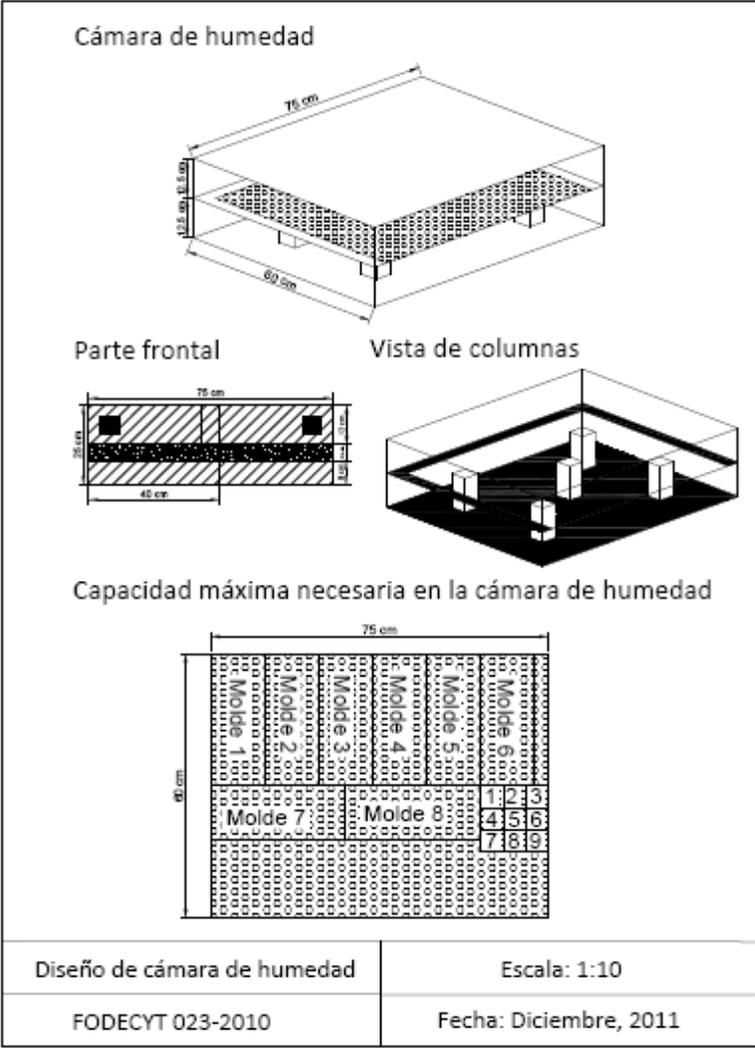
Conociendo los requerimientos de la Norma ASTM C 511-09, se realizó el diseño, teniendo en cuenta como primer aspecto importante las dimensiones de dicha cámara, estas se hicieron con base en el cronograma de trabajo de realización de las mezclas, en el cual se determinó que el almacenamiento máximo sería de 8 moldes con dimensiones de 30 x 12 x 6 centímetros, a esta cantidad se le agregó un factor de prevención que determinó las dimensiones finales de 80 x 60 x 25 centímetros, teniendo una capacidad máxima para 11 moldes.

La cámara es de dos niveles, el primero es utilizado como el depósito de agua en el cual está instalado un sistema de riego que funciona constantemente, generando y manteniendo la humedad dentro de la cámara, en el segundo nivel se almacenan los moldes de las mezclas cemento-puzolana por veinticuatro horas y los cubos de cal-puzolana durante 21 días, los materiales utilizados para la elaboración de la cámara de humedad, son todos reciclados los cuales se describirán a continuación conjuntamente con la funcionalidad que tienen:

- Vidrio: reciclado dentro de las instalaciones de la USAC, algunos de espesor de cinco y seis milímetros, suficientemente grueso para el uso requerido, debido a que algunas planchas eran recicladas y tenían partes fraccionarias. El vidrio se cortó a la medida necesaria y fue utilizado para la elaboración de las paredes laterales, trasera y la base de la cámara de humedad.
- Plástico: reciclado de igual manera dentro de las instalaciones de la USAC, a este material se le fueron removidos residuos de silicón viejo obteniendo un aspecto desgastado, pero aún así con las condiciones necesarias, teniendo que ser cortado a las dimensiones que se requerían, utilizando este material para dar forma al techo de la cámara y las puertas corredizas que solicitaba la norma.
- Varillas cuadradas de metal: recicladas de un viejo armario, fueron pintados con un anticorrosivo y cortados a la medida, su función es apoyar la base del segundo nivel desde abajo (cinco columnas), a los lados (apoyos laterales y al fondo) y a la parte superior de la cámara (soporta a lo largo del techo).
- Bandeja: la norma indica que tiene que haber humedad en toda la cámara y esta es generada únicamente en el primer nivel, la forma en que sube al segundo es a través de la base del segundo nivel, para esto se necesitó una bandeja metálica que contiene pequeños agujeros en toda su superficie, pero suficientemente fuerte para soportar los moldes, (aunque por precaución fueron implementados los apoyos) esto permitió que la humedad ascendiera, generando las condiciones que solicitaba la norma.

- Bomba de succión: es la que hace posible el movimiento del agua, esta bomba succiona el agua del depósito y la impulsa a través de una manguera plástica con pequeños agujeros que están a una distancia equidistante, recorriendo toda la cámara de humedad, este movimiento hace posible la generación de un alto porcentaje de humedad relativa.
- Materiales no reciclados: se utilizó silicón para la adhesión del vidrio y todos los demás materiales, así también la implementación de rieles de metal para las puertas corredizas y *duroport* para cubrir el espacio libre del primer nivel.

Figura 9. **Cámara de humedad según requerimientos de la Norma C 511-09**



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Cámara de humedad en funcionamiento**

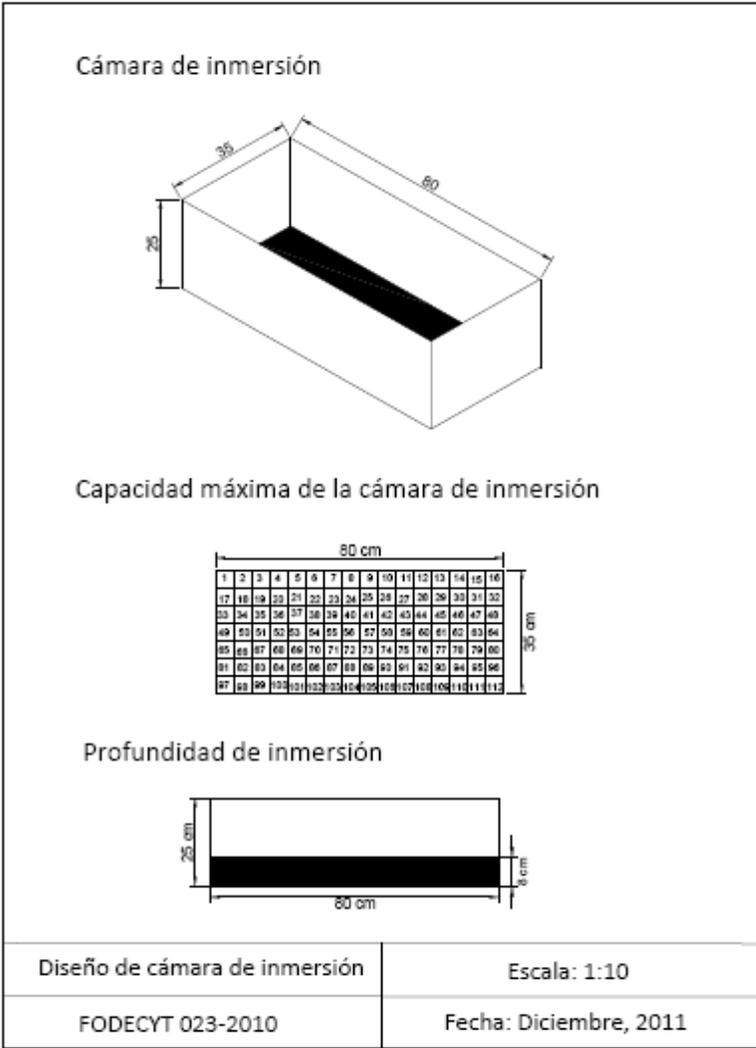


Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-,
USAC.

2.2.1.2. Diseño y construcción de cámara de inmersión

Los requerimientos para la cámara de inmersión también están indicados en la Norma ASTM C 511 “Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes”, indicando que debe contener agua con cal saturada en una relación de 3 gramos/litro, esto con motivo de mantener la alcalinidad dentro de la cámara y evitar que la lixiviación en los cubos tome lugar en el curado, el diseño consiste únicamente en una caja de vidrio de 90 x 34 x 36 centímetros y tiene un motor para pecera que mantiene el agua con cal en constante movimiento circulando alrededor de los cubos, impidiendo la formación de algún tipo de microorganismo indeseado.

Figura 11. **Cámara inmersión según requerimientos de la Norma ASTM C 511-09**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Cámara de inmersión en funcionamiento, saturada con agua y cal, a una altura de 8 cm**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

Se agregó agua a una altura de 8 centímetros, suficiente para mantener los cubos en completa inmersión con cal ya que tienen una altura de 5 centímetros. Para la realización y funcionamiento de la cámara de inmersión únicamente se utilizó el vidrio reciclado, una bomba de agua y silicón.

Figura 13. **Arriba la cámara de humedad y abajo la cámara de inmersión en funcionamiento desde una vista lateral**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

2.2.1.3. Instalación de la cámara de curado a vapor

La cámara de curado a vapor contiene tres principales sistemas: generación de calor, aireación y control electrónico, permitiendo que se cumplan las especificaciones la Norma ASTM C511-09 “Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes”, las condiciones necesarias según la norma que se obtuvieron dentro de dicho equipo, indica una temperatura de 54 ± 2 grados centígrados y un ambiente completamente saturado de humedad de por lo menos el 95%.

La cámara contiene en su base un depósito de agua, que es caldeado por una resistencia que se encuentra introducida en el depósito, generando el vapor de agua, al mismo tiempo que es distribuida en toda la cámara, por el sistema de aireación que posee. El sistema electrónico es el que permite el control de temperatura y humedad dentro del horno asegurando que las condiciones estén en los rangos especificados.

Figura 14. **Parte interna de la cámara de curado a vapor, donde se aprecia el sistema de funcionamiento**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

El sistema electrónico está compuesto por dos dispositivos, uno que indica y regula la temperatura dentro de la cámara y otro que genera la humedad a los niveles deseados, una vez obtenida se apaga ya que el sistema continúa su ciclo de evaporación y condensación ahorrando el consumo de agua.

Figura 15. **Control electrónico regulador de la temperatura en funcionamiento**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

Estos tres componentes hicieron posible mantener la temperatura necesaria a un ambiente completamente saturado de humedad, mejorando las condiciones de curado durante 7 días, que es el tiempo que permanecieron los especímenes dentro de la cámara. La cámara de curado a vapor tiene una capacidad para 6 moldes y posee una tapadera de vidrio en la parte frontal en la cual puede observarse el comportamiento abriendo la cámara, sin afectar las condiciones que adentro se han dado.

Figura 16. **Cámara de curado a vapor generando humedad saturada**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-,
USAC.

2.2.1.4. Máquina universal

Esta máquina es utilizada para realizar ensayos a tensión y compresión. Su funcionamiento es mediante un sistema hidráulico, por la naturalidad del proyecto, la máquina fue utilizada a compresión, siendo de suma importancia en la caracterización del material volcánico de prueba en cuanto a sus propiedades mecánicas.

Figura 17. **Máquina universal de 60 000 kg de capacidad y 0,5 kg de aproximación**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII–, USAC.

2.2.1.5. Vernier electrónico

El Vernier, utilizado para medir las aristas del cubo a ensayar para determinar su área de contacto y con la carga aplicada respectivamente a cada cubo, determinar su resistencia.

Figura 18. **Vernier digital marca Mitutoyo, con una capacidad de 200 mm y una precisión de 0,02 mm**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

2.2.1.6. Balanza

La utilización de este instrumento fue para conocer los pesos de los cubos, con puzolana-cemento y cal-puzolana, que se pesaban inmediatamente después de terminar su proceso de curado.

Figura 19. **Balanza analítica marca OHAUS, con una capacidad de 2 610 g y una precisión 0,1 g**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII–, USAC.

2.2.1.7. Mezcladora

La mezcladora utilizada para este proceso contiene las especificaciones de la Norma ASTM C 305-11 “Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency”, inciso 3. Tiene una capacidad de 4 litros, suficiente para que por cada proceso de mezclado se obtuvieran 6 cubos. Posee 3 velocidades de mezclado, la norma en sus especificaciones de hechura sólo hacen referencia a la utilización de la velocidad 1 y 2 durante el proceso.

Figura 20. **Mezcladora protegida con un molde de madera que evita la evaporación del agua durante el proceso de mezclado**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII–, USAC.

2.2.1.8. Mesa de flujo

Las especificaciones para la mesa de flujo se encuentran en la Norma ASTM C 230-08 “Standard Specification for Flow Table for Use in Test of hydraulic Cement”, dicho equipo se encuentra en el Laboratorio de aglomerantes del Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII–.

Figura 21. **Mesa de flujo según requerimientos de ASTM C 230-08**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-,
USAC.

2.2.1.9. Moldes

Estos moldes tienen una capacidad para 3 cubos por molde, son fabricados según especificaciones de la Norma ASTM C109-11 “Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars“, inciso 5.3. Indicando que deben ser de un material metálico que no perjudique las mezclas de cemento, formar cubos de 5x5 milímetros y que deben ser separables en no más de 2 piezas, entre otras especificaciones.

Figura 22. **Moldes de cobre, con capacidad de 3 cubos de 5 x 5 x 5 cm marca FORNEY**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

2.2.2. Materiales

A continuación se detallan las especificaciones de cada material utilizado para el proceso de elaboración de mezclas según las Normas ASTM que los dicta.

2.2.2.1. Cemento tipo I (ASTM C 150-11)

El cemento tipo I fue utilizado para la realización de las mezclas cemento-puzolana (IAR), posee las características que indica la Norma ASTM C 150-11 “Standard Specification for Portland Cement”, únicamente para ensayos, obtenido en una cementera de El Salvador dado que no había disponible en Guatemala. Para obtener resultados óptimos, el cemento debe cumplir una serie de requerimientos físicos y químicos que detalla esta norma.

Tabla IV. **Requerimientos químicos del cemento tipo I ASTM C 150-11**

Cemento tipo I				
Compuesto	Nombre	Porcentaje medio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
CaO	óxido de Calcio	66,04%	0,99%	1,50%
MgO	óxido de Magnesio	1,41%	0,07%	4,99%
SiO ₂	dióxido de Silicio	25,09%	0,76%	3,01%
Fe ₂ O ₃	trióxido de Hierro	4,01%	0,05%	1,26%
Al ₂ O ₃	trióxido de Aluminio	6,47%	0,00%	0,00%
SO ₄	sulfatos	4,00%	0,21%	5,30%

Fuente: Departamento de Química. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-.

Figura 23. **Cemento tipo I (ASTM C 150-11), en vista frontal y lateral**



Fuente: Sección Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

2.2.2.2. Arena graduada estándar (ASTM C 778-06)

La arena graduada estándar, según la Norma ASTM C 778-06 “Standard Specification for Standard Sand”, es utilizada cuando en la hechura de mezclas con cemento hidráulico, la norma indica tres tipos de graduación o tamaño de la arena:

- Arena 20-30: arena estándar, graduada para pasar el tamiz No 20 y quedar retenida en el tamiz No 30.
- Arena graduada: arena estándar, graduada para pasar el tamiz No 30 y quedar retenida en el tamiz No 100.
- Arena estándar: arena de sílice, compuesto casi completamente de granos redondeados de cuarzo natural casi puro, que se utiliza para la preparación de morteros en las pruebas de cemento hidráulico.

De estos tres tipos de arena indicada por la norma, se utilizó la arena estándar, ya que es la adecuada para los ensayos de resistencia que se realizaron.

Figura 24. **Arena graduada estándar (ASTM C 778-06)**



Fuente: <<http://www.elvec.com.mx/pages/cemento.html>>. [Consulta: octubre de 2011].

2.2.2.3. Cal hidratada

Este material necesario para que pueda desarrollarse el proceso de reacción, está regulado por dos normas según su uso ASTM C 821 - 09 “Standard Specification for Lime for Use with Pozzolans”, para uso con puzolanas y ASTM C 207-06 “Standard Specification for Hydrated Lime for Masonry Purposes”, para fines de mampostería.

Tabla V. **Composición química de la cal mediante el método de Fluorescencia de Rayos X (FRX)**

Composición química de la cal		
Compuesto	Nombre	Cantidad (%)
SiO ₂	dióxido de silicio	0,60
Al ₂ O ₃	trióxido de aluminio	0,20
Fe ₂ O ₃	trióxido de hierro	0,00
CaO	óxido de calcio	73,20
MgO	óxido de magnesio	0,99
K ₂ O	óxido de potasio	0,05
SO ₃	trióxido de azufre	0,47
P ₂ O ₅	pentóxido de fósforo	0,00
C ₂ O ₃	trióxido de calcio	0,05
MnO ₂	dióxido de manganeso	0,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Cal hidratada HORCALSA, Norma ASTM C 207-06**



Fuente: Sección Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

2.2.2.4. Material volcánico

Las muestras, 18 en total, extraídas del occidente y oriente del país, consiste particularmente en tobas, cenizas volcánicas y pómez. Por motivos de ensayo fueron identificados de la siguiente manera.

Tabla VI. **Nomenclatura utilizada en los ensayos**

Muestra	IAR	IRC
Control	0	----
1GC	1	I
2T	2	II
2SC	3	III
1P	4	IV
LC	5	V
ARIS	6	VI
SFA	7	VII
1S	8	VIII
SX1	9	IX
1M	10	X
SX2	11	XI
1N	12	XII
1NPS	13	XIII
1SC	14	XIV
BAR FINO 2	15	XV
1R	16	XVI
2T'	17	XVII
1C	18	XVIII

Fuente: elaboración propia.

- Índice de actividad reactiva (IAR): nomenclatura correspondiente a las mezclas cemento-puzolana que se realizaron.
- Índice de reactividad con cal (IRC): nomenclatura correspondiente a las mezclas cal-puzolana.

Figura 26. **Materiales volcánicos a tres horas de molienda**



Fuente: Sección Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

2.2.2.5. Agua desmineralizada

Esta tiene la característica de no tener ningún tipo de mineral o impurezas, lo cual indica que al utilizarla en las mezclas, no influirá de forma negativa durante el proceso de reacción.

Figura 27. **Materiales utilizados en IAR e IRC**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

2.2.3. Mezclas de mortero (IRC e IAR)

A continuación se describirá la metodología utilizada para la elaboración de estos dos tipos de mezclas, utilizando los 18 materiales volcánicos que han sido evaluados previamente en sus características físicas, el proceso consiste en la elaboración, preparación y ensayo de esos materiales como se indica a continuación.

2.2.3.1. Mezclas cemento-puzolana (IAR)

La norma que indica si un material puede ser considerado como puzolana por medios mecánicos es la ASTM C 618 – 08 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, que a su vez refiere a la Norma ASTM C311- 11 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, como la indicadora de la dosificación de materiales a utilizar, así como, las normas auxiliares que deben utilizarse para la elaboración de mezcla, curado y ensayo a los materiales bajo investigación.

- Elaboración de mezclas

Se utilizaron los materiales indicados por la Norma ASTM C311 – 11 “Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete” que indica las cantidades para un lote de control y prueba:

Tabla VII. **Mezcla de control**

Cuantificación de materiales para un lote	
Cantidad	Material
500 g	Cemento Pórtland
1 375 g	Arena graduada estándar
267 ml	Agua

Fuente: Norma ASTM C 311 – 11 “Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete”, inciso 26.1.1.

Tabla VIII. **Mezcla de prueba**

Cuantificación de materiales para un lote	
Cantidad	Material
400 g	Cemento Pórtland
1375 g	Arena graduada estándar
100 g	Muestra de prueba
267 ml	Agua

Fuente: Norma ASTM C 311 – 11 “Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete”, inciso 26.1.2.

La Norma ASTM C 311-11 hace mención a la mezcla de control como un parámetro de referencia para las mezclas de prueba en la cual se sustituyó un 20% en masa del total de cemento tipo 1 utilizado en la mezcla de control, por material de prueba (volcánico), evaluando a su vez la resistencia a 7 y 28 días y así comparar los resultados con los materiales de prueba debiendo llegar a por lo menos un 75% de su resistencia a la compresión en ambas edades obtenidas de la mezcla de control.

Conociendo la cantidad para cada lote, se tuvieron todos estos materiales pesados antes de iniciar el proceso de mezclado, tomando como muestras de prueba los 18 materiales volcánicos con su respectiva nomenclatura, para cada material volcánico se realizó un lote de prueba el cual consiste en 6 cubos, 3 para ser ensayados a compresión a 7 días y 3 cubos para 28 días.

Figura 28. **Materiales para un lote. Arena estándar, cemento tipo 1, material volcánico y agua**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

Luego de tener preparados los materiales se utilizó el procedimiento para la realización de mezclas indicado por la Norma ASTM C305-11 “Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency” de la cual se elaboró una guía práctica que indica los procedimientos para elaborar la mezcla, realizar el ensayo de flujo y el ensayo a compresión (ver apéndice) de especímenes puzolana-cemento.

- Mezcla de material

El proceso de mezclado indicado por la Norma ASTM C 109-11 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement mortars (using 2-in or 50-mm Cube Specimens)”, inciso 10.2, que refiere a la Norma ASTM C 305-11 “Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency”, que indica procedimientos ordenados y cronometrados, que se han seguido con la variación que el cemento y la puzolana, deben combinarse en un recipiente cerrado.

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; por cada proceso de mezclado se obtuvieron 6 cubos.

Figura 29. **Adición de la arena estándar durante el mezclado**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-,
USAC.

Figura 30. **Mezclado final para dar paso al ensayo de flujo**



Fuente: Laboratorio de morteros y aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-,
USAC.

- **Determinación del flujo**

La Norma ASTM C 109-11 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement mortars (using 2-in or 50-mm Cube Specimens)”, inciso 10.3 que refiere a la Norma ASTM C 1437-07 “Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar”, indicó que previo al ensayo de flujo debe colocarse la mezcla en el recipiente cónico de metal y llenarlo en dos capas apisonando 20 veces en forma circular esperando 1 minuto, para que la mezcla pueda asentarse y acoplarse al molde antes del ensayo.

Figura 31. **Preparación de la mezcla previo a realizarse el ensayo de flujo**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

Esperado este tiempo se procedió a realizar el ensayo de flujo, para las mezclas IAR, se realizan 25 caídas en 15 segundos, de una forma coordinada. En este proceso se notó la diferente porosidad a medida que el material se escurría en la mesa, esto debido a las diferencias entre los materiales ensayados.

