



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

EVALUACIÓN Y ESTUDIO DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO, MECÁNICAS Y QUÍMICAS DERIVADAS DE LA INTERACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO CON EL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO NORMA ASTM C-1157, UTILIZANDO COMO AGREGADO LA ARENA PROCEDENTE DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN DE PACAYA EN FECHA 27 DE MAYO DE 2010

Eduardo Enrique Machuca Gil

Asesorado por la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Co-asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra

Guatemala, agosto de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN Y ESTUDIO DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO, MECÁNICAS Y QUÍMICAS DERIVADAS DE LA INTERACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO CON EL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO NORMA ASTM C-1157, UTILIZANDO COMO AGREGADO LA ARENA PROCEDENTE DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN DE PACAYA EN FECHA 27 DE MAYO DE 2010

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDUARDO ENRIQUE MACHUCA GIL

ASESORADO POR LA INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL
CO-ASESORADO POR EL ING. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Enrique Omar Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Linares Cruz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN Y ESTUDIO DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO, MECÁNICAS Y QUÍMICAS DERIVADAS DE LA INTERACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO CON EL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO NORMA ASTM C-1157, UTILIZANDO COMO AGREGADO LA ARENA PROCEDENTE DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN DE PACAYA EN FECHA 27 DE MAYO DE 2010

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha noviembre de 2010.


Eduardo Enrique Machuca Gil



Guatemala, 6 de mayo de 2013

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


Ingeniero Melini

Me dirijo a usted para informarle, que he revisado el trabajo de graduación **EVALUACIÓN Y ESTUDIO DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO, MECÁNICAS Y QUÍMICAS DERIVADAS DE LA INTERACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO CON EL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO NORMA ASTM C-1157, UTILIZANDO COMO AGREGADO LA ARENA PROCEDENTE DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCAN DE PACAYA EN FECHA 27 DE MAYO DE 2010**, elaborado con el estudiante universitario Eduardo Enrique Machuca Gil, quien contó con la asesoría de los suscritos.

Considerando que el trabajo desarrollado por el estudiante universitario Machuca Gil, satisface los requisitos exigidos en el reglamento de graduación, por lo cual recomendamos su aprobación.

Atentamente,

"Id y enseñad a todos"


Inga. Civil Dilma Yanet Mejicanos Jol
Col. 5947
ASESORA

Dilma Y. Mejicanos Jol
Ingeniera Civil
Col. 5947


Ing. Químico César Alfonso García Guerra
Col. 145
Co-asesor





USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

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

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



Guatemala,
 22 de julio de 2013

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

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **EVALUACIÓN Y ESTUDIO DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO, MECÁNICAS Y QUÍMICAS DERIVADAS DE LA INTERACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO CON EL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO NORMA ASTM C-1157, UTILIZANDO COMO AGREGADO LA ARENA PROCEDENTE DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN DE PACAYA EN FECHA 27 DE MAYO DE 2010**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Eduardo Enrique Machuca Gil, quien contó con la asesoría de la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol e Ing. César Alfonso García Guerra.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Guillermo Melini

Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salgado
 Coordinador del Área de Materiales y
 Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
 AREA DE MATERIALES Y
 CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua
 /bbdeb.





El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol, del Co-asesor Ing. César Alfonso García Guerra y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Eduardo Enrique Machuca Gil, titulado **EVALUACIÓN Y ESTUDIO DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO, MECÁNICAS Y QUÍMICAS DERIVADAS DE LA INTERACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO CON EL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO NORMA ASTM C-1157, UTILIZANDO COMO AGREGADO LA ARENA PROCEDENTE DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN DE PACAYA EN FECHA 27 DE MAYO DE 2010**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, agosto de 2013.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 592.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN Y ESTUDIO DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO, MECÁNICAS Y QUÍMICAS DERIVADAS DE LA INTERACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO CON EL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO NORMA ASTM C-1157, UTILIZANDO COMO AGREGADO LA ARENA PROCEDENTE DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN DE PACAYA EN FECHA 27 DE MAYO DE 2010**, presentado por el estudiante universitario **Eduardo Enrique Machuca Gil**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 27 de agosto de 2013