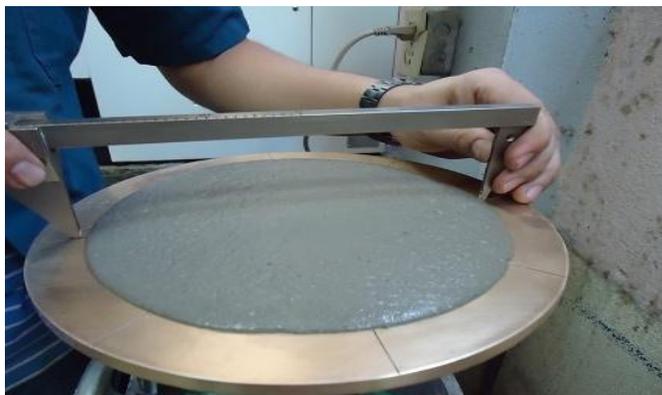
Figura 32. **Ensayo de flujo de una muestra combinada con cemento**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

La parte importante de este ensayo es la verificación de la lectura de 4 diámetros del círculo hecho por la muestra posterior al ensayo de 25 golpes, la lectura se toma a distancias equidistantes, en marcas señaladas en la mesa de flujo.

Figura 33. **Lectura de 4 diámetros con un Vernier luego del ensayo de flujo**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

Si en la determinación del flujo, la lectura del diámetro es menor al intervalo especificado (110 ± 5), se devuelve el mortero de la mesa de flujo a la mezcladora, agregando agua adicional y mezclar durante $1 \frac{1}{2}$ minuto, se repite el ensayo de la mesa de flujo y si en esta nueva prueba se encuentra dentro del rango especificado se prosigue a mezclar 15 segundos a velocidad 2.

La Norma ASTM C 311-11 “Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete”, indica que en la determinación del flujo, sólo la mezcla de control debe cumplir con esta especificación, las demás mezclas con adiciones de material volcánico se les debe agregar la misma cantidad de agua utilizada en la mezcla de control, sin necesidad de cumplir con el valor de 110 ± 5 .

- Llenado de moldes

Este proceso indicado en la Norma ASTM C 109-11 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement mortars (using 2-in or 50-mm Cube Specimens)”, inciso 10.4.3.

Consiste en la preparación de los moldes y llenado con el material mezclado en dos capas a 32 golpes por capa. El proceso del golpeo sucesivo en las 4 caras del molde es fundamental realizarlo con la misma energía y consistencia, ya que de no hacerlo correctamente influirá en la creación de ratoneras debido a una mala compactación del material después de desencofrar las muestras de los moldes, afectando los resultados en el ensayo de resistencia compresión.

Figura 34. **Apisonamiento del material, que consiste en 32 golpes en cada capa para un total de 64**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-,
USAC.

Figura 35. **Especímenes preparados para ingresar a la cámara de humedad**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-,
USAC.

- Curado en cámara de humedad

Al terminar la hechura de los cubos, se procede a colocar los moldes dentro de la cámara de humedad por un período de 20 a 24 horas para que tengan un curado inicial a una humedad relativa mínima del 95%.

Figura 36. **Molde en cámara de humedad, protegido en su superficie contra el goteo por una plancha de plástico**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

Los moldes son protegidos en su superficie contra el goteo creado en el techo de la cámara con planchas de plástico a la medida del molde y así no afectar la forma del espécimen que debe tener dimensiones de 5 x 5 x 5 centímetros, para el ensayo a compresión.

- Almacenamiento en cámara saturada con cal

Luego de permanecer en la cámara de humedad, se procedió a desencofrar sacando los especímenes de los moldes e identificándolos indicando el día del ensayo (7 y 28 días), posteriormente son depositados en la cámara de almacenamiento, permaneciendo ahí hasta el día del ensayo en condiciones saturadas de cal a un pH alcalino de 12, evitando que se lleve a cabo la lixiviación y dañe los especímenes.

Figura 37. **Especímenes almacenados en agua saturada con cal**



Fuente: Laboratorio de Morteros y Aglomerantes. Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-,
USAC.

2.2.3.2. Mezclas cal-puzolana (IRC)

Se aplicaron las recomendaciones de ASTM C 593 – 06 (2011) “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime”, de acuerdo con ellas, para determinar el desarrollo de la resistencia.

El procedimiento para la elaboración de mezclas de las muestras IRC, es similar al descrito por la Norma ASTM C 109-11 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-inches or 50-milimeters Cube Specimens)”, que también fue utilizada para las mezclas IAR, con excepción de algunas variaciones hechas por la Norma ASTM C593-06 (2011) “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime”, siendo las mencionadas a continuación.

En la dosificación de materiales, en las mezclas IRC, no debe hacerse una mezcla de control. Los materiales requeridos son los siguientes:

Tabla IX. **Materiales para una mezcla IRC**

Cuantificación de materiales para un lote	
Cantidad (g)	Material
180	Cal hidratada
1 375	Puzolana (base seca)
1 480	Arena graduada estándar

Fuente: Norma ASTM C 593 - 06 “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime”, inciso 9.5.

En la hechura de la mezcla: la cal y el material volcánico deben reposar durante 1 minuto en agua dentro de la mezcladora.

En la determinación del flujo: la Norma ASTM C-593, indica que el flujo debe estar dentro del rango de 65 a 75, en la suma de los 4 diámetros, luego de 10 caídas (golpes) en 6 segundos. Es importante destacar que en las mezclas IRC si debe cumplirse el flujo del rango especificado, ya que las puzolanas por tener características físicas diferentes, necesitan de cantidades distintas de agua para llevar a cabo una correcta reacción.

En el curado: las mezclas IAR deben curarse los primeros 7 días dentro de un horno a vapor cerrado, a 54 ± 2 °C, en humedad saturada arriba del 95%.

En el almacenamiento: las mezclas luego de los 7 días, deben almacenarse en un cuarto húmedo (cámara de humedad) a 23 ± 2 °C, hasta el día del ensayo.

2.2.3.3. Ensayo de especímenes IAR e IRC

Para los ensayos a compresión para determinar IRC e IAR, el procedimiento de evaluación en la resistencia es el mismo.

El procedimiento de ensayo a compresión según la Norma ASTM C 109-11 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-inches or 50-millimeters Cube Specimens)”, inciso 10.6 a 13.2, indica el procedimiento que debe seguirse para el ensayo de cubos de 5 x 5 milímetros como se describe a continuación.

- Se limpiaron los cubos recién salidos de la cámara de humedad, eliminando cualquier grano de arena suelto o incrustaciones en las caras.
- Se tomaron medidas de peso y longitud de la cara más lisa del lado el cual fue ensayado, revisando que no exista algún tipo de curvatura que pueda perjudicar el ensayo ya que el área de contacto sería irregular.

Figura 38. **Cubos en proceso de medición y determinación de su peso**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

- Colocar cuidadosamente el cubo a ensayar exactamente en el centro del área de aplicación de carga de la máquina.
- Aplicar la carga a la cara de la muestra que estuvo en contacto con las superficies planas del molde.

Figura 39. **Cubo en la máquina universal durante el ensayo a compresión**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

- La velocidad de aplicación de carga en el ensayo debe estar dentro del rango de 200 a 400 libras/segundo (900 a 1 800 newton/segundo). Durante los ensayos en promedio fue aplicada una velocidad de carga de 257,4 libras/segundo.
- Luego del ensayo los cubos fallados son depositados en los desechos de materiales.

Figura 40. **Depósito de material desecho luego de ser ensayado**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

- Con la información del ensayo de carga y área de aplicación de carga, se determina la resistencia de la muestra.

$$\sigma = P/A$$

P= carga total máxima (kg)

A= área de la superficie de carga (cm²)

σ = resistencia de compresión. Psi o Mpa

- Se determina el valor de la media aritmética, ya que por cada muestra son 3 cubos de ensayo.

$$X = (\text{valor 1} + \text{valor 2} + \text{valor 3})/3$$

- Según la Norma ASTM C 109 inciso 13, la variación de datos no debe ser mayor a 7,6%, de lo contrario se descartará un valor para que quede dentro del rango de aceptación de la norma.

Figura 43. **Cubos cemento-puzolana fallados a compresión luego del ensayo**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-, USAC.

2.2.3.4. **Parámetros IAR e IRC**

La Norma ASTM C 593 – 06, para las mezclas con cal y la Norma ASTM C 618 – 08, para las mezclas cemento, indican los límites mínimos de resistencia a la compresión que deben cumplir a edades de 7 y 28 días. Si cumplen, los materiales ensayados pueden considerarse reactivos con la cal y cemento, respectivamente.

Tabla X. **Parámetros IRC**

Parámetros para el IRC	
A 7 días a 54 +/- 2° C	4,1 (Mpa)
A 28 días a 23 +/- 2° C	4,1 (Mpa)

Fuente: Norma ASTM C 593 - 06 "Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime". Requerimientos físicos. Tabla 1.

Tabla XI. **Parámetros IAR**

Parámetros para el IAR	
% mínimo de control, con cemento Pórtland a 7 días	75%
% mínimo de control, con cemento Pórtland a 28 días	75%

Fuente: Norma ASTM C 618 - 08 "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete". Requerimientos físicos. Tabla 2.

En IAR, el límite del porcentaje de comparación de la mezcla de prueba a 7 y 28 días es del 75% de la resistencia obtenida en la mezcla de control ensayada a compresión.

2.3. Resultados

Los resultados que a continuación se presentan, son la recopilación de información obtenida durante la elaboración de mezclas y ensayos de especímenes a 7 y 28 días para las mezclas IAR e IRC.

2.3.1. Flujo de mezclas IAR e IRC

Durante el proceso de elaboración de mezcla se determinó el flujo de los materiales combinados con cal (IRC) y con cemento (IAR), por medio del ensayo de la mesa de flujo, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla XII. **Valor del flujo respecto a la cantidad de agua requerida (IAR)**

Flujo IAR			
No	Muestra	Flujo	Agua (ml)
0	Control	113,0	267,00
1	1GC	105,0	267,00
2	2T	100,0	267,00
3	2SC	99,0	267,00
4	1P	108,5	267,00
5	LC	104,0	267,00
6	ARIS	114,0	267,00
7	SFA	108,0	267,00
8	1S	103,5	267,00
9	SX1	103,0	267,00
10	1M	102,5	267,00
11	SX2	107,5	267,00
12	1N	99,5	267,00
13	1NPS	105,5	267,00
14	1SC	106,0	267,00
15	BAR FINO 2	104,0	267,00
16	1R	105,0	267,00
17	2T'	104,5	267,00
18	1C	97,0	267,00

Fuente: elaboración propia.

La Norma ASTM C 109, indica el valor del flujo (110 +/- 5), así que se determinó la cantidad de agua que requería la mezcla de control para obtener el flujo deseado. Tal cantidad de agua fue utilizada en las demás mezclas no importando si cumplían o no en el flujo, ya que estas mezclas involucraban el uso de las muestras evaluadas así que la misma cantidad de agua debía ser utilizada anotando el flujo correspondiente (tabla XII).

Tabla XIII. **Cantidad de agua requerida para cada muestra con respecto a su valor de flujo (IRC)**

Flujo IRC			
No	Muestra	Flujo	Agua (ml)
I	1GC	74,0	365,00
II	2T	74,5	365,00
III	2SC	65,0	360,00
IV	1P	71,0	360,00
V	LC	66,5	360,00
VI	ARIS	70,0	360,00
VII	SFA	65,0	370,00
VIII	1S	70,5	360,00
IX	SX1	65,0	360,00
X	1M	68,0	365,00
XI	SX2	71,0	360,00
XII	1N	65,5	360,00
XIII	1NPS	66,5	365,00
XIV	1SC	65,0	360,00
XV	BAR FINO 2	74,5	360,00
XVI	1R	73,0	360,00
XVII	2T'	65,0	365,00
XVIII	1C	69,0	360,00

Fuente: elaboración propia.

De la misma manera que en las mezclas con cemento el flujo para mezclas con cal fue efectuado, con la variación de la Norma ASTM C 593 la cual indica que el valor del flujo debe ser de 65 a 75. Para estas muestras la cantidad de agua no fue la misma, en este tipo de mezclas el flujo si debe estar dentro del rango especificado, encontrando la cantidad correcta de agua para cada muestra (tabla XIII).

2.3.2. Especímenes para su evaluación como IAR

Para evaluar el IAR de los materiales volcánicos, la resistencia a compresión de cada mezcla con cemento fue determinada, 3 cubos por muestra en dos edades diferentes a 7 y 28 días fueron evaluados, obteniendo la siguiente información.

Tabla XIV. Resultados de la resistencia a 7 días (IAR)

Muestras cemento-puzolana (IAR)						
Nomenclatura	Muestra	f'c 7 días (Mpa)	% f'c (7 días)	σ (f'c 7 días)	Cv (f'c 7 días)	Cumple 75% f'c 7 días
0	Control	32,74	100,00	0,54	2%	---
1	1GC	28,28	86,37	0,72	3%	SI
2	2T	26,56	81,12	1,24	5%	SI
3	2SC	27,72	84,65	1,26	5%	SI
4	1P	27,27	83,29	0,15	1%	SI
5	LC	29,91	91,35	0,49	2%	SI
6	ARIS	30,35	92,70	0,45	1%	SI
7	SFA	29,46	89,98	0,64	2%	SI
8	1S	32,66	99,74	1,26	4%	SI
9	SX1	31,44	96,04	0,37	1%	SI
10	1M	30,60	93,44	0,01	0%	SI

Continuación de la tabla XIV.

11	SX2	28,42	86,80	1,65	6%	SI
12	1N	27,22	83,13	1,03	4%	SI
13	1NPS	29,55	90,25	0,26	1%	SI
14	1SC	27,31	83,41	0,66	2%	SI
15	BAR FINO 2	28,75	87,82	0,37	1%	SI
16	1R	31,12	95,04	1,07	3%	SI
17	2T'	30,27	92,44	0,70	2%	SI
18	1C	29,12	88,93	0,57	2%	SI

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resultados de la resistencia a 28 días (IAR)**

Muestras cemento-puzolana (IAR)						
Nomenclatura	Muestra	f'c 28 días (Mpa)	% f'c 28 días	σ (f'c 28 días)	Cv (f'c 28 días)	Cumple 75% f'c 28 días
0	Control	43,73	100,00	0,49	1%	----
1	1GC	37,08	84,80	0,78	2%	SI
2	2T	32,45	74,20	0,77	2%	NO
3	2SC	36,34	83,10	0,94	3%	SI
4	1P	37,49	85,74	0,61	2%	SI
5	LC	38,03	86,96	1,03	3%	SI
6	ARIS	41,64	95,21	0,83	2%	SI
7	SFA	38,47	87,97	1,33	3%	SI
8	1S	39,92	91,92	1,54	4%	SI
9	SX1	40,17	91,86	1,37	3%	SI
10	1M	38,73	88,57	0,46	1%	SI
11	SX2	39,05	89,30	1,23	3%	SI
12	1N	39,72	90,83	1,55	4%	SI
13	1NPS	40,90	93,53	1,83	4%	SI
14	1SC	36,26	82,91	0,84	2%	SI
15	BAR FINO 2	37,44	85,62	1,27	3%	SI
16	1R	42,02	96,09	0,77	2%	SI
17	2T'	41,49	94,88	1,05	3%	SI
18	1C	38,93	89,03	1,84	5%	SI

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en las tablas XIV y XV, se utilizó la nomenclatura en números arábigos del 1 al 18 según la muestra respectiva, facilitando la recolección de información, ya que estas tablas de resúmenes son el resultado de la tabulación de una amplia gama de resultados (ver apéndice), de la cual surgió toda esta información, dichas tablas también fueron elaboradas para las mezclas con cal. Cabe destacar que a la mezcla de control se le asignó el número 0.

Para cada muestra se determinó el coeficiente de variación y la desviación estándar, así como el porcentaje de $f'c$. Dicho valor indica el porcentaje al cual llegó en su resistencia la muestra determinada, respecto a la de control, ya que dentro de los parámetros, como se indicó en la tabla XI, debe ser del 75% mínimo de la resistencia de la mezcla de control para 7 y 28 días en su evaluación como IAR.

La información de la tabla XVI, describe el aumento de la resistencia en Mpa que desarrollo cada muestra a lo largo del período de 7 a 28 días.

Tabla XVI. **Aumento de resistencia de 7 a 28 días (IAR)**

Muestras cemento-puzolana (IAR)		
Nomenclatura	Muestra	Aumento de $f'c$ (Mpa)
0	Control	10,99
1	1GC	8,80
2	2T	5,89
3	2SC	8,62
4	1P	10,22
5	LC	8,12
6	ARIS	11,28
7	SFA	9,01
8	1S	7,26
9	SX1	8,73
10	1M	8,13

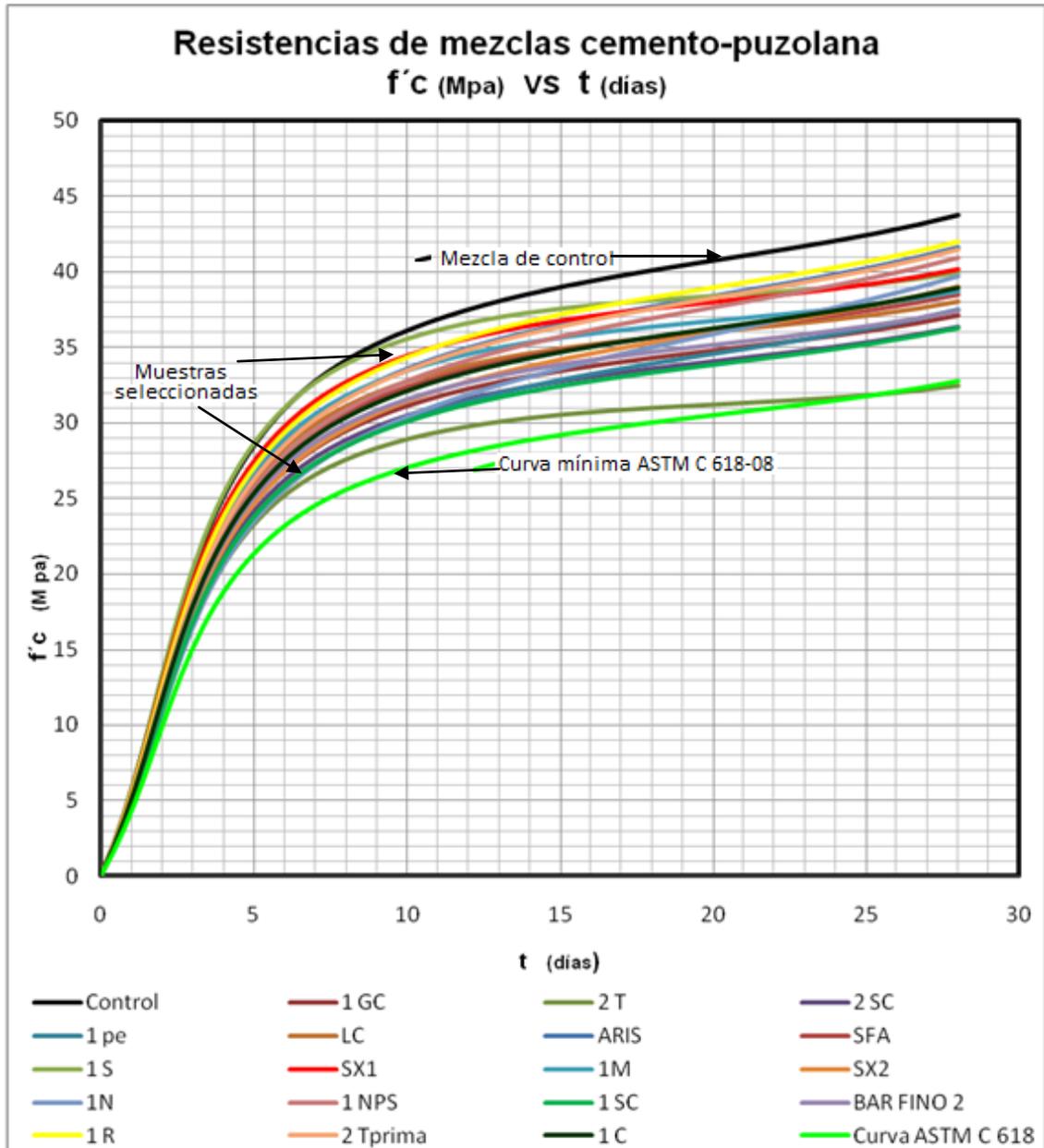
Continuación de la tabla XVI.

11	SX2	10,63
12	1N	12,50
13	1NPS	11,35
14	1SC	8,95
15	BAR FINO 2	8,69
16	1R	10,90
17	2T'	11,22
18	1C	9,81

Fuente: elaboración propia.

La figura 44, engloba los resultados que se obtuvieron de todas las muestras incluyendo la de control, de sus resistencias a 7 y 28 días, observando un comportamiento similar en todas las muestras, también fue incluida la curva según los parámetros indicados de la Norma ASTM C 618 - 08 "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", requerimientos físicos, tabla II.

Figura 44. Desarrollo de la resistencia de 18 muestras con cemento durante un período de 28 días



Fuente: elaboración propia.

2.3.3. Especímenes para su evaluación como IRC

Para determinar el IRC de las mezclas con cemento, se ensayaron 3 cubos por muestra a cada edad, se calculó un promedio de las resistencias de los tres cubos siendo el valor mínimo de 4,1 megapascales, según la Norma ASTM C 593. Toda la memoria de cálculo para estas mezclas puede consultarse de forma más detallada en el apéndice. En los ensayos de mezclas cal-puzolana se obtuvieron los siguientes resultados a 7 y 28 días.

Tabla XVII. Resultados de la resistencia a 7 días (IRC)

Muestras cal-puzolana (IRC)						
Nomenclatura	Material	f'c 7 días (Mpa)	% Aumento f'c 7 días	σ (f'c 7 días)	Cv (f'c 7 días)	Cumple con 4.1 Mpa min.
I	1GC	6,11	32,93	0,33	5%	SI
II	2T	6,34	35,29	0,42	7%	SI
III	2SC	6,29	34,82	0,28	4%	SI
IV	1P	5,46	24,97	0,39	7%	SI
V	LC	5,61	26,95	0,09	2%	SI
VI	ARIS	6,74	39,21	0,17	3%	SI
VII	SFA	6,59	37,74	0,83	12%	SI
VIII	1S	5,99	31,52	0,07	1%	SI
IX	SX1	6,29	34,81	0,23	4%	SI
X	1M	5,86	30,01	0,44	7%	SI
XI	SX2	6,15	33,34	0,11	2%	SI
XII	1N	5,75	28,72	0,08	1%	SI
XIII	1NPS	7,30	43,84	0,20	3%	SI
XIV	1SC	7,19	42,94	0,20	3%	SI
XV	BAR FINO 2	5,40	24,13	0,20	4%	SI
XVI	1R	6,63	38,19	0,10	2%	SI
XVII	2T'	6,83	39,96	0,31	5%	SI
XVIII	1C	5,59	26,67	0,27	5%	SI

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Resultados de la resistencia a 28 días (IRC)**

Muestras cal-puzolana (IRC)						
Nomenclatura	Muestra	f'c 28 días (Mpa)	% Aumento f'c 28 días	σ (f'c 28 días)	Cv (f'c 28 días)	Cumple con 4.1 Mpa min.
I	1GC	5,94	30,99	0,21	4%	SI
II	2T	6,00	31,69	0,13	2%	SI
III	2SC	5,46	24,86	0,44	8%	SI
IV	1P	5,47	25,05	0,13	2%	SI
V	LC	5,82	29,55	0,09	1%	SI
VI	ARIS	6,58	37,69	0,11	2%	SI
VII	SFA	6,59	37,76	0,12	2%	SI
VIII	1S	5,91	30,67	0,17	3%	SI
IX	SX1	8,18	49,86	1,15	13%	SI
X	1M	5,76	28,81	0,21	4%	SI
XI	SX2	5,96	31,17	0,32	5%	SI
XII	1N	5,39	23,95	0,15	3%	SI
XIII	1NPS	7,27	43,58	0,23	3%	SI
XIV	1SC	6,73	39,05	0,28	4%	SI
XV	BAR FINO 2	4,84	15,24	0,13	3%	SI
XVI	1R	6,38	35,77	0,13	2%	SI
XVII	2T'	6,77	39,41	0,18	3%	SI
XVIII	1C	5,68	27,88	0,52	9%	SI

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en las tablas XVII y XVIII, se utilizó la nomenclatura en números romanos del I al XVIII según la muestra respectiva, facilitando la recolección de información de forma ordenada y controlada durante los ensayos a compresión.