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios y María Santísima	Por ser quienes me ha dado todo en la vida, por cuidarme cada día, por infundir en mi vida sabiduría y fortaleza para encaminar mis pasos inmerso en la confianza de su infinita bondad y misericordia.
Mis padres	Eduardo Enrique Machuca Quiroa y Gladys Elizabeth Gil de Machuca, por todo su apoyo, amor y cariño, que sea para ellos una pequeña recompensa a todos sus esfuerzos, por formarme como una persona útil para esta sociedad y sobre todo enseñarme siempre el camino más grande que es el de Dios.
Mi hermana	Dulce María Machuca Gil, gracias por ser mi compañera y amiga de toda la vida y asimismo por estar conmigo en este triunfo de mi vida.
Mis tíos	Miguel Ángel Salazar Herrarte y María Noelia Hernández Quiroa, gracias por su cariño y amor, los quiero mucho.
La familia Andrade Rivas	Geovanny Andrade Salazar (q.e.p.d.), Mónica Rivas Gil, Edgar Rivas y Dessiree Andrade, por haberme permitido compartir con ustedes parte de mi vida como estudiante y demostrarme su confianza y su cariño.

Mis primos

Gracias por su amistad, cariño y que este triunfo en mi vida sea un ejemplo a seguir.

A mis amigos

A todos aquellos que han estado conmigo, gracias por su amistad y cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

**Inga. Dilma Yanet
Mejicanos Jol**

Quien es un gran ejemplo de mujer profesional, trabajadora y sobre todo amiga, dentro de nuestra Facultad de Ingeniería. Gracias por su valioso tiempo que me ha dedicado para poder llegar a culminar este trabajo.

**Ing. César Alfonso
García Guerra**

Por ser un profesional entregado a la docencia e investigación dentro de nuestra Facultad de Ingeniería. Gracias por su valioso tiempo en la realización de mi trabajo de graduación.

**La Sección de
Agregados,
Concretos y Morteros**

En especial a Iván Cano, Marlon Chajón, Elder Ramos, Cesar Vásquez y Paulino Alvarado por su colaboración y ayuda en la realización de este trabajo.

**Centro de
Investigaciones de
Ingeniería**

Por haberme permitido realizar mis prácticas, mi trabajo de graduación y sobre todo por permitirme trabajar dentro de sus instalaciones.

**Centro Tecnológico
de Cementos
Progreso, S.A.**

Por su apoyo en la realización de ensayos químicos para la realización de este trabajo, en especial al Lic. Álvaro Ramírez Telón e Ing. Mario de León.

**La Facultad de
Ingeniería**

Por haberme formado como todo un profesional.

**La Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Por ser mi casa de estudios durante todos estos años.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
GLOSARIO	XIX
RESUMEN	XXIX
OBJETIVOS	XXXI
INTRODUCCIÓN	XXXIII
1. PRINCIPIOS GENERALES LOS VOLCANES	1
1.1. Definición	1
1.2. Estructura interna de la tierra	2
1.3. Vulcanismo y ambientes tectónicos	4
1.4. Clasificación de los volcanes.	5
1.5. Clasificación de la actividad volcánica.	7
1.6. Productos de la actividad volcánica.	11
2. ANTECEDENTES DEL VOLCÁN DE PACAYA	15
2.1. Historia	15
2.2. Ubicación	17
2.3. Forma y estructura volcánica	19
2.4. Características de la actividad volcánica	20
2.5. Actividad histórica del volcán de Pacaya	21
2.6. Erupciones del volcán de Pacaya del 27 y 28 de mayo de 2010	27

3.	GENERALIDADES DEL CEMENTO.....	31
3.1.	Reseña histórica del cemento	31
3.2.	Cemento.....	32
3.2.1.	Elaboración del cemento	33
3.2.1.1.	Compuestos químicos e hidratación del cemento	36
3.2.1.1.1.	Silicato tricálcico (C ₃ S)	39
3.2.1.1.2.	Silicatos dicálcico (C ₂ S)	40
3.2.1.1.3.	Aluminato tricálcico (C ₃ A)	40
3.2.1.1.4.	Ferroaluminato tetracálcico (C ₃ S).....	40
3.2.1.1.5.	Sulfato de calcio.....	40
3.2.2.	Definición natural	42
3.2.3.	Definición química	42
3.2.4.	Definición de ingeniería	42
3.3.	Tipos de cementos según normas ASTM	42
3.3.1.	Cemento hidráulico	43
3.3.1.1.	Tipos de cementos hidráulicos	43
3.3.1.1.1.	Tipo GU, para uso general en la construcción.....	43
3.3.1.1.2.	Tipo HE, alta resistencia temprana....	43
3.3.1.1.3.	Tipo MS, moderada resistencia a los sulfatos	44

	3.3.1.1.4.	Tipo HS, alta resistencia a los sulfatos	44
	3.3.1.1.5.	Tipo MH, moderado calor de hidratación	44
	3.3.1.1.6.	Tipo LH, bajo calor de hidratación.....	45
	3.3.1.1.7.	Tipo opción R, baja reactividad con agregados álcali-reactivos.....	45
3.3.2.	Cemento Portland		45
	3.3.2.1.	Tipos de cementos Portland..... 46	
		3.3.2.1.1.	Tipo I
		3.3.2.1.2.	Tipo IA.....
		3.3.2.1.3.	Tipo II
		3.3.2.1.4.	Tipo IIA
		3.3.2.1.5.	Tipo III
		3.3.2.1.6.	Tipo IIIA.....
		3.3.2.1.7.	Tipo IV.....
		3.3.2.1.8.	Tipo V.....
3.3.3.	Cemento hidráulico adicionado		48
	3.3.3.1.	Tipos de cementos hidráulicos adicionados.....	
		3.3.3.1.1.	Tipo IS, cemento Portland alto horno
		3.3.3.1.2.	Tipo IP y tipo P, cemento Portland puzolánico

3.3.3.1.3.	Tipo I (PM), cemento Portland modificado con puzolana.....	50
3.3.3.1.4.	Tipo S, cemento de escoria de alto horno.....	50
3.3.3.1.5.	Tipo I (SM), cemento Portland modificado con escoria	51
3.3.4.	Cementos de albañilería y morteros	51
3.3.5.	Cementos plásticos	52
3.3.6.	Cementos finamente molidos.....	52
3.3.7.	Cementos expansivos.....	52
3.3.8.	Cementos para pozos petroleros (petrolíferos)	53
3.3.9.	Cementos con adiciones funcionales.....	53
3.3.10.	Cementos repelentes de agua	54
3.3.11.	Cementos de fraguado regulado.....	54
3.3.12.	Cementos de geopolímeros	55
3.3.13.	Cementos de etringita.....	55
3.3.14.	Cementos de endurecimiento rápido	55
3.3.15.	Cementos de aluminato de calcio	56
3.3.16.	Cementos de fosfato de magnesio	56
3.3.17.	Cementos blancos o coloreados	56
4.	GENERALIDADES DE LOS AGREGADOS.....	59
4.1.	Formación de las rocas	59
4.2.	Clasificación de las rocas	59
4.2.1.	Rocas ígneas o magmáticas.....	59
4.2.1.1.	Rocas extrusivas	60
4.2.1.2.	Rocas intrusivas	60

4.2.2.	Rocas sedimentarias.....	61
4.2.3.	Rocas metamórficas.....	62
4.3.	Definición de agregado	64
4.4.	Propiedades de los agregados.....	64
4.5.	Clasificación de los agregados.....	64
4.5.1.	Según su origen	64
4.5.1.1.	Agregados naturales	65
4.5.1.2.	Agregados artificiales.....	65
4.5.2.	Según su tamaño	65
4.5.2.1.	Agregados finos	65
4.5.2.2.	Agregados gruesos	65
4.5.3.	Según densidad	67
4.5.3.1.	Agregados ligeros	67
4.5.3.2.	Agregados normales	67
4.5.3.3.	Agregados pesados	67
4.5.4.	Por su forma.....	67
4.5.4.1.	Agregados de canto rodado	67
4.5.4.2.	Agregados triturados.....	68
4.5.4.3.	Agregados mixtos	68
4.6.	Normas aplicables para la caracterización de los agregados.....	68
4.7.	Materiales potencialmente perjudiciales.....	70
5.	REACCIONES QUÍMICAS DE LOS AGREGADOS	73
5.1.	Reactividad álcali-agregado	73
5.2.	Reacción álcali-sílice	74
5.2.1.	Como se da la reacción álcali-sílice	75
5.2.2.	La acción del sílice	76
5.2.3.	La acción del álcali.....	79