Para la mezclas con cal, también fue necesario determinar el coeficiente de variación y la desviación estándar, dichos valores son los que dan fiabilidad a los ensayos, ya que da una idea de la dispersión de los datos. El porcentaje de aumento es un valor con respecto al parámetro mínimo de 4,1 megapascales para 7 y 28 días, dicho porcentaje proporciona la cantidad arriba de este valor que supera cada muestra.

Tabla XIX. **Variación de la resistencia de 7 a 28 días (IRC)**

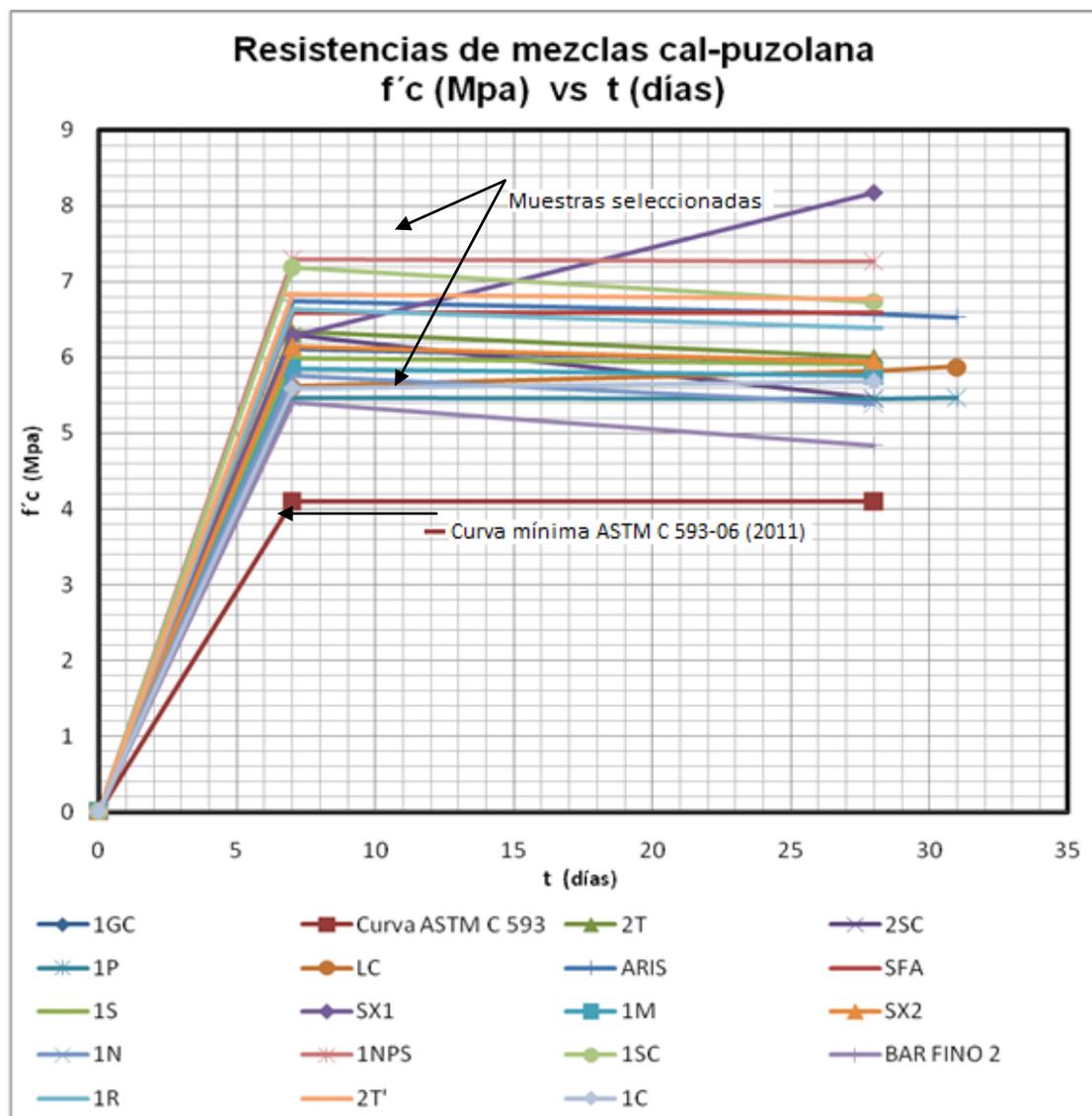
Nomenclatura	Muestra	Variación (Mpa)
I	1GC	-0,17
II	2T	-0,33
III	2SC	-0,83
IV	1P	0,01
V	LC	0,21
VI	ARIS	-0,16
VII	SFA	0,00
VIII	1S	-0,07
IX	SX1	1,89
X	1M	-0,10
XI	SX2	-0,19
XII	1N	-0,36
XIII	1NPS	-0,03
XIV	1SC	-0,46
XV	BAR FINO 2	-0,57
XVI	1R	-0,25
XVII	2T'	-0,06
XVIII	1C	0,09

Fuente: elaboración propia.

La tabla XVI, proporciona la variación sufrida en su resistencia por cada muestra a lo largo del período de 7 a 28 días, se observa que la variación es mínima, pero, en la mayoría de los casos fue decreciente.

La figura 45, ilustra la gráfica del comportamiento con cal de las 18 muestras, según los parámetros indicados por la Norma ASTM C 593 - 06 “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime”.

Figura 45. **Desarrollo de la resistencia de 18 muestras con cal durante el período de 28 días**



Fuente: elaboración propia.

Al igual que en la gráfica 1 de IAR, para IRC también se desarrollaron gráficas individuales (ver apéndice) para analizar de forma más detallada el comportamiento de las muestras con cal y con el parámetro respectivo para este tipo de mezcla.

En la tabla XX pueden observarse los incrementos desarrollados por los dos tipos de mezclas (IAR e IRC) efectuados, tanto en megapascales como en porcentaje, para proporcionar una idea clara del comportamiento general obtenido de todas las mezclas.

Tabla XX. **Tabla comparativa de resultados de resistencia para IAR e IRC**

Tabla comparativa IAR e IRC					
Tipo de mezcla	Edad	Resistencia a compresión		Análisis Estadísticos	
	Días	Promedio (Mpa)	Promedio en %	σ	Cv
IAR	7	29,22	89,25	1,68	6%
IAR	28	38,67	88,47	2,35	6%
IRC	7	6,23	33,67	0,57	9%
IRC	28	6,15	32,39	0,78	13%
* En IAR la mezcla de control no es tomada en cuenta					

Fuente: elaboración propia.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Ensayos de laboratorio

La finalidad de esta investigación consistió en determinar la reactividad mecánica de 18 materiales extraídos en el oriente y occidente del país, materiales los cuales tuvieron una previa investigación geológica y una caracterización física relacionada con su reactividad puzolánica.

Las características físicas de los materiales volcánicos evaluados se limitaron en cenizas volcánicas, tobas y pómez de distintos colores como también distintos tamaños de los granos. Según investigaciones anteriores, en Guatemala se han evaluado materiales de distintos bancos que han desarrollado una buena resistencia mecánica y la vasta disposición de estos materiales, en gran medida a causa de la geología y formación del territorio guatemalteco hacen que sea posible más investigaciones de este tipo en diferentes áreas del país.

Empleando la metodología descrita en las Normas ASTM para este tipo de ensayos, en la evaluación de materiales volcánicos como puzolanas, fueron involucrados más de un tipo de estas normas, debido a las características de las mezclas efectuadas. Los procedimientos fueron seguidos a detalle, teniendo inconvenientes que afectaron de forma no muy considerable dentro de los resultados obtenidos.

En su mayor parte las condiciones de temperatura y humedad requeridas por las normas, fueron controladas y se tuvieron variaciones, pero siempre dentro del rango especificado.

De los materiales ensayados con cemento se determinó la cantidad de agua adecuada de 267 mililitros utilizando la mezcla de control, con tal cantidad de agua sólo determinados materiales cumplieron con el flujo; 1 GC (105), 1P (108.5), SFA (108), SX2 (107.5), 1 NPS (105.5), 1SC (106), 1R (105); el resto de materiales no cumplió con el ensayo de flujo (110 +/- 5).

En mezclas IRC, según la Norma ASTM C 593, debía cumplir este parámetro, teniendo el objetivo de encontrar la cantidad adecuada de agua, que se mantuvo dentro de 360 a 370 mililitros (ver tabla XIII), utilizando la mayor parte de muestras la cantidad de 360 mililitros, el flujo con estas cantidades de agua se mantuvo en el rango especificado por la norma de 65 a 75.

Dicho esto, los 18 materiales se evaluaron en su comportamiento mecánico en dos tipos de mezclas con cemento (IAR) y luego con cal (IRC) a edades de 7 y 28 días, los resultados obtenidos muestran un comportamiento progresivo en el aumento de la resistencia al utilizar los materiales volcánicos, el objetivo fue demostrar mediante estos resultados, que los valores de resistencia pudieran cumplir por lo menos con los parámetros mínimos requeridos.

Analizando los resultados de las mezclas para IAR a 7 días, hubieron 3 muestras destacadas que sobrepasaron el 95% de la resistencia alcanzada por la mezcla de control a la misma edad; 1S (99,74%), SX1 (96,04%), 1R (95,04%), el resto de materiales 5 estuvieron en el rango de 90 a 95%, y los 10 materiales restantes cumplieron con resistencias comprendidas de 80 a 90% (ver tabla XIV).

En los valores obtenidos para IAR a 28 días, 2 muestras fueron las destacadas con una resistencia arriba del 95% respecto a la mezcla de control a esa edad; 1R (96,09%), ARIS (95,21%), del resto, 5 materiales estuvieron en el rango de 90 a 95% y 10 muestras alcanzaron porcentaje de resistencias de de 80 a 89%. La muestra faltante 2T tuvo un resultado diferente, ya que fue la única muestra IAR a 28 días que no cumplió con el parámetro mínimo (ver tabla XV), a esta edad, al alcanzar un porcentaje de resistencia del 74,20%, muy cercano al mínimo recomendado.

La Norma ASTM C 109 – 02 en el inciso 13.2, indica que para el ensayo de un lote de 3 cubos, el coeficiente de variación de los resultados del promedio de las 3 resistencias de los respectivos especímenes por lote no debe exceder del 8,7%, esto indicará la confiabilidad de los resultados. En los ensayos a 7 días de IAR, el coeficiente de variación se mantuvo en el rango de 0 a 6% y en ensayos a 28 días de IAR, el rango obtenido fue de 1 a 5%.

El incremento obtenido por las muestras IAR desde la edad de 7 hasta 28 días con respecto al incremento presentado por la mezcla de control (10,99 megapascales), se observaron 3 casos interesantes; 3 muestras sufrieron un incremento superior al de la mezcla de control; 1N (12,5 megapascales), ARIS (11,28 megapascales), 1NPS (11,35 megapascales), y 2T' (11,22 megapascales), los materiales restantes aumentaron en un promedio de 8,84 megapascales. La muestra que menos incremento presentó fue la 2T con un valor de 5,89 megapascales.

En la observación de resultados de las mezclas IRC a 7 días se tienen dos muestras que tuvieron un desempeño muy por encima del límite especificado (4,1 megapascales); las muestras 1 NPS (43,84%), y 1 SC (42,94%) obtuvieron los porcentajes de resistencia más altos, el resto de muestras aumentó en un promedio de 32,45%, siendo un valor promedio alto, la muestra que menos resistencia desarrolló según el límite mínimo fue la BAR FINO 2 con 5,40 megapascales (24,13% más).

A 28 días las muestras IRC obtuvieron 2 valores destacados, las muestras SX1 con un 49,86% fue la que más desarrolló resistencia, seguido de la muestra 1 NPS con un 43,58%, las demás muestras desarrollaron su resistencia en un porcentaje promedio del 30,60%. La muestra que menor resistencia a 28 días presentó fue la BAR FINO 2 con 4,84 megapascales (15,24%).

La confiabilidad de los datos está regida por el valor del coeficiente de variación (Cv) indicado también por la Norma ASTM C 109, que indica el 8,6% como máximo. Para los resultados a 7 días el rango del coeficiente de variación estuvo dentro de 1 a 7% y en los ensayos a 28 días estuvo dentro del rango de 1 a 8%, indicando así la confiabilidad de los resultados de los ensayos con cal a 7 y 28 días.

En las mezclas IRC, se presentaron variaciones dentro de las edades de 7 a 28 días. Tales variaciones fueron muy pequeñas pero algunas marcaron tendencias de reducción de la resistencia y sólo unas pocas la incrementaron ligeramente; por ejemplo, la muestra que más se destacó fue la SX1 con un incremento en la resistencia de 1,89 megapascuales, otras también aumentaron ligeramente como la LC (0,21 megapascuales), 1C (0,09 megapascuales), 1P (0,01 megapascuales); la muestra SFA (0 megapascuales) no presentó ninguna variación, ya que mantuvo la misma resistencia presentada a 7 días.

Las muestras restantes también tuvieron incrementos pero de forma negativa, ya que los valores de las resistencias tendieron a la baja; muestras como 1GC, 2T, SX1, 1N, 1S, etcétera, (ver tabla XIX); disminuyeron en un promedio de 0,28 megapascuales.

Para un análisis general los resultados obtenidos, se determinó el promedio de todas las resistencias según su edad y tipo de mezcla. Para la mezcla IAR los resultados se mantuvieron estables a 7 días con una resistencia de 29,22 megapascuales (89,25%) y a 28 días con una resistencia de 38,67 megapascuales (88,47%), la importancia de estos valores es que el coeficiente de variación cumplió con lo que se especifica al tener un valor menor al 8,6%, obteniendo confiabilidad en los resultados y el incremento promedio se dio en 9,45 megapascuales.

Para las mezclas con cal, las muestras SFA a 7 días, SX1 y 1C a 28 días, deben repetirse como indica la Norma ASTM C 109, ya que no cumplieron con el parámetro de confiabilidad de 8,6% en el coeficiente de variación, al superarlo en 12, 13 y 9 por ciento respectivamente.

CONCLUSIONES

Ensayos de laboratorio

1. Los 18 materiales volcánicos combinados con cemento, 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 poseen un grado de reactividad alto, al ser comprobado que cumplen en amplio porcentaje con los parámetros establecidos, alcanzando en un promedio del 89% su resistencia a 7 y 28 días según la mezcla de control.
2. Los 18 materiales volcánicos combinados con cal, mediante requerimientos indicados en la Norma C-593 Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime, efectivamente poseen un grado de reactividad mecánica alto, al ser comprobado por medios experimentales que cumplen en amplio porcentaje con los parámetros establecidos, superando en un promedio del 33% el límite establecido por la norma.

3. A pesar de la combinación del cemento con materiales volcánicos, el comportamiento de la resistencia de 0 a 28 días fue el mismo presentado por las mezclas que contenían sólo cemento, esto indica que los materiales volcánicos no impiden el desarrollo de la resistencia del cemento, si no que en efecto, ayudan en el desenvolvimiento de ese mismo comportamiento debido a su composición química (silicatos y aluminatos) que desempeñan un papel importante en el desarrollo de la resistencia del cemento, así como, en otras propiedades ingenieriles.
4. El cumplimiento del flujo no es un indicativo del grado de resistencia que alcanzan las muestras combinadas con el cemento, pero, si es un parámetro importante para determinar la consistencia de la pasta y del grado de absorción de agua generada por la mezcla.
5. La muestra 1S mantuvo una resistencia inicial bastante alta en su mezcla con cemento, debido a su alta superficie específica, siendo un material muy fino en estado natural y el que más fineza presentó de los materiales de oriente, seguramente este fue el factor determinante dentro del desarrollo de la resistencia en los primeros días, ya que es ahí cuando el incremento de la resistencia se da considerablemente.
6. En mezclas con cal, el comportamiento de la resistencia tiende a disminuir ligeramente, debido a que la disposición de CaC disminuye con el tiempo al ser consumido en el proceso de reacción, pero, algunas muestras aumentaron ligeramente muy posiblemente debido a su composición química, este efecto deberá evaluarse mediante ensayos de composición y comportamiento químico.

7. La muestra 1R es la más reactiva con cemento. Presentó un comportamiento estable en su mezcla con cemento, con resistencias muy altas a 7 y 28 días, cumpliendo con el flujo en IAR e IRC. También mantuvo un comportamiento alto en su combinación con cal tendiendo a disminuir ligeramente su resistencia de 7 a 28 días. Juntamente con la muestra 1S, fueron los de mejores resultados mecánicos en IAR.
8. La muestra 1N demostró excelentes resultados en el incremento de su resistencia de 7 a 28 días para mezclas IAR, obteniendo valores más altos que la mezcla de control, esto demuestra que el uso de estos materiales volcánicos ayudan considerablemente en el desarrollo de la resistencia aún por encima de valores patrón.
9. La muestra 1 NPS es la más reactiva con cal, sus valores de resistencia alcanzados a 7 y 28 días se incrementan en un promedio de 43,71% más que el parámetro indicado por la Norma ASTM C 593 de 4,1 megapascales.
10. La muestra 1 SC demostró una alta capacidad de desarrollo de resistencia a 7 días en mezcla con cal, aunque sufrió una disminución en su resistencia a 28 días de 0,46 megapascales.
11. La muestra SX1 demostró un comportamiento diferente en IRC, ya que sufrió un incremento inesperado (el más alto a 28 días), comparado con la mayoría de las muestras que disminuyeron en su variación de la resistencia de 7 a 28 días, este comportamiento debe ser tomado en cuenta para futuras investigaciones.

12. La superficie específica no es un indicio claro del comportamiento mecánico, de las muestras con mejores resultados en IAR e IRC, la superficie específica de estas muestras promedia 5 500 centímetros cuadrados / gramo, con excepción de la 1 NPS que tuvo resultados favorable con IRC, con una superficie específica de la más alta con valor de 9 463 centímetros cuadrados / gramo (valor aún en revisión).
13. Las condiciones de humedad y temperatura deben mantenerse ya que son muy importantes en el proceso de reacción, si estas no son las adecuadas el proceso de reacción puzolánica puede no darse o desarrollarse a medias, dañando irreversiblemente el desarrollo de la consistencia de la pasta repercutiendo en su resistencia.
14. El material más absorbente de agua fue el SFA, ya que en IRC necesitó la cantidad de 370 mililitros para cumplir con lo mínimo en el ensayo de flujo, esta cantidad considerable de agua no repercutió en el desarrollo de resistencia en los dos tipos de mezcla, indicando que en el ensayo de flujo determina la cantidad correcta de agua, para que el material pueda reaccionar de la mejor manera, aumentando la importancia de cumplir con este ensayo. Considerando de igual manera que la muestra contenía un porcentaje de humedad bajo (4,55%), validando el hecho que necesitó de más agua para cumplir con el ensayo de flujo.
15. En la determinación del flujo con IAR, los resultados fueron diferentes, ya que el material que más absorbió agua se reflejó en el que menor flujo representó, la mezcla 1C poseía un porcentaje de humedad del 6,97%, indicando que estaba relativamente seca en comparación con otras muestras, necesitando de más agua para cumplir con el ensayo de flujo para IAR, aunque no fuese necesario.

RECOMENDACIONES

1. Guatemala es un país rico en materiales volcánicos debido a su geografía y por lo tanto, existen varios bancos de materiales volcánicos que no han sido evaluados y deben serlo bajo este mismo criterio de investigación realizado, para proveer una alternativa comprobada científicamente, que mejore las condiciones de vivienda a los sectores menos pudientes.
2. La identificación de los especímenes al igual que una planificación adecuada de trabajo es importante para la recolección ordenada de la información, debido a que realizar un muestreo de distintos bancos de materiales y la cantidad de especímenes que las normas solicitan por edad, puede convertirse en una amplia cantidad de información.
3. Debe evaluarse la resistencia a edades mayores a 28 días, porque se desconoce el comportamiento que pueda tener a grandes edades, un ejemplo claro se dio en la mayoría de mezclas IRC, se observó que la resistencia tendía a disminuir ligeramente sin saber si las mezclas al doble o triple de la edad, seguirán con este comportamiento o se estabilizarán. Por tendencias como esta es importante determinar si realmente se da un incremento o una disminución y, verificar en qué momento y a causa de qué, encuentran la estabilidad o cercana a ella, ya que de lo contrario la inestabilidad en el desarrollo de la resistencia puede tener resultados negativos.

4. Debido a los excelentes resultados obtenidos con las muestras, dan un margen para probar diferentes combinaciones de porcentajes de cemento-puzolana y cal-puzolana, los utilizados para esta investigación fueron una sustitución del 20% de cemento por material volcánico, pero para evaluar la capacidad máxima de estos materiales pueden seleccionarse los 5 mejores resultados y hacer sustituciones del 30% o 40%, encontrando el valor ideal de sustitución, que permita aprovecharlo al máximo.

5. Las evaluaciones de este material pueden enfocarse en la determinación de índice de reactividad mecánico según el tamaño de la muestra, es decir, a diferentes horas de molienda e incluso en estado natural, pueden tomarse las mezclas más finas y evaluar su resistencia, determinando si pueden cumplir con los parámetros establecidos por las normas internacionales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Annual Book of ASTM. Standards construction, volumen 4.02. Concrete and mineral aggregates. *Norma ASTM C 593 - 06 Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization* [en línea]. <http://www.astm.org>. [Consulta: 25 de mayo de 2011].
2. ————— . Standards construction, volumen 4.02. Concrete and mineral aggregates. *Norma ASTM C 618 - 08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete* [en línea]. <http://www.astm.org>. [Consulta: 18 agosto de 2011].
3. AQUINO L, Miriam Elizabeth. *Características de 2 bancos de material puzolánico y su uso en la fabricación de cemento. Bancos de los departamentos de Chimaltenango y Totonicapán*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 1995. 53 p.
4. DAY, Robert L. *Pozzolans for use in low-cost housing*. Alberta, Canada: University of Calgary, Department of Civil Engineering. 1990. 157 p.
5. GOMÁ, F. *El cemento portland y otros aglomerantes*. Barcelona, España: Reverte, 1979. 232 p.

6. GARCÍA DE LOMAS, Macarena, et al. *Comportamiento científico-técnico de los cementos Pórtland elaborados con catalizador FCC: aplicación de la normativa vigente*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas –CSIC-, 2006. 46 p.
7. KEYSER, Carl. *Ciencia de los materiales para ingeniería*. México: Limusa, 1992. 460 p.
8. OCHOA J., Luis. *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.
9. QUIÑONEZ DE LA CRUZ, Francisco Javier. *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*. Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010. 95 p.
10. ————. *Cemento puzolánico: investigación experimental, reporte de la fase*. Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1992. 32 p.
11. ROSALES R., 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. 149 p.

12. TARUN, R. Naik. *Sustainability of cement and concrete industries*, Department of Civil Engineering and Mechanics. USA: University of Wisconsin-Milwaukee, 2005. 15 p.
13. TAYLOR, H.F.W.; et al. *La química de los cementos*. España: Urmo, 1978. 512 p.
14. TOBON, J.I. *Puzolanas en los alrededores de Irra*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2001. 78 p.
15. 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. **Procedimientos y datos de laboratorio para IRC e IAR**

Procedimiento para realizar mezclas puzolana- cemento tipo 1 (ASTM C-150)

(Norma específica: ASTM C-618) (Norma auxiliar: ASTM C-305 y ASTM C-109)

Pesar la siguiente cantidad de materiales:

Mezcla de control

- Cemento Tipo 1 (C-150): 500 gr
- Agua desmineralizada: 242 mililitros
- Arena (ASTM C-778): 1 375 gr

Mezcla de prueba

- Cemento tipo 1 (ASTM C-150): 400 gr
- Arena (ASTM C-778): 1 375 gr
- Puzolana: 100 gr
- Agua desmineralizada: 242 ml

Procedimiento 1 (mezcla de material):

- a. Mezclar cemento y puzolana en un recipiente cerrado;
- b. Colocar agua en mezcladora;
- c. Agregar la cal y puzolana mezclada al agua;
- d. Luego mezclar 30 segundos a velocidad 1;
- e. Agregar arena durante 30 segundos a velocidad 1;
- f. Detener la mezcladora e iniciar a velocidad 2 durante 30 segundos;
- g. Detener mezcladora y dejar el mortero reposando durante 1 ½ minuto, durante los primeros 15 segundos de este intervalo de tiempo, raspar las paredes de la mezcladora, y cubrirla con la tapadera de madera; y
- h. Mezclar por 1 minuto a velocidad 2.

Continuación del apéndice 1.

Procedimiento 2 (determinación del flujo):

- a. Limpiar tabla de flujo y colocar el molde en el centro;
 - b. Coloque una capa de mortero hasta 1 pulgada;
 - c. Apisonar 20 veces en forma circular;
 - d. Colocar otra capa de mortero hasta llenar el molde;
 - e. Apisonar 20 veces en forma circular;
 - f. Esperar 1 minuto, luego remover el molde del mortero;
 - g. Realizar 25 caídas en 15 segundos en la mesa de flujo;
 - h. Lectura de 4 diámetros; y
 - i. Si cumplió, regresar la muestra de la mesa de flujo al recipiente y mezclar a velocidad 2 durante 15 segundos.
- Especificaciones para la determinación del flujo:
- Número de caídas en la mesa de flujo: 25 caídas en 15 segundos.
 - Cantidad de flujo a determinar: 110 +/-5 (suma de 4 diámetros).
 - Si el flujo es menor del límite agregarle más agua.
 - Si el flujo es mayor al límite desechar la mezcla y realizar nuevamente el **Procedimiento 1.**

NOTA: si en la determinación del flujo, el dato es menor al intervalo especificado (110 +/-5), devolver el mortero de la mesa de flujo a la mezcladora, agregar agua adicional y luego mezclar durante 1 ½ minuto, repetir el ensayo de la mesa de flujo, si en esta nueva prueba se encuentra dentro del rango especificado se prosigue nuevamente con el paso 6.

Continuación del apéndice 1.

Procedimiento 3 (llenado de moldes):

- a. Colocar el aceite hidráulico en moldes;
- b. Colocar el mortero dentro del molde a 1 pulgada;
- c. Dar 32 golpes en 20 segundos (16 en 4 segundos);
- d. Colocar nuevamente la mezcla hasta llenarlo completamente y se dan 32 golpes;
- e. Se rasa; y
- f. Almacenar en cámara de humedad de 20 a 24 h y luego almacenarlas en la cámara de almacenamiento saturada con cal, hasta el día del ensayo.

Nota:

- Dar 4 golpes por lado, paralelamente a las caras del molde hasta llegar a la cantidad deseada.
- Al colocar el aceite hidráulico se hace por molde, colocando inmediatamente la mezcla.
- El apisonamiento puede esperar, no necesariamente se hace inmediatamente después de haber colocado la mezcla.
- En no más de 2 minutos y 30 segundos empezar el llenado de los moldes.

Continuación del apéndice 1.

Procedimiento para realizar mezclas cal- puzolana

(Norma específica: ASTM C-593) (Norma auxiliar: ASTM C-109)

Pesar la siguiente cantidad de materiales:

- Cal hidratada: 180 gramos
- Puzolana: 360 gramos
- Arena (ASTM C-778): 1 480 gramos

Procedimiento 1 (mezcla de material):

- a. Mezclar cal y puzolana en un recipiente cerrado;
- b. Colocar agua en mezcladora;
- c. Agregar la cal y puzolana mezclada al agua y reposar durante 1 minuto;
- d. Luego mezclar 30 segundos a velocidad 1;
- e. Agregar arena durante 30 segundos a velocidad 1;
- f. Detener la mezcladora e iniciar a velocidad 2 durante 30 segundos;
- g. Detener mezcladora y dejar el mortero reposando durante 1 ½ minuto, durante los primeros 15 segundos de este intervalo de tiempo, raspar las paredes de la mezcladora, y cubrirla con la tapadera de madera; y
- h. Mezclar por 1 minuto a velocidad 2.

Continuación del apéndice 1.

Procedimiento 2 (determinación del flujo):

- a. Limpiar tabla de flujo y colocar el molde en el centro;
- b. Coloque una capa de mortero hasta 1 pulgada;
- c. Apisonar 20 veces en forma circular;
- d. Colocar otra capa de mortero hasta llenar el molde;
- e. Apisonar 20 veces en forma circular;
- f. Esperar 1 minuto, luego remover el molde del mortero;
- g. Realizar 10 caídas en 6 segundos en la mesa de flujo;
- h. Lectura de 4 diámetros; y
- i. Si cumplió, regresar la muestra de la mesa de flujo al recipiente y mezclar a velocidad 2 durante 15 segundos.

-Especificaciones para la determinación del flujo:

- Numero de caídas en la mesa de flujo: 10 caídas en 6 segundos.
- Cantidad de flujo a determinar: 65 a 75 (suma de 4 diámetros).
- Si el flujo es menor del límite agregarle más agua.
- Si el flujo es mayor al límite desechar la mezcla y realizar nuevamente el Procedimiento 1.

NOTA: si en la determinación del flujo, el dato es menor al intervalo especificado (65 a 75), devolver el mortero de la mesa de flujo a la mezcladora, agregar agua adicional y luego mezclar durante 1 ½ minuto, **repetir el ensayo de la mesa de flujo**, si en esta nueva prueba se encuentra dentro del rango especificado se prosigue nuevamente con el **paso 9**.

Continuación del apéndice 1.

Procedimiento 3 (llenado de moldes):

- a. Colocar el aceite hidráulico en moldes;
- b. Colocar el mortero dentro del molde a 1 pulgada;
- c. Dar 32 golpes en 20 segundos (16 en 4 segundos) ;
- d. Colocar nuevamente la mezcla hasta llenarlo completamente y se dan 32 golpes;
- e. Se rasa; y
- f. Almacenar en horno de vapor a 54 °C por 7 días.

Nota:

- Dar 4 golpes por lado, paralelamente a las caras del molde hasta llegar a la cantidad deseada.
- Al colocar el aceite hidráulico se hace por molde, colocando inmediatamente la mezcla.
- El apisonamiento puede esperar, no necesariamente se hace inmediatamente después de haber colocado la mezcla.
- En no más de 2 minutos y 30 segundos empezar el llenado de los moldes.

Continuación del apéndice 1.

DATOS GENERALES CEMENTO-PUZOLANA (IAR)

No	MUESTRA	FLUJO	AGUA	INGRESO CÁMARA	DÍA ENSAYO A 7 DÍAS	DÍA ENSAYO 28 DÍAS	OBS
0	Control	113	267,00	28/07/2011	04/08/2011	25/08/2011	
1	1GC	105	267,00	28/07/2011	04/08/2011	25/08/2011	
2	2T	100	267,00	28/07/2011	04/08/2011	25/08/2011	
3	2SC	99	267,00	03/08/2011	10/08/2011	31/08/2011	
4	1P	108,5	267,00	03/08/2011	10/08/2011	31/08/2011	
5	LC	104	267,00	03/08/2011	10/08/2011	31/08/2011	
6	ARIS	114	267,00	03/08/2011	10/08/2011	31/08/2011	
7	SFA	108	267,00	04/08/2011	11/08/2011	01/09/2011	
8	1S	103,5	267,00	04/08/2011	11/08/2011	01/09/2011	
9	SX1	103	267,00	04/08/2011	11/08/2011	01/09/2011	
10	1M	102,5	267,00	04/08/2011	11/08/2011	01/09/2011	
11	SX2	107,5	267,00	08/08/2011	15/08/2011	05/09/2011	
12	1N	99,5	267,00	08/08/2011	15/08/2011	05/09/2011	
13	1NPS	105,5	267,00	08/08/2011	15/08/2011	05/09/2011	
14	1SC	106	267,00	08/08/2011	15/08/2011	05/09/2011	
15	BAR FINO 2	104	267,00	09/08/2011	16/08/2011	06/09/2011	
16	1R	105	267,00	09/08/2011	16/08/2011	06/09/2011	Poco poroso
17	2T'	104,5	267,00	09/08/2011	16/08/2011	06/09/2011	
18	1C	97	267,00	09/08/2011	16/08/2011	06/09/2011	

Continuación del apéndice 1.

DATOS GENERALES CAL-PUZOLANA (IRC)

No	MUESTRA	FLUJO	AGUA	INGRESO HORNO	DÍA ENSAYO A 7 DÍAS	DÍA ENSAYO 28 DÍAS	OBS
I	1GC	74	365,00	26/07/2011	03/08/2011	23/08/2011	
II	2T	74,5	365,00	27/07/2011	03/08/2011	24/08/2011	
III	2SC	65	360,00	27/07/2011	03/08/2011	24/08/2011	
IV	1P	71	360,00	29/08/2011	05/09/2011	26/09/2011	
V	LC	66,5	360,00	29/08/2011	05/09/2011	26/09/2011	
VI	ARIS	70	360,00	29/08/2011	05/09/2011	26/09/2011	
VII	SFA	65	370,00	19/09/2011	26/09/2011	17/10/2011	
VIII	1S	70,5	360,00	19/09/2011	26/09/2011	17/10/2011	
IX	SX1	65	360,00	19/09/2011	26/09/2011	17/10/2011	
X	1M	68	365,00	26/09/2011	03/10/2011	24/10/2011	
XI	SX2	71	360,00	26/09/2011	03/10/2011	24/10/2011	
XII	1N	65,5	360,00	26/09/2011	03/10/2011	24/10/2011	
XIII	1NPS	66,5	365,00	03/10/2011	10/10/2011	31/10/2011	
XIV	1SC	65	360,00	03/10/2011	10/10/2011	31/10/2011	
XV	BAR FINO 2	74,5	360,00	03/10/2011	10/10/2011	31/10/2011	
XVI	1R	73	360,00	10/10/2011	17/10/2011	07/11/2011	
XVII	2T'	65	365,00	10/10/2011	17/10/2011	07/11/2011	
XVIII	1C	69	360,00	10/10/2011	17/10/2011	07/11/2011	

Continuación del apéndice 1.

FORMATOS DE LABORATORIO IRC

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1 GC
NOMENCLATURA	I
CANTIDAD DE AGUA	365 ML
MEDIDA CON VERNIER	18,5+18,5+18,5+18,5
FLUJO	74
DÍA INGRESO AL HORNO	MARTES 26 JULIO 2011
HORA INGRESO	11:00 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	2 AGOSTO
HORA DE SALIDA	11:00 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	MIÉRCOLES 3 AGOSTO 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	MIÉRCOLES 24 AGOSTO 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	2T
NOMENCLATURA	II
CANTIDAD DE AGUA	365 ML
MEDIDA CON VERNIER	18,5+18,5+19+18,5
FLUJO	74,5
DÍA INGRESO AL HORNO	MIÉRCOLES 27 JULIO 2011
HORA INGRESO	11:30 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	3 AGOSTO 2011
HORA DE SALIDA	11:30 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	MIÉRCOLES 3 AGOSTO 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	MIÉRCOLES 24 AGOSTO 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	2 SC
NOMENCLATURA	III
CANTIDAD DE AGUA	360 ML
MEDIDA CON VERNIER	16,5+16,5+16+16
FLUJO	65
DÍA INGRESO AL HORNO	MIÉRCOLES 27 JULIO 2011
HORA INGRESO	11:30 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	3 AGOSTO 2011
HORA DE SALIDA	11:30 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	MIÉRCOLES 3 AGOSTO 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	MIÉRCOLES 24 AGOSTO 2011

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1P
NOMENCLATURA	IV
CANTIDAD DE AGUA	360 ML
MEDIDA CON VERNIER	18+17+18+18
FLUJO	71
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 29 AGOSTO
HORA INGRESO	9:00 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 5 SEPTIEMBRE
HORA DE SALIDA	9:00 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 5 SEPTIEMBRE
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 26 SEPTIEMBRE

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	LC
NOMENCLATURA	V
CANTIDAD DE AGUA	360 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	66,5
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 29 AGOSTO
HORA INGRESO	9:00 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 5 SEPTIEMBRE
HORA DE SALIDA	9:00 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 5 SEPTIEMBRE
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 26 SEPTIEMBRE

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	ARIS
NOMENCLATURA	VI
CANTIDAD DE AGUA	360 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	70
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 29 AGOSTO
HORA INGRESO	9:00 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 5 SEPTIEMBRE
HORA DE SALIDA	9:00 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 5 SEPTIEMBRE
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 26 SEPTIEMBRE

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	SFA
NOMENCLATURA	VII
CANTIDAD DE AGUA	370 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	65
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 19 DE SEPTIEMBRE
HORA INGRESO	9:30 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 26 DE SEPTIEMBRE
HORA DE SALIDA	9:30 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 26 DE SEPTIEMBRE
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 17 DE OCTUBRE

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1S
NOMENCLATURA	VIII
CANTIDAD DE AGUA	360 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	70,5
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 19 DE SEPTIEMBRE
HORA INGRESO	9:30 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 26 DE SEPTIEMBRE
HORA DE SALIDA	9:30 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 26 DE SEPTIEMBRE
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 17 DE OCTUBRE

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	SX1
NOMENCLATURA	IX
CANTIDAD DE AGUA	360 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	65
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 19 DE SEPTIEMBRE
HORA INGRESO	9:30 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 26 DE SEPTIEMBRE
HORA DE SALIDA	9:30 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 26 DE SEPTIEMBRE
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 17 DE OCTUBRE

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1M
NOMENCLATURA	X
CANTIDAD DE AGUA	365 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	68
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 26 DE SEPTIEMBRE 2011
HORA INGRESO	10:30 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 3 DE SEPTIEMBRE 2011
HORA DE SALIDA	10:30 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 3 DE OCTUBRE 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 24 DE OCTUBRE 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	SX2
NOMENCLATURA	XI
CANTIDAD DE AGUA	360 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	71
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 26 DE SEPTIEMBRE 2011
HORA INGRESO	10:30 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 3 DE SEPTIEMBRE 2011
HORA DE SALIDA	10:30 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 3 DE OCTUBRE 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 24 DE OCTUBRE 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1 N
NOMENCLATURA	XII
CANTIDAD DE AGUA	360 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	65,5
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 26 DE SEPTIEMBRE 2011
HORA INGRESO	10:30 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 3 DE SEPTIEMBRE 2011
HORA DE SALIDA	10:30 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 3 DE OCTUBRE 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 24 DE OCTUBRE 2011

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1 NPS
NOMENCLATURA	XIII
CANTIDAD DE AGUA	365 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	66,5
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 3 DE OCTUBRE 2011
HORA INGRESO	11:30 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 10 DE OCTUBRE 2011
HORA DE SALIDA	11:30 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 10 DE OCTUBRE 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 31 OCTUBRE 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1 SC
NOMENCLATURA	XIV
CANTIDAD DE AGUA	360 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	65
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 3 DE OCTUBRE 2011
HORA INGRESO	11:30 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 10 DE OCTUBRE 2011
HORA DE SALIDA	11:30 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 10 DE OCTUBRE 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 31 OCTUBRE 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	BAR FINO 2
NOMENCLATURA	XV
CANTIDAD DE AGUA	360 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	74,5
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 3 DE OCTUBRE 2011
HORA INGRESO	11:30 AM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 10 DE OCTUBRE 2011
HORA DE SALIDA	11:30 AM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 10 DE OCTUBRE 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 31 OCTUBRE 2011

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1R
NOMENCLATURA	XVI
CANTIDAD DE AGUA	360 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	73
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 10 OCTUBRE 2011
HORA INGRESO	12:30 PM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 17 OCTUBRE 2011
HORA DE SALIDA	12:30 PM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 17 OCTUBRE 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 7 NOVIEMBRE 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	2T'
NOMENCLATURA	XVII
CANTIDAD DE AGUA	365 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	65
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 10 OCTUBRE 2011
HORA INGRESO	12:30 PM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 17 OCTUBRE 2011
HORA DE SALIDA	12:30 PM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 17 OCTUBRE 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 7 NOVIEMBRE 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CAL-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1C
NOMENCLATURA	XVIII
CANTIDAD DE AGUA	360 ML
MEDIDA CON VERNIER	
FLUJO	69
DÍA INGRESO AL HORNO	LUNES 10 OCTUBRE 2011
HORA INGRESO	12:30 PM
DÍA SALIDA DEL HORNO	LUNES 17 OCTUBRE 2011
HORA DE SALIDA	12:30 PM
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	LUNES 17 OCTUBRE 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	LUNES 7 NOVIEMBRE 2011

Continuación del apéndice 1.

FORMATOS DE LABORATORIO IAR

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	-----
NOMENCLATURA	0
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Control
CANTIDAD DE AGUA	242 ml
MEDIDA CON VERNIER	28,5+25,8+28+28
FLUJO	113
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Jueves 28 julio 2011
HORA INGRESO	11:39 am
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Viernes 29 julio 2011
HORA DE SALIDA	11:39
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Jueves 4 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Jueves 25 agosto 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1GC
NOMENCLATURA	1
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	26+27,5+26,5+25
FLUJO	105
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Jueves 28 julio 2011
HORA INGRESO	12:00 pm
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Viernes 29 julio 2011
HORA DE SALIDA	12:00
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Jueves 4 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Jueves 25 agosto 2011

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	2 T
NOMENCLATURA	2
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	24+24+27+25
FLUJO	100
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Jueves 28 julio 2011
HORA INGRESO	12:35 pm
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Viernes 29 julio 2011
HORA DE SALIDA	12:35 pm
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Jueves 4 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Jueves 25 agosto 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	2 SC
NOMENCLATURA	3
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	24,5+25,5+24,5+24,50
FLUJO	99
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Miércoles 3 agosto 2011
HORA INGRESO	11:00 am
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Jueves 4 agosto 2011
HORA DE SALIDA	11:00 am
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Miércoles 10 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Miércoles 31 agosto 2011

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1 P
NOMENCLATURA	4
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	28+26,5+26,5+27,5
FLUJO	108,5
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Miércoles 3 agosto 2011
HORA INGRESO	11:25 am
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Jueves 4 agosto 2011
HORA DE SALIDA	11:25 am
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Miércoles 10 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Miércoles 31 agosto 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	LC
NOMENCLATURA	5
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	26,5+26+25,5+26
FLUJO	104
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Miércoles 3 agosto 2011
HORA INGRESO	11:50 am
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Jueves 4 agosto 2011
HORA DE SALIDA	11:50 am
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Miércoles 10 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Miércoles 31 agosto 2011

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	ARIS
NOMENCLATURA	6
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	27,5+29+29,5+28
FLUJO	114
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Miércoles 3 agosto 2011
HORA INGRESO	12:10 pm
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Jueves 4 agosto 2011
HORA DE SALIDA	12:10 pm
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Miércoles 10 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Miércoles 31 agosto 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	SFA
NOMENCLATURA	7
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	27,5+26,5+27+27
FLUJO	108
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Jueves 4 agosto 2011
HORA INGRESO	12:00 pm
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Viernes 5 agosto 2011
HORA DE SALIDA	12:00 pm
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Jueves 11 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Jueves 1 septiembre 2011

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1 S
NOMENCLATURA	8
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	26,5+26,5+25+25,5
FLUJO	103,5
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Jueves 4 agosto 2011
HORA INGRESO	12:20 pm
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Viernes 5 agosto 2011
HORA DE SALIDA	12:20 pm
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Jueves 11 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Jueves 1 septiembre 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	SX1
NOMENCLATURA	9
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	25+26+25,5+26,5
FLUJO	103
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Jueves 4 agosto 2011
HORA INGRESO	12:40 pm
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Viernes 5 agosto 2011
HORA DE SALIDA	12:40 pm
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Jueves 11 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Jueves 1 septiembre 2011

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1 M
NOMENCLATURA	10
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	25+26,5+26+25
FLUJO	102,5
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Jueves 4 agosto 2011
HORA INGRESO	1:20 pm
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Viernes 5 agosto 2011
HORA DE SALIDA	1:20 pm
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Jueves 11 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 284	Jueves 1 septiembre 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	SX2
NOMENCLATURA	11
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	26+26,5+27+28
FLUJO	107,5
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Lunes 8 agosto 2011
HORA INGRESO	10:00 am
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Martes 9 agosto 2011
HORA DE SALIDA	10:00 am
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Lunes 15 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Lunes 9 septiembre 2011

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1 N
NOMENCLATURA	12
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	25+25+25+24,5
FLUJO	99,5
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Lunes 8 agosto 2011
HORA INGRESO	10:20 am
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Martes 9 agosto 2011
HORA DE SALIDA	10:20 am
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Lunes 15 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Lunes 9 septiembre 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICO	1 NPS
NOMENCLATURA	13
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	26+27+26,5+26
FLUJO	105,5
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Lunes 8 agosto 2011
HORA INGRESO	10:40 am
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Martes 9 agosto 2011
HORA DE SALIDA	10:40 am
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Lunes 15 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Lunes 9 septiembre 2011

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICA	1 SC
NOMENCLATURA	14
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	27+27+26+26
FLUJO	106
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Lunes 8 agosto 2011
HORA INGRESO	11:00 am
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Martes 9 agosto 2011
HORA DE SALIDA	11:00 am
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Lunes 15 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Lunes 9 septiembre 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICA	BAR FINO 2
NOMENCLATURA	15
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	25,5+26,5+27+25
FLUJO	104
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Martes 9 agosto 2011
HORA INGRESO	11:00 am
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Miércoles 10 agosto 2011
HORA DE SALIDA	11:00 am
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Martes 16 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Martes 06 septiembre 2011

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICA	1 R
NOMENCLATURA	16
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	27+27+25+26
FLUJO	105
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Martes 9 agosto 2011
HORA INGRESO	11:20 am
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Miércoles 10 agosto 2011
HORA DE SALIDA	11:20 am
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Martes 16 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Martes 06 septiembre 2011

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICA	2T'
NOMENCLATURA	17
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	26,5+25,5+27+25,5
FLUJO	104,5
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Martes 9 agosto 2011
HORA INGRESO	11:40 am
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Miércoles 10 agosto 2011
HORA DE SALIDA	11:40 am
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Martes 16 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Martes 06 septiembre 2011

Continuación del apéndice 1.