	5.2.3.1.	Grupo A	79
	5.2.3.2.	Grupo B	80
	5.2.4.	La acción del calcio	81
	5.2.5.	La clasificación de la RAS	81
	5.2.5.1.	RAS rápida	82
	5.2.5.2.	RAS lenta	82
	5.2.6.	Condiciones que intervienen en la RAS	82
	5.2.7.	Proceso de la RAS en función del tiempo	83
	5.2.8.	Como se manifiesta la RAS	83
	5.2.9.	Identificación de los agregados potencialmente reactivos	88
	5.2.10.	Materiales y métodos para control de la RAS	89
5.3.		Métodos ASTM para determinar la reactividad álcali-sílice	90
	5.3.1.	Examen petrográfico de los agregados	91
	5.3.2.	Método químico para determinar la reactividad potencial álcali-sílice de los agregados	95
	5.3.3.	Método de la barra de mortero para determinación de reactividad potencial álcali-sílice	99
6.		DESARROLLO EXPERIMENTAL	101
	6.1.	Materiales	101
	6.1.1.	Arena volcánica	101
	6.1.1.1.	Recolección de las muestras	103
	6.1.1.2.	Preparación de las muestras	103
	6.1.1.3.	Tamizaje de la arena volcánica	104
	6.1.1.4.	Ensayo del examen petrográfico	105
	6.1.1.5.	Ensayos físicos y químicos	106
	6.1.2.	Arena estándar Norma ASTM C-778	107
	6.1.2.1.	Ensayos físicos y químicos	107

6.1.3.	Cemento Portland puzolánico Norma ASTM C-1157	108
6.1.3.1.	Ensayos mecánicos y químicos	110
6.2.	Ensayos mecánicos	112
6.2.1.	Determinación de la resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico (usando cubos de 2 pulgadas de lado).....	113
6.2.1.1.	Proporciones	113
6.2.1.2.	Temperaturas y humedades del laboratorio y cámara de curado.....	114
6.2.1.3.	Realización de mezclas en el laboratorio	115
6.2.1.4.	Curado de cubos y briquetas de mortero	117
6.2.1.5.	Edades de ensayo	117
6.2.1.6.	Ensayo a la compresión de cubos y briquetas de mortero	117
6.2.2.	Determinación de la reactividad alcalina potencial de las combinaciones cemento y agregados (método de la barra de mortero)	119
6.2.2.1.	Proporciones	119
6.2.2.2.	Temperaturas y humedades del laboratorio y cámara de curado.....	120
6.2.2.3.	Realización de mezclas en el laboratorio	121
6.2.2.4.	Curado de barras de mortero	124
6.2.2.5.	Edades de ensayo	125
6.2.2.6.	Ensayo de medición de la expansión o contracción de barras de mortero....	125

7.	TABULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	127
7.1.	Ensayos físicos y químicos de la arena volcánica	127
7.2.	Ensayos físicos y químicos de la arena estándar Norma ASTM C-778	136
7.3.	Ensayos químicos al cemento Portland puzolánico Norma ASTM C-1157	138
7.4.	Ensayos mecánicos al cemento Portland puzolánico Norma ASTM C-1157	139
7.4.1.	Determinación de la resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico (usando cubos de 2 pulgadas de lado) Norma ASTM C-109	139
7.4.2.	Determinación de la resistencia a tensión de morteros de cemento hidráulico Norma ASTM C-190	142
7.4.3.	Determinación de la reactividad alcalina potencial de las combinaciones cemento y agregados (método de la barra de mortero) Norma ASTM C-227	144
7.5.	Ensayos mecánicos al cemento Portland puzolánico Norma ASTM C-1157	146
	CONCLUSIONES	147
	RECOMENDACIONES	149
	BIBLIOGRAFÍA	151
	APÉNDICES	153
	ANEXOS	159

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura interna de la tierra	3
2.	Tipos de estructura de volcanes.....	6
3.	Erupción tipo hawaiano	7
4.	Erupción tipo estromboliano	8
5.	Erupción tipo vulcaniano	9
6.	Erupción tipo peleano.....	10
7.	Productos generados por una erupción volcánica	13
8.	Ubicación del volcán de Pacaya.....	18
9.	Complejo volcánico de Pacaya	20
10.	Vista de columna de vapor de agua emanada por el cono activo Mackenny del volcán de Pacaya	21
11.	Vista aérea de la erupción volcánica del 27 de mayo de 2010	27
12.	Colapso y daños en techos de viviendas aledañas al volcán de Pacaya	28
13.	Daños ocasionados en la pista y aeronaves del aeropuerto internacional La Aurora	29
14.	Mapa de dispersión de ceniza volcánica del volcán de Pacaya.....	30
15.	Cemento Portland	33
16.	Proceso de producción del cemento Portland	35
17.	Examen de secciones finas pulidas de clínker Portland	38
18.	Rocas ígneas	60
19.	Rocas sedimentarias.....	61
20.	Rocas metamórficas	62