INFORMACIÓN DE MATERIALES VOLCÁNICOS MEZCLAS CEMENTO-PUZOLANA	
MATERIAL VOLCÁNICA	1 C
NOMENCLATURA	18
TIPO (CONTROL / PRUEBA)	Prueba
CANTIDAD DE AGUA	267 ml
MEDIDA CON VERNIER	24,5+23+24,5+25
FLUJO	97
DÍA INGRESO CÁMARA HUMEDAD	Martes 9 agosto 2011
HORA INGRESO	12:00 pm
DÍA INGRESO CÁMARA DE ALMACENAMIENTO	Miércoles 10 agosto 2011
HORA DE SALIDA	12:00 pm
FECHA ENSAYO A 7 DÍAS	Martes 16 agosto 2011
FECHA ENSAYO A 28 DÍAS	Martes 06 septiembre 2011

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Datos ensayos a compresión (IAR)

DATOS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN CEMENTO-PUZOLANA (IAR)											
Descripción de puzolana	Peso	Aristas		Área	Carga	Esfuerzo	Xm	σ	Cv	% f'c	Obs
	(gr)	a (cm)	b (cm)	(cm ²)	(kg)	(Mpa)	(u)	(u)	(u)		
0-7 a	283,50	5,10	5,20	26,52	8 780	33,11					
0-7 b	281,80	5,20	5,10	26,52	8 520	32,13					
0-7 c	281,10	5,20	5,10	26,52	8 750	32,99	32,74	0,54	2%	100,00	
0-28 a	282,00	5,03	5,07	25,50	11 200	43,92					
0-28 b	283,00	5,05	5,11	25,81	11 380	44,10					
0-28 c	283,50	5,02	5,14	25,80	11 140	43,17	43,73	0,49	1%	100,00	
1-7a	278,80	5,20	5,10	26,52	7 380	27,83					
1-7 b	278,90	5,20	5,10	26,52	7 720	29,11					
1-7 c	277,40	5,20	5,10	26,52	7 400	27,90	28,28	0,72	3%	86,37	
1-28 a	285,40	5,12	5,00	25,60	9 650	37,70					
1-28 b	283,00	4,97	5,09	25,30	9 160	36,21					
1-28 c	283,00	5,10	5,04	25,70	9 600	37,35	37,08	0,78	2%	84,80	
2-7 a	280,20	5,10	5,10	26,01	6 680	25,68					
2-7 b	281,50	5,20	5,10	26,52	7 420	27,98					
2-7 c	279,00	5,20	5,10	26,52	6 900	26,02	26,56	1,24	5%	81,12	
2-28 a	281,20	5,03	5,06	25,45	8 040	31,59					
2-28 b	279,00	5,13	5,08	26,06	8 620	33,08					
2-28 c	281,00	5,11	5,00	25,55	8 350	32,68	32,45	0,77	2%	74,20	
3-7 a	281,00	5,08	5,08	25,81	6 900	26,74					
3-7 b	281,50	5,06	5,08	25,70	7 010	27,27					
3-7 c	281,00	5,14	5,04	25,91	7 550	29,14	27,72	1,26	5%	84,65	
3-28 a	283,30	5,06	5,08	25,70	9 610	37,39					
3-28 b	282,80	5,06	5,09	25,76	9 160	35,57					
3-28 c	282,90	5,12	5,03	25,75	9 290	36,07	36,34	0,94	3%	83,10	
4-7 a	280,10	5,08	5,07	25,76	7 050	27,37					
4-7 b	280,60	5,09	5,12	26,06	7 080	27,17					
4-7 c	285,00	5,12	5,02	25,70	7 900	((30,74))	27,27	0,15	1%	83,29	4-7-c, no fue tomado en cuenta
4-28 a	282,80	5,00	5,08	25,40	9 370	36,89					
4-28 b	284,50	5,08	5,00	25,40	9 520	37,48					
4-28 c	280,50	5,07	5,01	25,40	9 680	38,11	37,49	0,61	2%	85,74	
5-7 a	282,80	5,08	4,95	25,15	7 500	29,83					
5-7 b	282,60	5,10	5,07	25,86	7 620	29,47					
5-7 c	282,95	5,09	4,97	25,30	7 700	30,44	29,91	0,49	2%	91,35	
5-28 a	280,20	5,06	5,01	25,35	9 500	37,47					
5-28 b	283,00	5,08	5,06	25,70	10 080	39,21					

Continuación del apéndice 2.

5-28 c	281,60	5,06	5,01	25,35	9 480	37,40	38,03	1,03	3%	86,96	
6-7 a	285,60	5,14	5,04	25,91	7 920	30,57					
6-7 b	280	5,11	4,98	25,45	7 800	30,65					
6-7 c	281,20	5,10	5,08	25,91	7 730	29,84	30,35	0,45	1%	92,70	
6-28 a	284,00	5,11	5,00	25,55	10 750	42,07					
6-28 b	282,70	5,06	4,98	25,20	10 250	40,68					
6-28 c	280,40	5,06	4,96	25,10	10 580	42,16	41,64	0,83	2%	95,21	
7-7 a	280,00	5,09	5,04	25,65	7 730	30,13					
7-7 b	277,40	5,10	4,99	25,45	7 480	29,39					
7-7 c	277,50	5,10	5,00	25,50	7 360	28,86	29,46	0,64	2%	89,98	
7-28 a	281,00	5,07	5,04	25,55	8 570	(33,54)					7-28-a, no fue tomado en cuenta
7-28 b	281,10	5,11	5,08	25,96	9 630	37,10					
7-28 c	280,90	5,01	5,12	25,65	10 000	38,98	38,04	1,33	4%	86,99	
8-7 a	284,30	5,00	5,11	25,55	8 540	33,42					
8-7 b	281,80	4,99	5,10	25,45	7 940	31,20					
8-7 c	282,80	5,01	4,98	24,95	8 320	33,35	32,66	1,26	4%	99,74	
8-28 a	285,60	5,04	5,09	25,65	10 320	40,23					
8-28 b	283,00	5,01	5,12	25,65	10 440	40,70					
8-28 c	286,10	5,02	5,15	25,85	9 780	37,83	39,59	1,54	4%	90,52	
9-7 a	282,00	5,08	5,05	25,65	8 160	31,81					
9-7 b	282,00	5,08	5,07	25,76	8 000	31,06					
9-7 c	282,70	5,08	5,08	25,81	8 120	31,47	31,44	0,37	1%	96,04	
9-28 a	280,60	5,02	5,12	25,70	10 180	39,61					
9-28 b	282,00	5,14	5,03	25,85	10 660	41,23					
9-28 c	281,00	5,06	5,03	25,45	9 800	38,50	39,78	1,37	3%	90,97	
10-7 a	282,00	5,08	5,09	25,86	7 910	30,59					
10-7 b	281,10	5,08	5,05	25,65	7 850	30,60					
10-7 c	280,60	5,07	4,97	25,20	6 450	25,60	30,60	0,01	0%	93,44	10-7-c, no fue tomado en cuenta
10-28 a	284,40	5,03	5,10	25,65	9 780	38,12					
10-28 b	284,40	5,04	5,11	25,75	9 810	38,09					
10-28 c	286,00	5,09	4,94	25,14	9 780	38,90	38,37	0,46	1%	87,74	
11-7 a	279,80	5,04	4,99	25,15	8 180	32,53					
11-7 b	284,20	5,06	5,10	25,81	7 950	30,81					
11-7 c	280,30	5,15	4,97	25,60	8 730	34,11	32,48	1,65	5%	99,20	
11-28 a	283,50	5,11	5,02	25,65	9 770	38,09					
11-28 b	280,30	5,06	4,97	25,15	10 170	40,44					

Continuación del apéndice 2.

11-28 c	284,50	5,11	5,02	25,65	9 910	38,63	39,05	1,23	3%	89,30	
12-7 a	281,10	5,09	5,08	25,86	7 900	30,55					
12-7 b	285,40	5,18	5,09	26,37	8 040	30,49					
12-7 c	281,50	5,08	5,13	26,06	8 420	32,31	32,12	1,03	3%	95,054	
12-28 a	281,00	5,08	5,06	25,70	10 410	40,50					
12-28 b	283,50	5,12	5,01	25,65	9 730	37,93					
12-28 c	282,90	4,93	5,13	25,29	10 300	40,73	39,72	1,55	4%	90,83	
13-7 a	280,90	5,01	5,13	25,70	8 760	34,08					
13-7 b	282,00	5,04	5,10	25,70	8 640	33,61					
13-7 c	281,00	5,00	5,10	25,50	8 580	33,65	33,78	0,26	1%	103,17	
13-28 a	283,70	5,03	5,06	25,45	10 400	40,86					
13-28 b	281,50	5,11	4,94	25,24	10 790	42,74					
13-28 c	280,80	5,08	4,97	25,25	9 870	39,09	40,90	1,83	4%	93,53	
14-7 a	278,50	5,07	5,02	25,45	8 050	31,63					
14-7 b	278,30	5,03	5,10	25,65	8 100	31,58					
14-7 c	278,30	5,05	5,07	25,60	7 800	30,46	31,22	0,66	2%	95,36	
14-28 a	278,70	5,08	4,99	25,35	9 320	36,77					
14-28 b	279,70	5,08	4,98	25,30	9 290	36,72					
14-28 c	277,70	5,08	5,01	25,45	8 980	35,28	36,26	0,84	2%	82,91	
15-7 a	282,00	5,03	5,10	25,65	7 320	28,53					
15-7 b	280,00	5,10	5,00	25,50	7 440	29,18					
15-7 c	279,30	5,04	5,15	25,96	7 410	28,55	28,75	0,37	1%	87,82	
15-28 a	278,70	5,11	4,92	25,14	9 700	38,58					
15-28 b	280,10	5,12	4,94	25,29	9 530	37,68					
15-28 c	283,10	5,10	4,98	25,40	9 160	36,07	37,44	1,27	3%	85,62	
16-7 a	280,00	4,97	5,10	25,35	7 590	29,94					
16-7 b	280,00	5,08	5,01	25,45	7 980	31,35					
16-7 c	280,00	5,03	5,08	25,55	8 190	32,05	31,12	1,07	3%	95,04	
16-28 a	282,20	5,08	5,03	25,55	10 550	41,29					
16-28 b	281,40	5,07	5,06	25,65	10 760	41,94					
16-28 c	283,40	5,07	5,02	25,45	10 900	42,83	42,02	0,77	2%	96,09	
17-7 a	277,40	5,01	5,06	25,35	7 500	29,59					
17-7 b	276,80	5,07	5,10	25,86	8 010	30,98					
17-7 c	276,80	5,00	5,08	25,40	7 680	30,24	30,27	0,70	2%	92,44	
17-28 a	278,70	5,07	5,02	25,45	10 860	42,67					
17-28 b	279,60	5,07	5,00	25,35	10 430	41,14					
17-28 c	278,20	5,07	5,07	25,70	10 450	40,65	41,49	1,05	3%	94,88	
18-7 a	285,20	4,99	5,16	25,75	7 660	29,75					
18-7 b	278,50	5,07	5,02	25,45	7 290	28,64					

Continuación del apéndice 2.

18-7 c	278,80	5,05	5,10	25,76	7 460	28,97	29,12	0,57	2%	88,93	
18-28 a	283,80	5,12	5,00	25,60	10 300	40,23					
18-28 b	280,00	5,05	5,01	25,30	9 520	37,63					
18-28 c	281,80	5,13	4,94	25,34	7 960	31,41	38,93	1,84	5%	89,03	18-28- c no tomado en cuenta

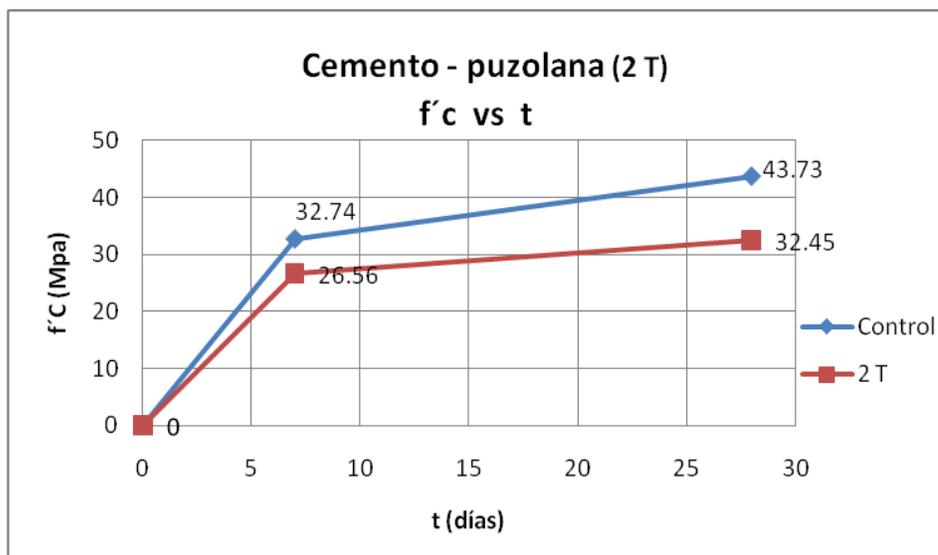
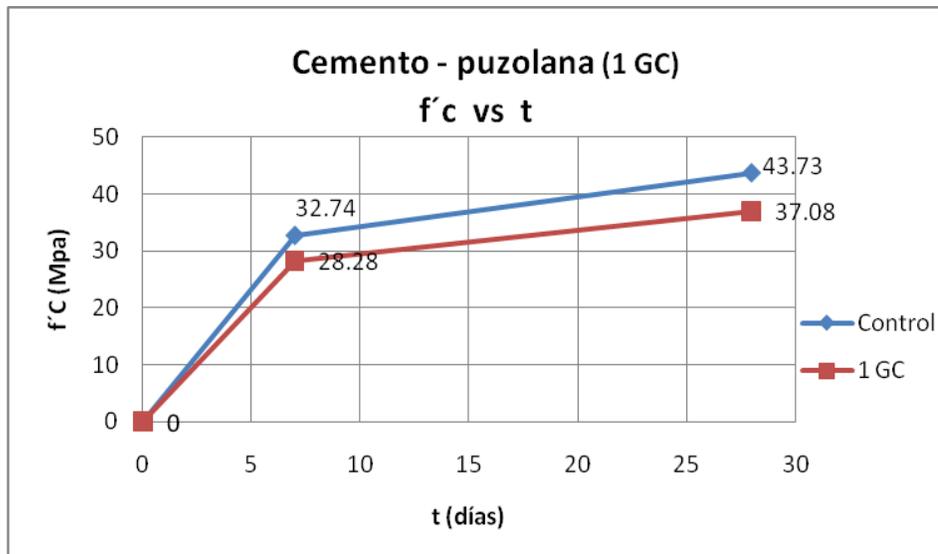
Continuación del apéndice 2.

TABLA RESUMEN IAR

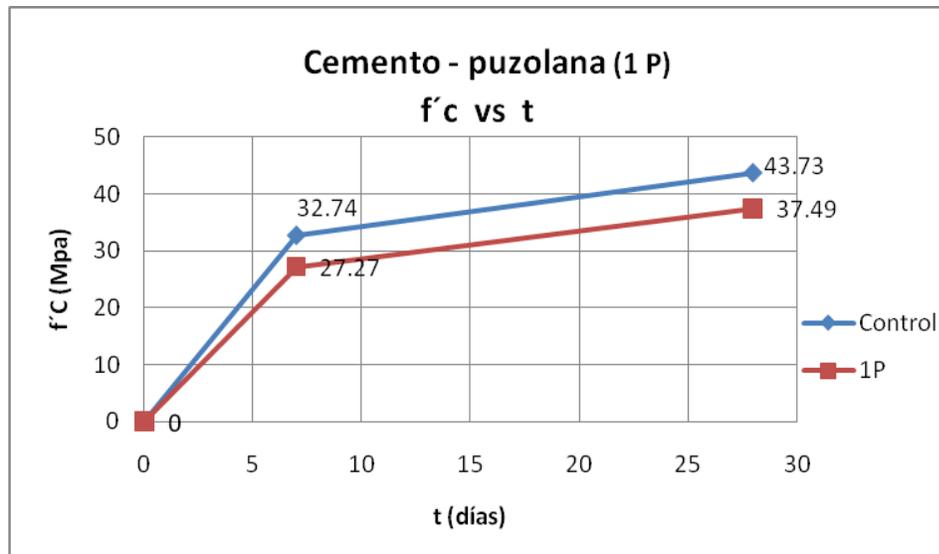
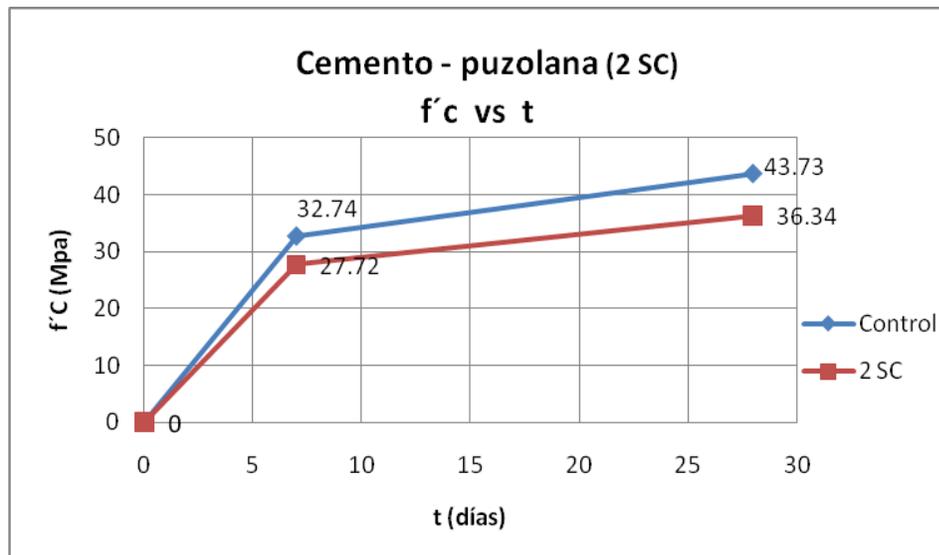
Nom	Material	f'c 7 días (Mpa)	f'c 28 días (Mpa)	% f'c 7 días	% f'c 28 días	Aumento de f'c Mpa	σ (f'c 7 días)	σ (f'c 28 días)	Cv (f'c 7 días)	Cv (f'c 28 días)	Obs
0	Control	32,74	43,73	100,00	100,00	10,99	0,54	0,49	2%	1%	
1	1GC	28,28	37,08	86,37	84,80	8,80	0,72	0,78	3%	2%	
2	2T	26,56	32,45	81,12	74,20	5,89	1,24	0,77	5%	2%	No cumple a 28
3	2SC	27,72	36,34	84,65	83,10	8,62	1,26	0,94	5%	3%	
4	1P	27,27	37,49	83,29	85,74	10,22	0,15	0,61	1%	2%	
5	LC	29,91	38,03	91,35	86,96	8,12	0,49	1,03	2%	3%	
6	ARIS	30,35	41,64	92,70	95,21	11,28	0,45	0,83	1%	2%	
7	SFA	29,46	38,47	89,98	86,99	9,01	0,64	1,33	2%	3%	Ensayo a 27 días
8	1S	32,66	39,92	99,74	90,52	7,26	1,26	1,54	4%	4%	Ensayo a 27 días
9	SX1	31,44	40,17	96,04	90,97	8,73	0,37	1,37	1%	3%	Ensayo a 27 días
10	1M	30,60	38,73	93,44	87,74	8,13	0,01	0,46	0%	1%	Ensayo a 27 días
11	SX2	28,42	39,05	99,20	89,30	10,63	1,65	1,23	6%	3%	Ensayo a 8 días
12	1N	27,22	39,72	95,04	90,83	12,50	1,03	1,55	4%	4%	Ensayo a 8 días
13	1NPS	29,55	40,90	103,17	93,53	11,35	0,26	1,83	1%	4%	Ensayo a 8 días
14	1SC	27,31	36,26	95,36	82,91	8,95	0,66	0,84	2%	2%	Ensayo a 8 días
15	BAR FINO 2	28,75	37,44	87,82	85,62	8,69	0,37	1,27	1%	3%	
16	1R	31,12	42,02	95,04	96,09	10,90	1,07	0,77	3%	2%	
17	2T'	30,27	41,49	92,44	94,88	11,22	0,70	1,05	2%	3%	
18	1C	29,12	38,93	88,93	89,03	9,81	0,57	1,84	2%	5%	

Continuación del apéndice 2.

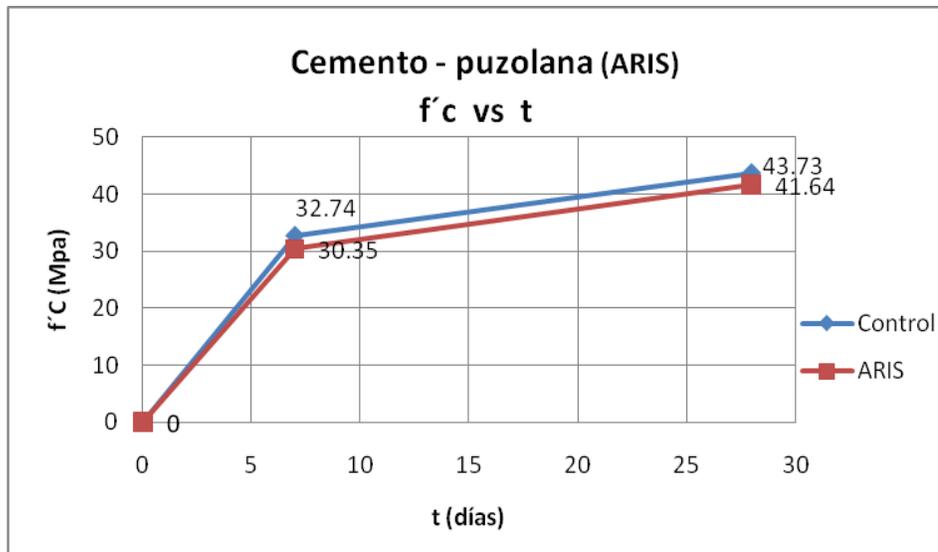
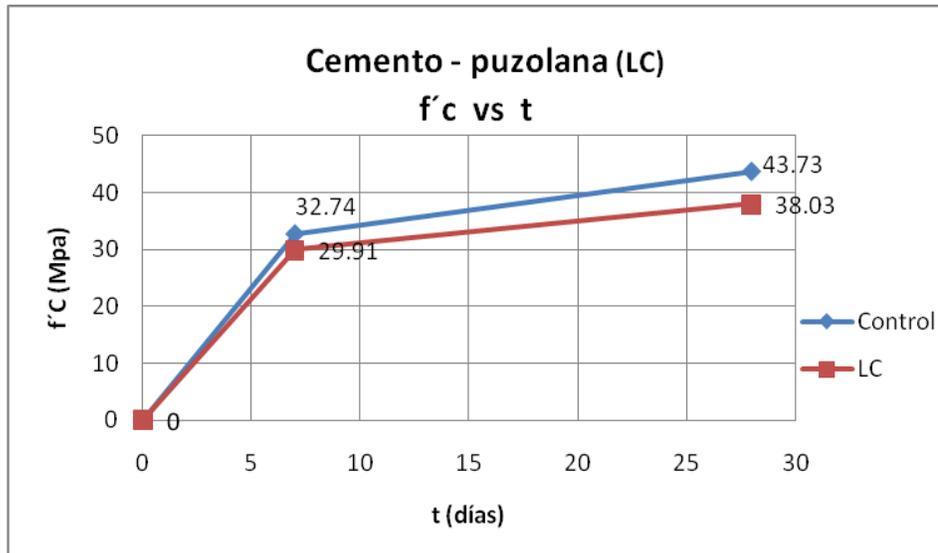
Gráficas individuales IAR



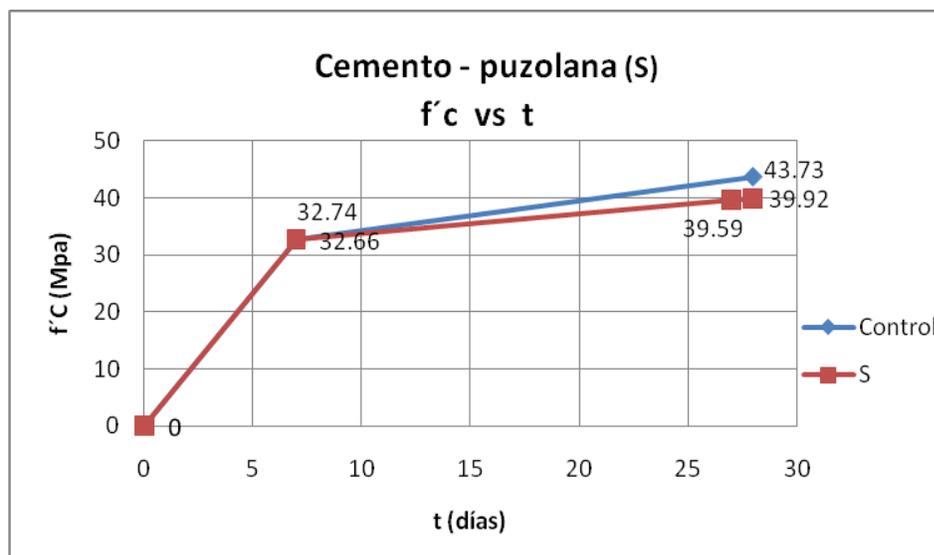
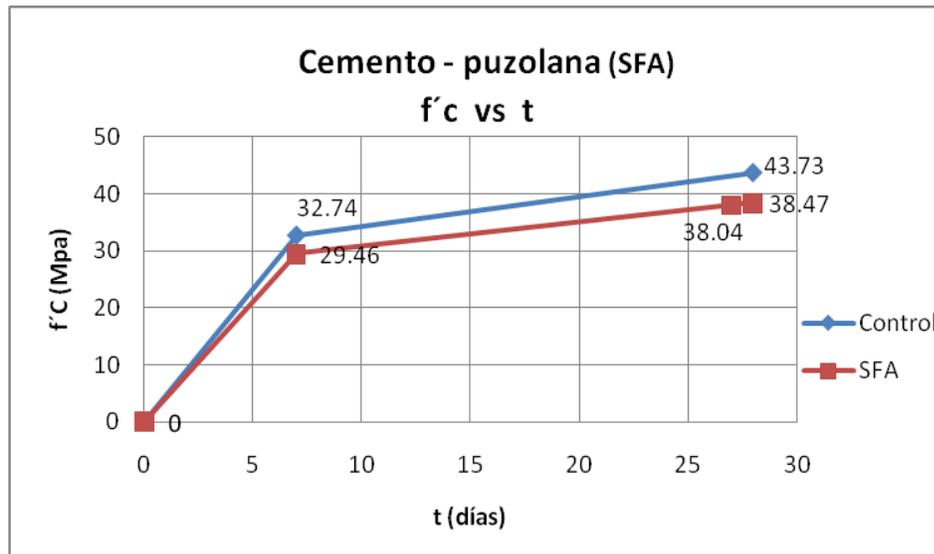
Continuación del apéndice 2.



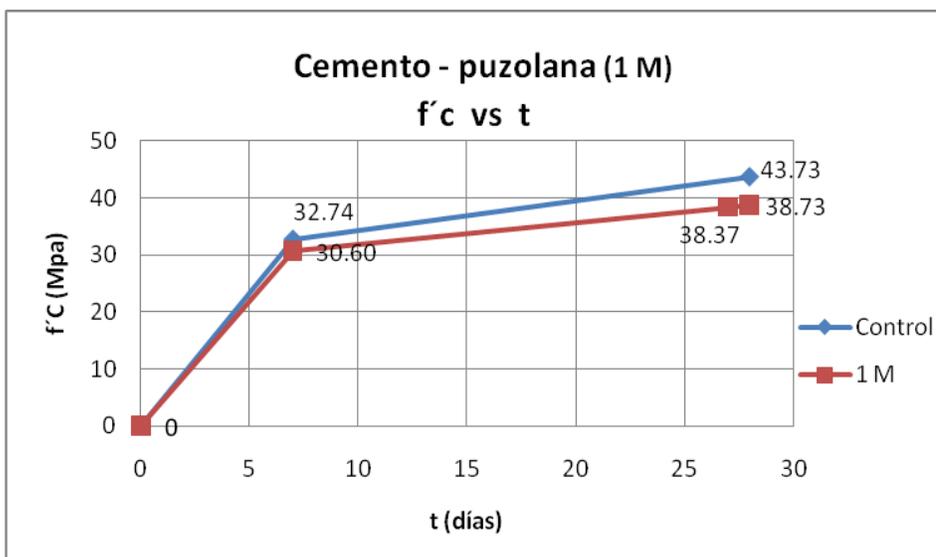
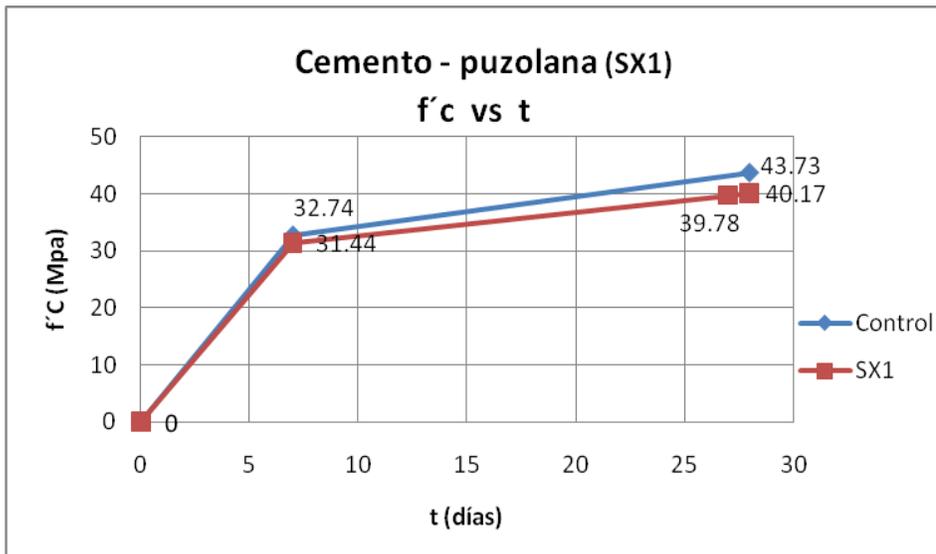
Continuación del apéndice 2.



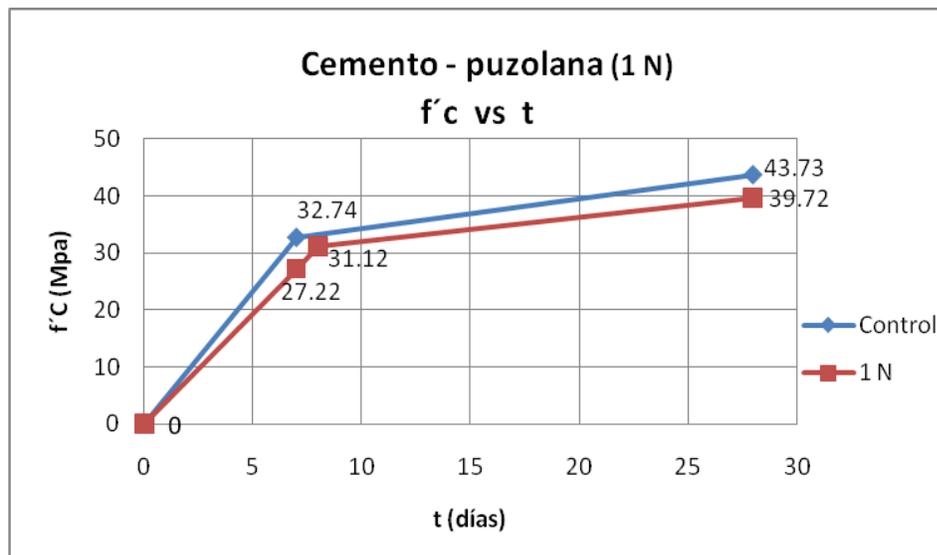
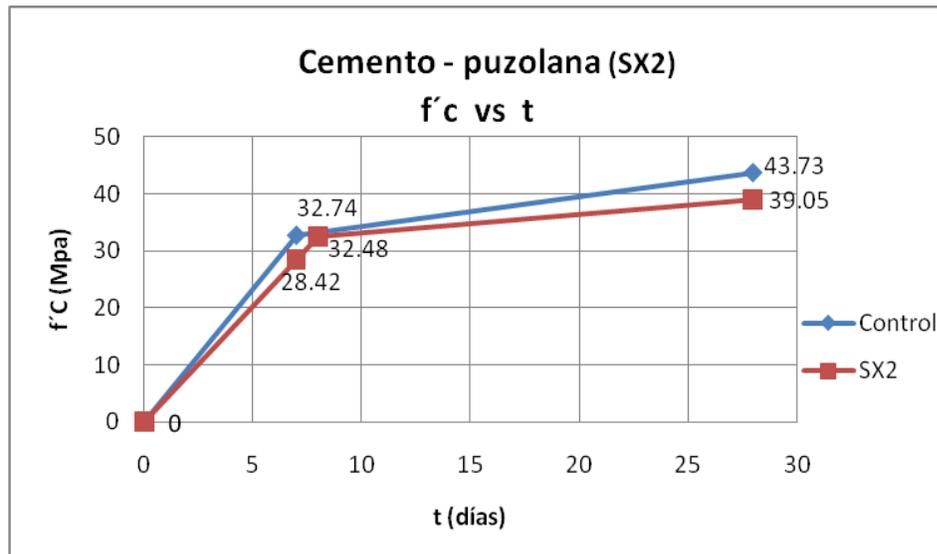
Continuación del apéndice 2.



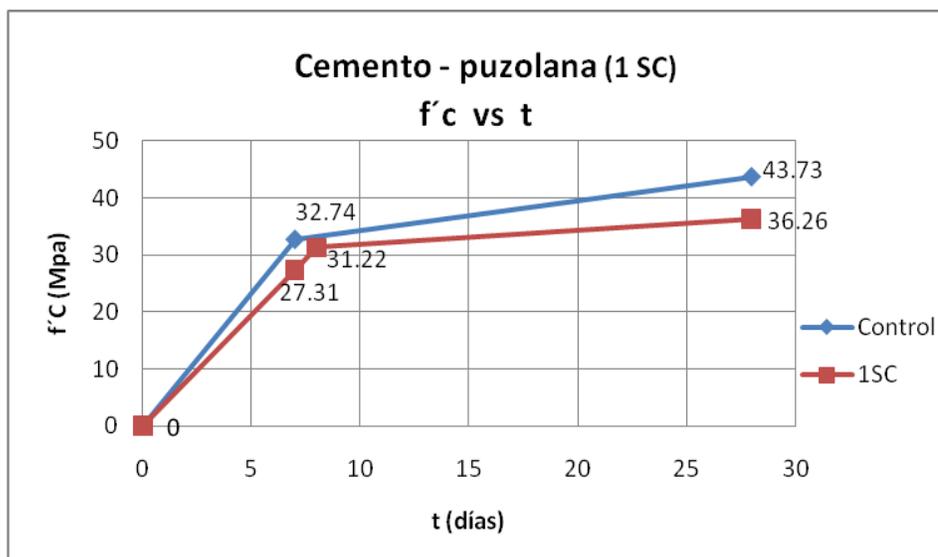
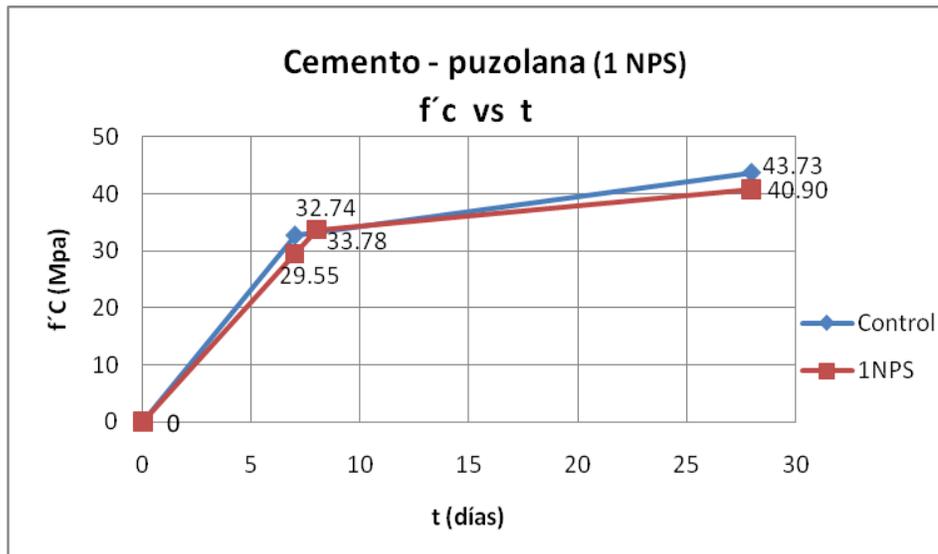
Continuación del apéndice 2.



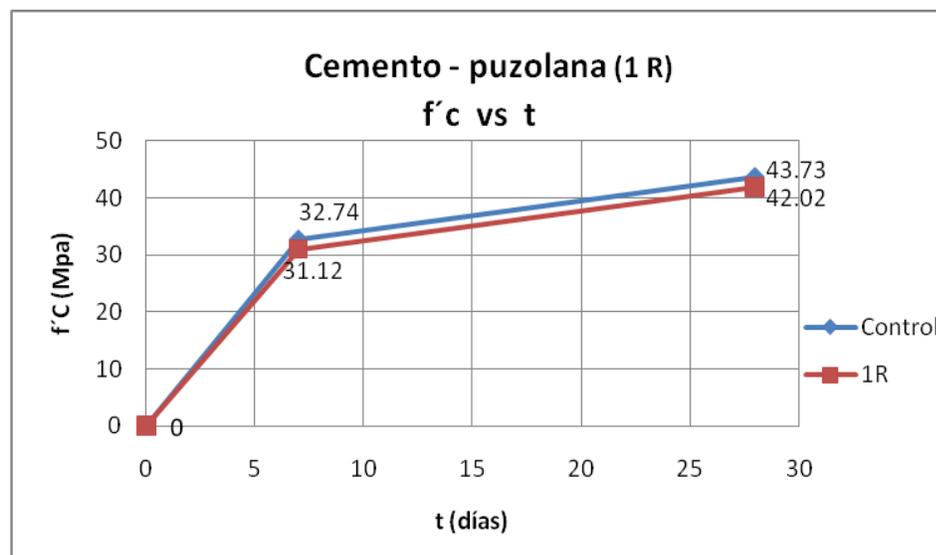
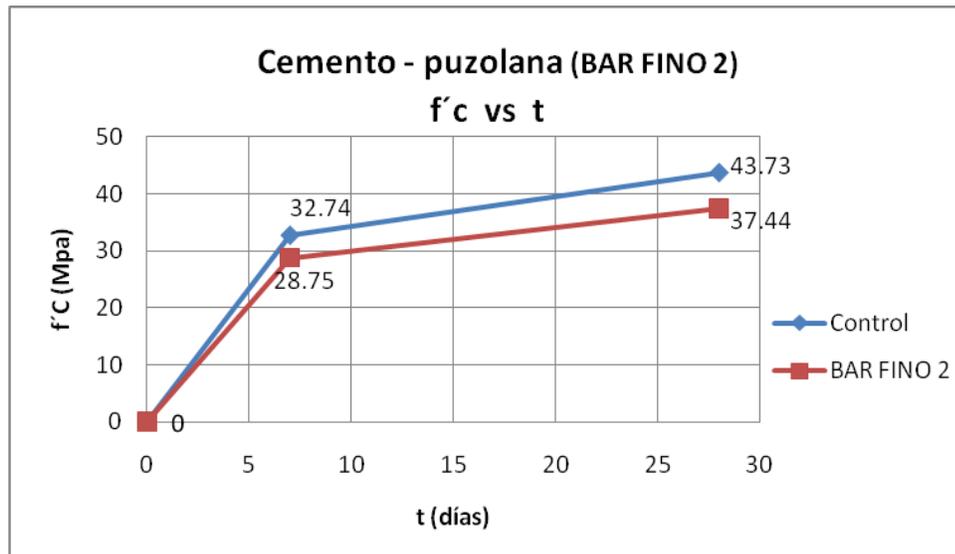
Continuación del apéndice 2.



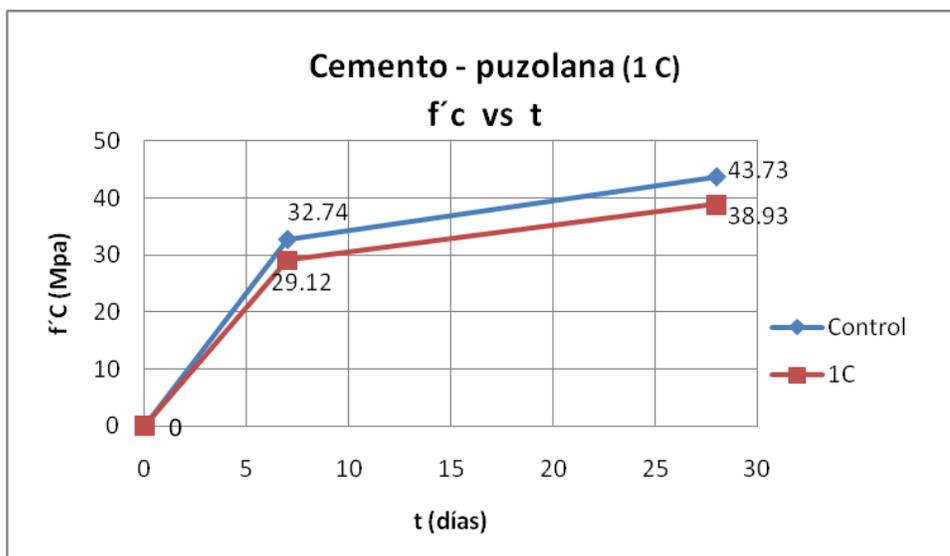
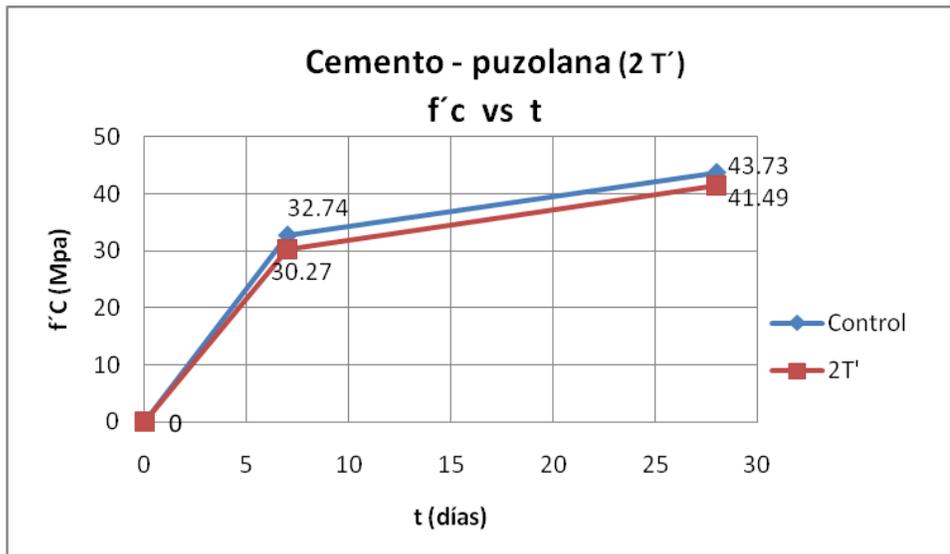
Continuación del apéndice 2.



Continuación del apéndice 2.



Continuación del apéndice 2.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Datos de ensayos a compresión (IRC)

Descripción de puzolana	Peso	Aristas		Área	Carga	Esfuerzo	Xm	σ	Cv	% f'c	OBS
	(gr)	a (cm)	b (cm)	(cm ²)	(kg)	(Mpa)	(u)	(u)	(u)		
I-7a	260,40	5,00	5,00	25,00	1 615	6,46					
I-7b	269,70	5,10	5,10	26,01	1 580	6,07					
I-7c	264,80	5,10	5,10	26,01	1 510	5,81	6,11	0,33	5%	32,93	
I-28 a	263,50	5,08	5,01	25,45	1 535	6,03					
I-28 b	267,50	5,11	5,12	26,16	1 595	6,10					
I-28 c	270,50	5,14	5,14	26,42	1 505	5,70	5,94	0,21	4%	30,99	
II-7a	247,40	5,10	5,10	26,01	1 645	6,32					
II-7b	247,90	5,10	5,10	26,01	1 540	5,92					
II-7 c	245,70	4,90	4,95	24,26	1 640	6,76	6,34	0,42	7%	35,29	
II-28 a	250,40	5,00	4,99	24,95	1 460	5,85					
II-28 b	251,50	5,03	5,00	25,15	1 530	6,08					
II-28 c	252,10	5,06	5,03	25,45	1 545	6,07	6,00	0,13	2%	31,69	
III-7a	262,70	5,00	5,00	25,00	1 650	6,60					
III-7b	264,80	5,20	5,20	27,04	1 640	6,07					
III-7 c	268,40	5,20	5,50	28,60	1 775	6,21	6,29	0,28	4%	34,82	
III-28 a	261,40	5,21	5,11	26,62	1 410	5,30					
III-28 b	266,50	5,15	5,23	26,93	1 380	5,12					
III-28 c	261,30	5,18	5,11	26,47	1 575	5,95	5,46	0,44	8%	24,86	
IV-7a	258,00	5,08	5,12	26,01	1 350	5,19					
IV-7b	258,30	5,11	5,15	26,32	1 510	5,74					
IV-7 c	259,00	5,11	5,11	26,11	1 490	5,71	5,46	0,39	7%	24,97	
IV-28 a	267,60	5,06	5,12	25,91	1 455	5,62					31 días
IV-28 b	266,00	5,08	5,13	26,06	1 395	5,35					31 días
IV-28 c	266,00	5,04	5,14	25,91	1 410	5,44	5,47	0,13	2%	25,05	31 días
V-7a	259,30	5,09	5,16	26,26	1 490	5,67					
V-7b	259,80	5,07	5,15	26,11	1 440	5,52					
V-7 c	260,50	5,08	5,14	26,11	1 475	5,65	5,61	0,09	2%	26,95	
V-28 a	270,40	5,11	5,12	26,16	1 550	5,92					31 días
V-28 b	269,00	5,12	5,11	26,16	1 550	5,92					31 días
V-28 c	271,00	5,12	5,14	26,32	1 520	5,78	5,82	0,09	1%	29,55	31 días
VI-7a	258,20	5,11	5,13	26,21	1 810	6,90					
VI-7b	260,60	5,10	5,10	26,01	1 760	6,77					
VI-7 c	257,60	5,09	5,15	26,21	1 720	6,56	6,74	0,17	3%	39,21	
VI-28 a	264,00	5,05	5,09	25,70	1 700	6,61					31 días
VI-28 b	263,00	5,10	5,13	26,16	1 720	6,57					31 días
VI-28 c	264,00	5,06	5,06	25,60	1 640	6,41	6,58	0,11	2%	37,69	31 días
VII-7a	260,10	5,07	5,02	25,45	1 850	7,27					Debe repetirse, Cv muy alto
VII-7b	260,20	5,11	5,06	25,86	1 765	6,83					
VII-7 c	256,80	5,08	5,06	25,70	1 455	5,66	7,05	0,83	12%	41,82	
VII-28 a	264,50	5,03	5,08	25,55	1 840	7,20					

Continuación del apéndice 3.

VII-28 b	265,00	5,11	5,10	26,06	1 695	6,50						
VII-28 c	264,80	5,10	5,10	26,01	1 735	6,67	6,59	0,12	2%	37,76		
VIII-7a	255,00	5,11	5,04	25,75	1 525	5,92						
VIII-7b	256,20	5,00	5,10	25,50	1 545	6,06						
VIII-7 c	256,00	5,00	5,10	25,50	1 525	5,98	5,99	0,07	1%	31,52		
VIII-28 a	267,00	5,07	5,06	25,65	1 565	6,10						
VIII-28 b	267,00	5,08	5,10	25,91	1 520	5,87						
VIII-28 c	264,50	5,07	5,09	25,81	1 490	5,77	5,91	0,17	3%	30,67		
IX-7a	254,30	5,07	5,13	26,01	1 610	6,19						
IX-7b	255,30	5,02	5,06	25,40	1 555	6,12						
IX-7c	254,00	5,08	5,12	26,01	1 705	6,56	6,29	0,23	4%	34,81		
IX-28 a	261,00	5,03	5,05	25,40	2 290	9,02						Debe repetirse Cv muy alto
IX-28 b	263,50	5,05	5,07	25,60	2 215	8,65						
IX-28 c	265,00	5,09	5,08	25,86	1 775	6,86	8,83	1,15	13%	53,58		
X-7a	257,80	5,12	5,14	26,32	1 460	5,55						
X-7b	258,80	5,10	5,15	26,27	1 620	6,17						
X-7c	258,00	5,09	5,13	26,11	1 610	6,17	5,86	0,44	7%	30,01		
X-28 a	265,00	5,13	5,10	26,16	1 445	5,52						
X-28 b	266,00	5,14	5,11	26,27	1 530	5,83						
X-28 c	266,00	5,04	5,07	25,55	1 515	5,93	5,76	0,21	4%	28,81		
XI-7a	255,50	5,11	5,08	25,96	1 580	6,09						
XI-7b	255,50	5,11	5,08	25,96	1 630	6,28						
XI-7c	253,80	5,11	5,08	25,96	1 580	6,09	6,15	0,11	2%	33,34		
XI-28 a	265,10	5,13	5,10	26,16	1 645	6,29						
XI-28 b	264,10	5,13	5,01	25,70	1 450	5,64						
XI-28 c	265,00	5,07	5,13	26,01	1 545	5,94	5,96	0,32	5%	31,17		
XII-7a	249,70	5,11	5,10	26,06	1 480	5,68						
XII-7b	251,00	5,13	5,11	26,21	1 530	5,84						
XII-7 c	248,00	5,08	5,11	25,96	1 490	5,74	5,75	0,08	1%	28,72		
XII-28 a	265,70	5,09	5,08	25,86	1 360	5,26						
XII-28 b	266,80	5,08	5,12	26,01	1 445	5,56						
XII-28 c	265,70	5,07	5,08	25,76	1 380	5,36	5,39	0,15	3%	23,95		
XIII-7a	253,60	5,12	5,10	26,11	1 950	7,47						
XIII-7b	253,60	5,12	5,10	26,11	1 850	7,08						
XIII-7 c	250,20	5,06	5,11	25,86	1 900	7,35	7,30	0,20	3%	43,84		
XIII-28 a	250,00	5,11	5,07	25,91	1 950	7,53						
XIII-28 b	249,20	4,98	5,13	25,55	1 820	7,12						
XIII-28 c	248,70	5,11	5,05	25,81	1 845	7,15	7,27	0,23	3%	43,58		
XIV-7a	245,70	5,08	4,98	25,30	1 760	6,96						
XIV-7b	250,30	5,09	5,04	25,65	1 880	7,33						

Continuación del apéndice 3.

XIV-7 c	244,30	5,09	5,08	25,86	1 880	7,27	7,19	0,20	3%	42,94	
XIV-28 a	244,50	5,06	5,05	25,55	1 740	6,81					
XIV-28 b	235,50	5,04	5,03	25,35	1 625	6,41					
XIV-28 c	234,50	4,98	5,02	25,00	1 740	6,96	6,73	0,28	4%	39,05	
XV-7a	258,20	5,07	5,11	25,91	1 460	5,64					
XV-7b	254,00	5,08	5,11	25,96	1 380	5,32					
XV-7 c	250,00	5,08	5,09	25,86	1 360	5,26	5,40	0,20	4%	24,13	
XV-28 a	236,80	5,04	5,04	25,40	1,225	4,82					
XV-28 b	234,20	5,14	5,03	25,85	1,220	4,72					
XV-28 c	231,00	4,93	5,04	24,85	1,235	4,97	4,84	0,13	3%	15,24	
XVI-7a	261,80	5,12	5,04	25,80	1,740	6,74					
XVI-7b	261,30	5,04	5,13	25,86	1,710	6,61					
XVI-7 c	262,00	5,05	5,16	26,06	1,705	6,54	6,63	0,10	2%	38,19	
XVI-28 a	264,00	5,07	5,03	25,50	1,665	6,53					
XVI-28 b	263,80	5,07	5,05	25,60	1,605	6,27					
XVI-28 c	263,50	5,07	5,03	25,50	1,620	6,35	6,38	0,13	2%	35,77	
XVII-7a	256,00	5,10	5,14	26,21	1,720	6,56					
XVII-7b	255,60	5,10	5,12	26,11	1,765	6,76					
XVII-7 c	259,00	5,10	5,13	26,16	1,875	7,17	6,83	0,31	5%	39,96	
XVII-28 a	262,00	5,09	5,05	25,70	1,790	6,96					
XVII-28 b	260,70	5,09	5,11	26,01	1,720	6,61					
XVII-28 c	261,00	5,09	5,07	25,81	1,735	6,72	6,77	0,18	3%	39,41	
XVIII-7a	251,40	5,05	5,06	25,55	1,475	5,77					
XVIII-7b	254,60	5,06	5,10	25,81	1,475	5,72					
XVIII-7 c	254,40	5,10	5,10	26,01	1,375	5,29	5,59	0,27	5%	26,67	
XVIII-28 a	261,00	5,04	5,03	25,35	1,585	6,25					Debe repetirse Cv muy alto
XVIII-28 b	261,00	5,02	5,04	25,30	1,320	5,22					
XVIII-28 c	261,70	5,05	5,07	25,60	1,430	5,59	5,68	0,52	9%	27,88	

Fuente: elaboración propia.

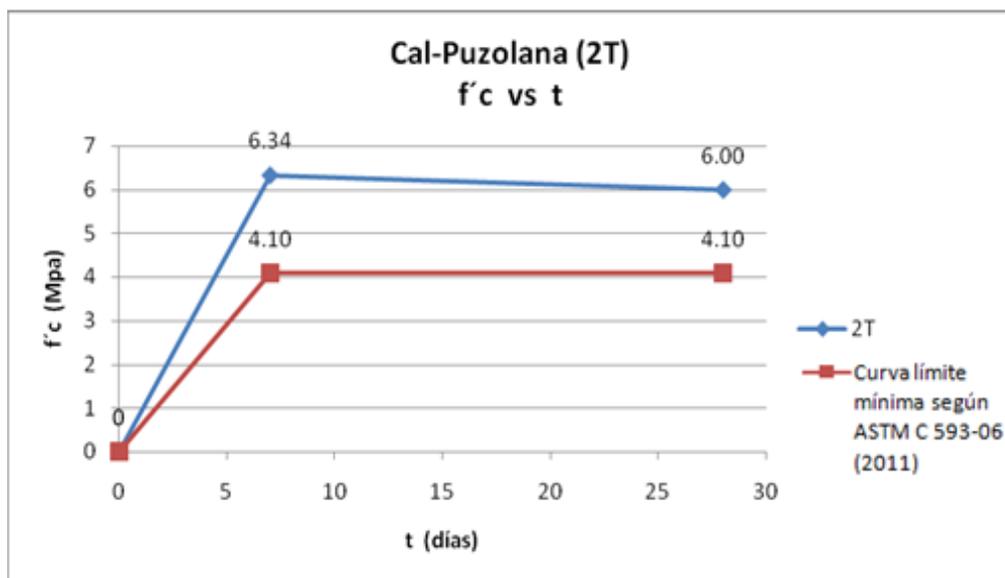
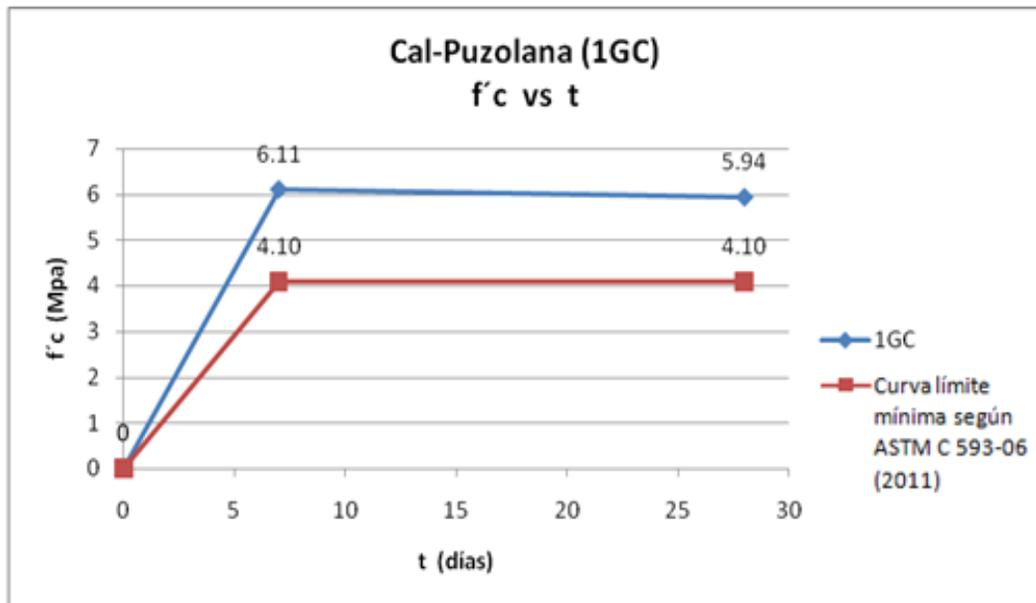
Continuación del apéndice 3.

TABLA RESUMEN

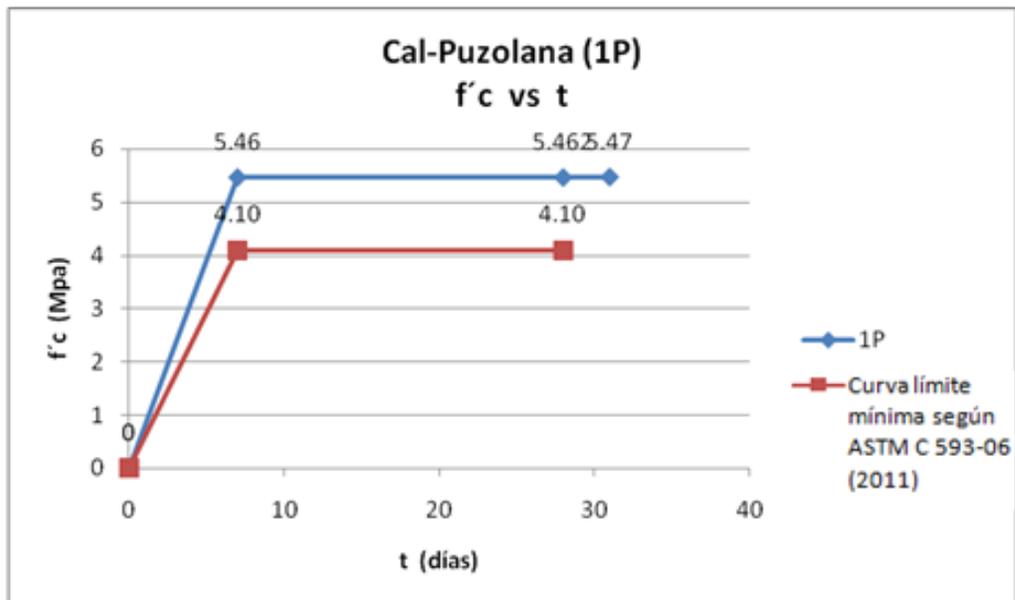
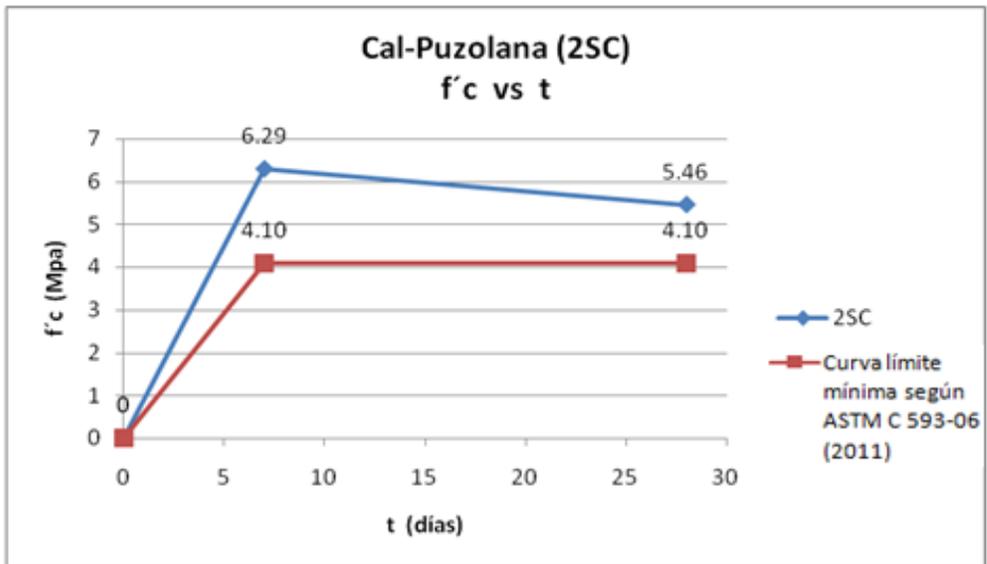
Nom	Material	f'c 7 días (Mpa)	f'c 28 días (Mpa)	% Aumento f'c 7 días	% Aumento f'c 28 días	Variación (Mpa)	σ (f'c 7 días)	σ (f'c 28 días)	Cv (f'c 7 días)	Cv (f'c 28 días)	Obs
I	1GC	6,11	5,94	32,93	30,99	-0,17	0,33	0,21	5%	4%	
II	2T	6,34	6,00	35,29	31,69	-0,33	0,42	0,13	7%	2%	
III	2SC	6,29	5,46	34,82	24,86	-0,83	0,28	0,44	4%	8%	
IV	1P	5,46	5,47	24,97	25,05	0,01	0,39	0,13	7%	2%	Ensayo 31 días / 5,47
V	LC	5,61	5,82	26,95	29,55	0,21	0,09	0,09	2%	1%	Ensayo 31 días / 5,87
VI	ARIS	6,74	6,58	39,21	37,69	-0,16	0,17	0,11	3%	2%	Ensayo 31 días / 6,53
VII	SFA	6,59	6,59	37,74	37,76	0,00	0,83	0,12	12%	2%	
VIII	1S	5,99	5,91	31,52	30,67	-0,07	0,07	0,17	1%	3%	
IX	SX1	6,29	8,18	34,81	49,86	1,89	0,23	1,15	4%	13%	
X	1M	5,86	5,76	30,01	28,81	-0,10	0,44	0,21	7%	4%	
XI	SX2	6,15	5,96	33,34	31,17	-0,19	0,11	0,32	2%	5%	
XII	1N	5,75	5,39	28,72	23,95	-0,36	0,08	0,15	1%	3%	
XIII	1NPS	7,30	7,27	43,84	43,58	-0,03	0,20	0,23	3%	3%	
XIV	1SC	7,19	6,73	42,94	39,05	-0,46	0,20	0,28	3%	4%	
XV	BAR FINO 2	5,40	4,84	24,13	15,24	-0,57	0,20	0,13	4%	3%	
XVI	1R	6,63	6,38	38,19	35,77	-0,25	0,10	0,13	2%	2%	
XVII	2T'	6,83	6,77	39,96	39,41	-0,06	0,31	0,18	5%	3%	
XVIII	1C	5,59	5,68	26,67	27,88	0,09	0,27	0,52	5%	9%	

Continuación del apéndice 3.

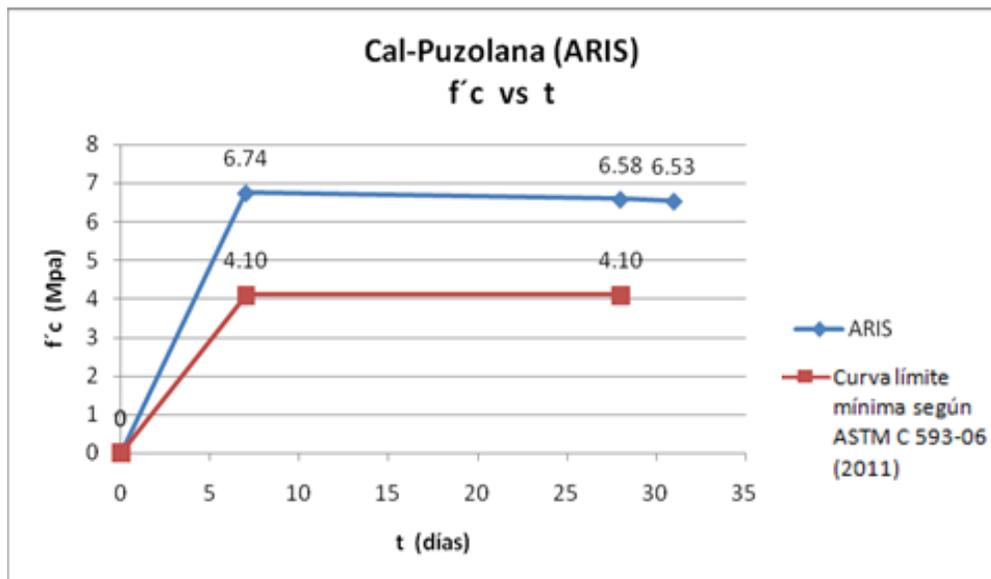
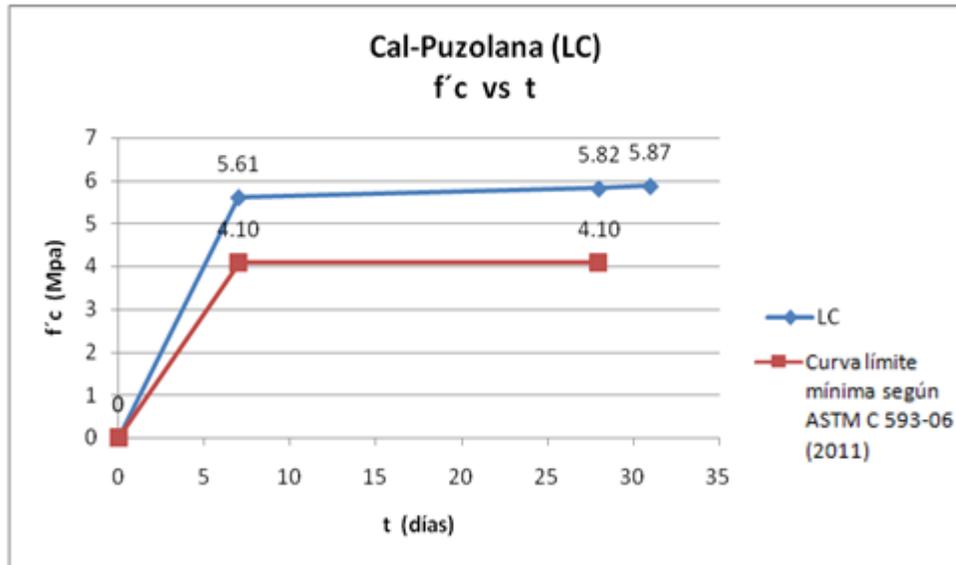
Gráficas individuales IRC



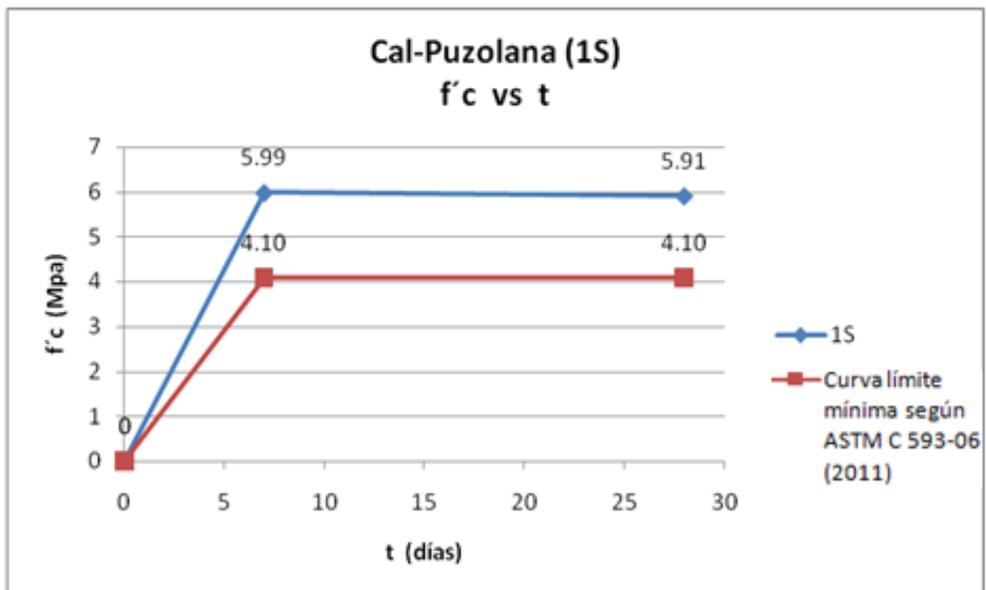
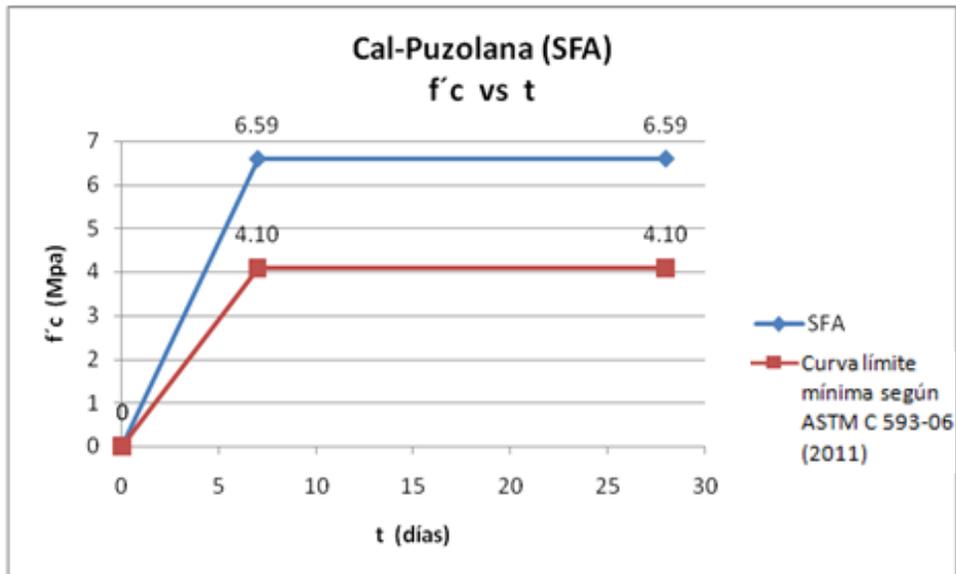
Continuación del apéndice 3.



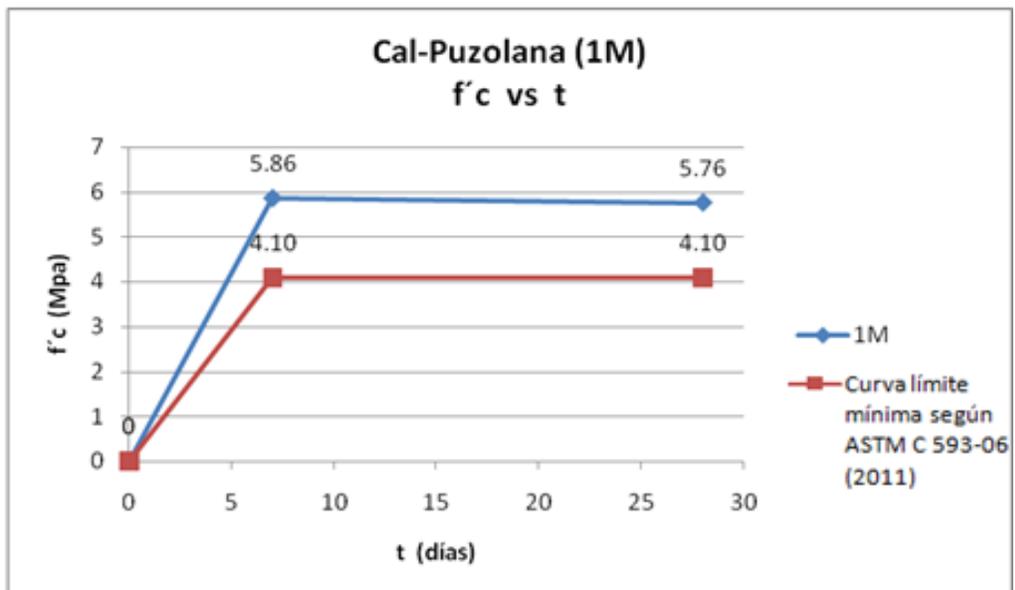
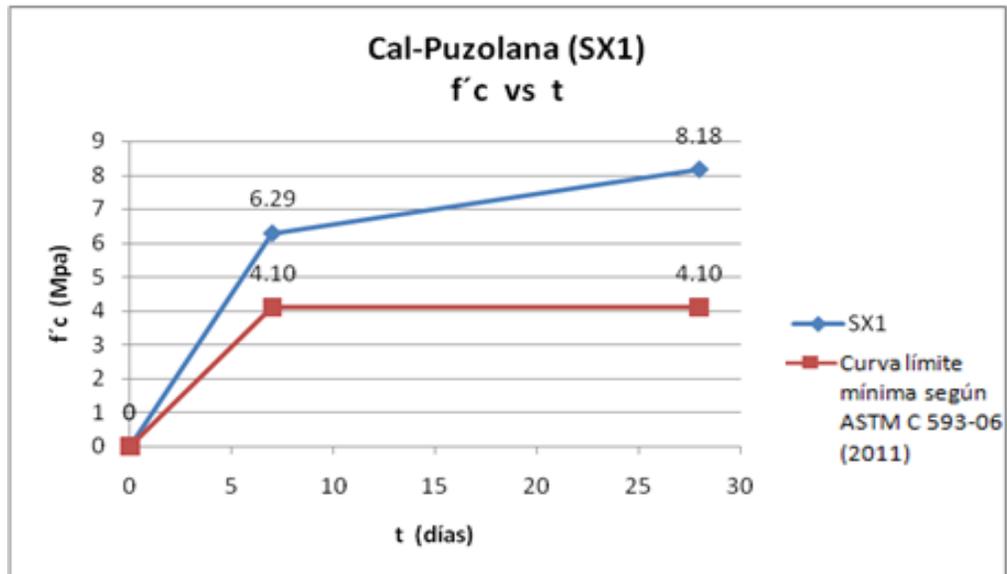
Continuación del apéndice 3.



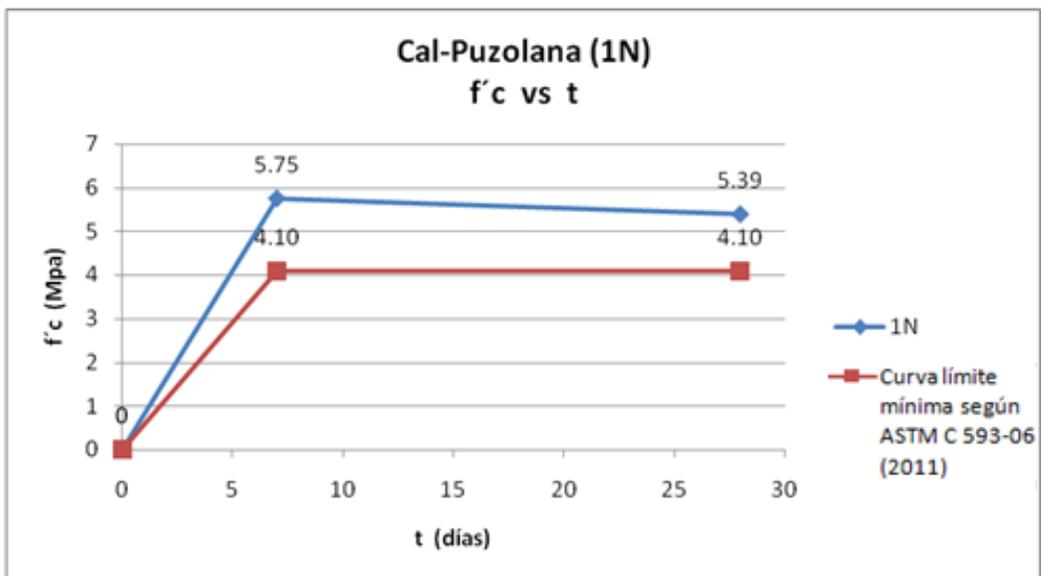
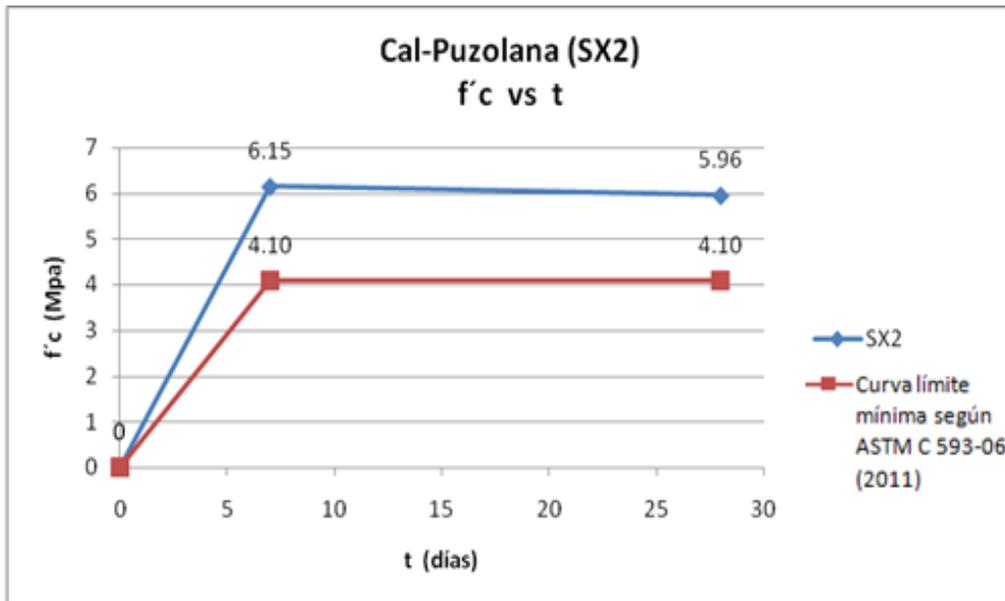
Continuación del apéndice 3.



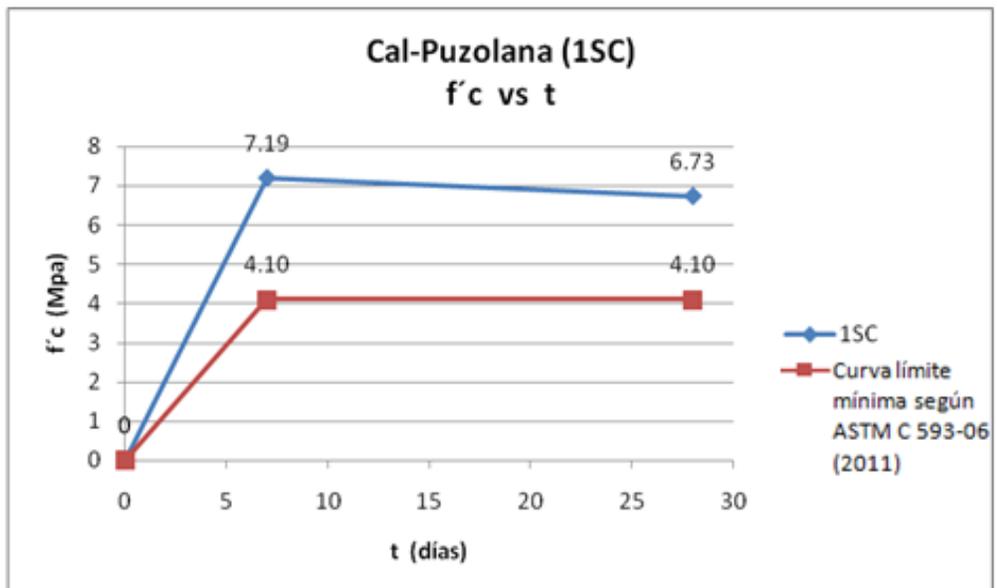
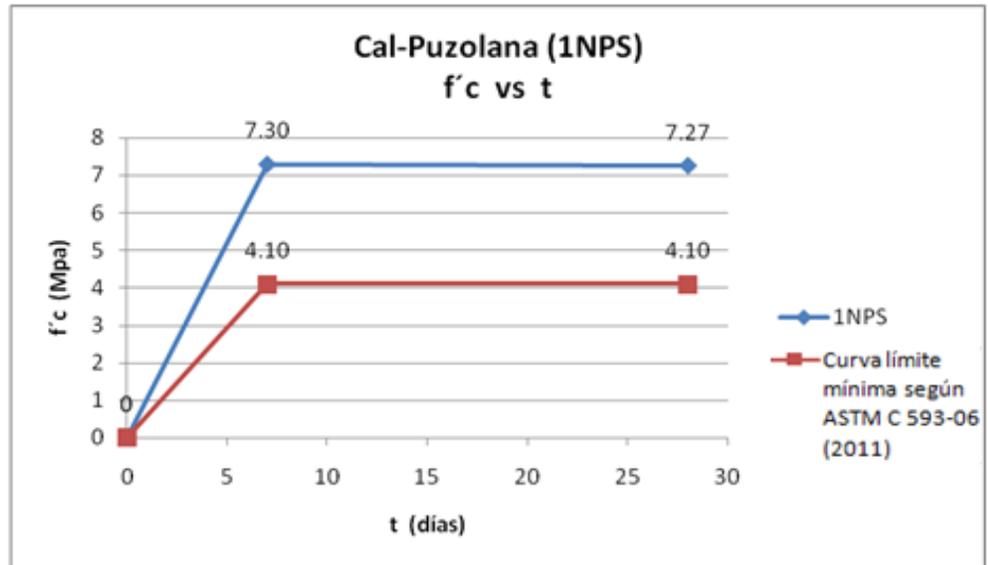
Continuación del apéndice 3.



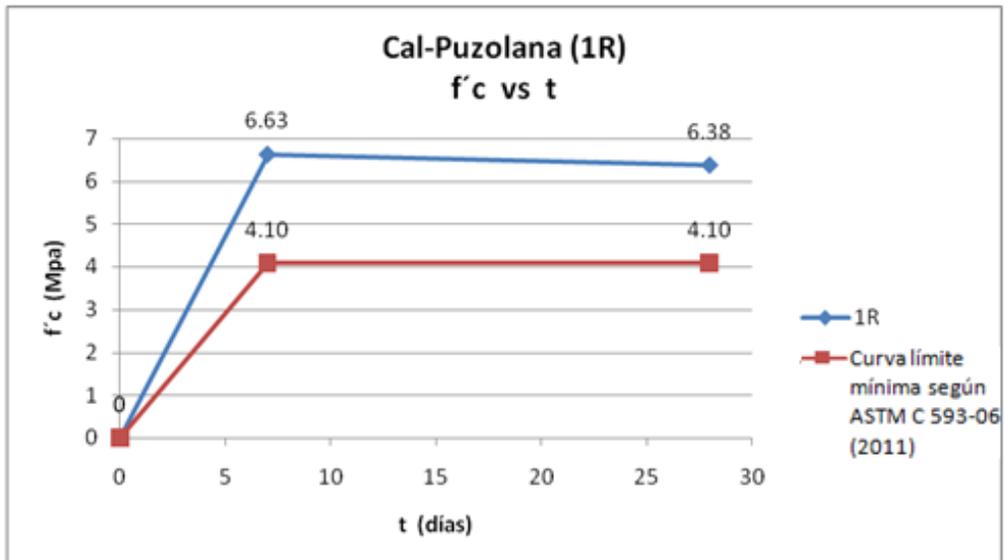
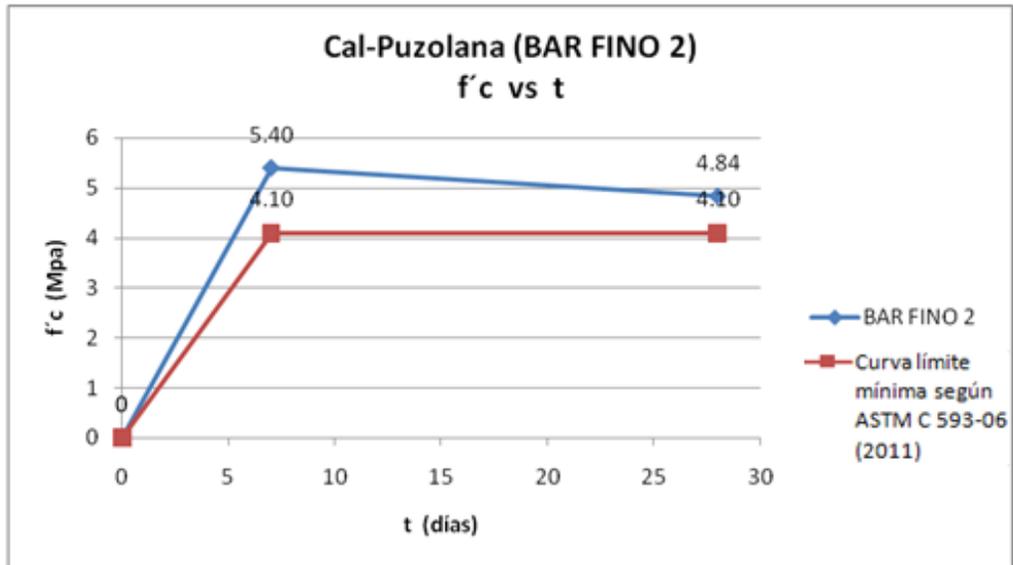
Continuación del apéndice 3.



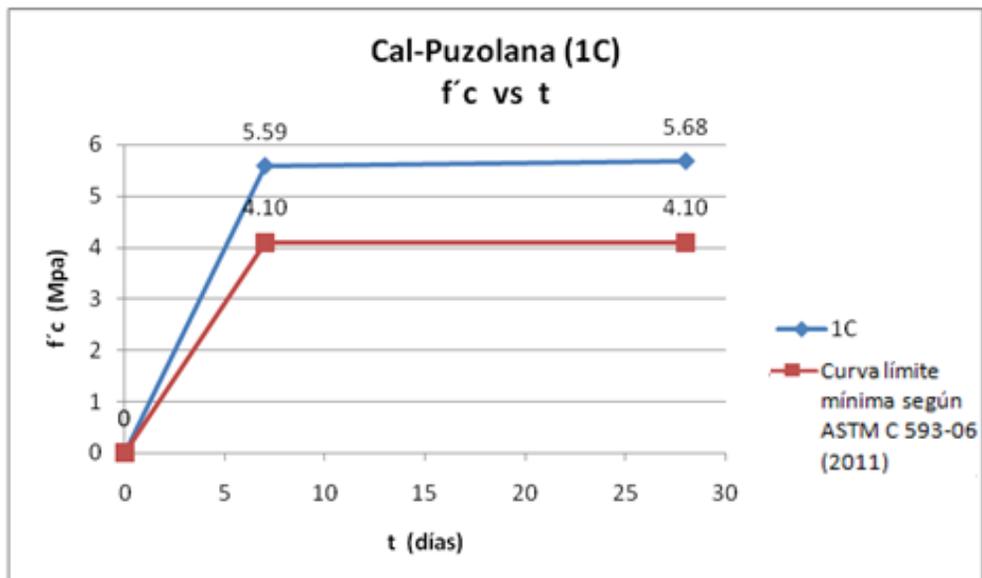
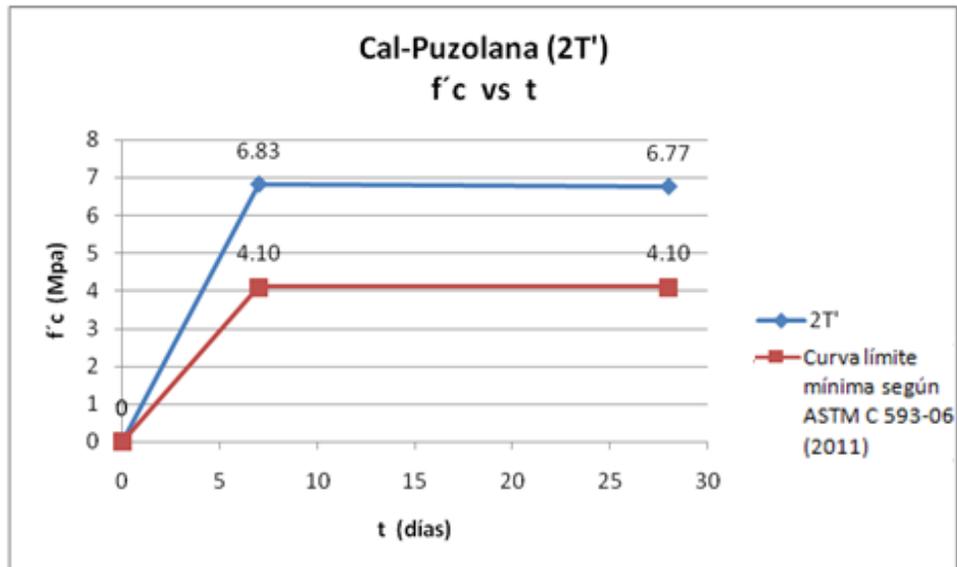
Continuación del apéndice 3.



Continuación del apéndice 3.



Continuación del apéndice 3.



Fuente: elaboración propia.