21.	Agregado fino	66
22.	Agregado grueso	66
23.	Daño en estructura de concreto por reacción álcali-agregado	74
24.	Silicio tetraédrico (sílice, SiO ₂).....	76
25.	Estructura del cuarzo (estructura cristalina, SiO ₂).....	77
26.	Agrietamiento en el concreto debido a la reacción álcali-sílice	84
27.	Sección pulida de un agregado reactivo con álcalis en el concreto.....	85
28.	Influencia en la expansión de la barra de mortero de diferentes cantidades de ceniza volante, escoria y humo de sílice con relación a la masa de material cementante después de 14 días, al usarse agregado reactivo	90
29.	Examen petrográfico para identificación de diferentes tipos de cuarzo (promotor del RAS)	92
30.	Equipo de fluorescencia de rayos X.....	94
31.	Arena volcánica	101
32.	Tamizaje de arena volcánica	104
33.	Separación y pesaje de las arenas después del tamizaje	105
34.	Arena estándar	108
35.	Presentación del saco de cemento Portland puzolánico	109
36.	Elaboración de cubos de mortero en el laboratorio	116
37.	Ensayo de compresión de cubos de cemento y arena estándar	118
38.	Ensayo de tensión de briquetas de cemento y arena estándar	118
39.	Elaboración de barras de mortero en el laboratorio	122
40.	Curado de barras de mortero en horno de laboratorio	124
41.	Ensayo de expansión o contracción de barra de mortero	126
42.	Granulometría de la arena volcánica sin ningún proceso.....	128
43.	Gráfica de ensayo de reactividad potencial de la arena volcánica sin ningún proceso	129

44.	Granulometría de la arena volcánica sin lavar.....	131
45.	Gráfica de ensayo de reactividad potencial de la arena volcánica sin lavar.....	131
46.	Granulometría de la arena volcánica lavada manualmente	133
47.	Gráfica de ensayo de reactividad potencial de la arena volcánica lavada manualmente	133
48.	Granulometría de la arena volcánica lavada al intemperismo	135
49.	Gráfica de ensayo de reactividad potencial de la arena volcánica lavada al intemperismo	135
50.	Granulometría de la arena estándar Norma ASTM C-778.....	137
51.	Gráfica de ensayo de reactividad potencial de la arena estándar Norma ASTM C-778.....	138

TABLAS

I.	Actividades históricas del volcán de Pacaya	22
II.	Fuentes de las materias primas usadas en la fabricación del cemento Portland.....	36
III.	Composición química y de los componentes de los cementos Portland	41
IV.	Ejemplos de rocas según origen y naturaleza de su formación	63
V.	Ensayos realizados a los agregados	68
VI.	Ensayos para materiales perjudiciales en agregados.....	71
VII.	Cantidades de sílice en agregados susceptibles a la RAS	79
VIII.	Métodos de prueba para la reactividad álcali-sílice	86
IX.	Minerales reactivos potencialmente perjudiciales y materiales sintéticos	88
X.	Examen petrográfico	106
XI.	Requisitos físicos y mecánicos del cemento	110

XII.	Proporciones utilizadas para las diferentes mezclas.....	114
XIII.	Parámetros de temperaturas y humedades	115
XIV.	Proporciones utilizadas para las diferentes mezclas.....	120
XV.	Parámetros de temperaturas y humedades	121
XVI.	Ensayos físicos de la arena volcánica recolectada inmediatamente después de la erupción.....	127
XVII.	Ensayos químicos de la arena volcánica sin ningún proceso.....	128
XVIII.	Ensayos físicos de la arena volcánica sin lavar	130
XIX.	Ensayos químicos de la arena volcánica sin lavar	130
XX.	Ensayos físicos de la arena volcánica lavada manualmente.....	132
XXI.	Ensayos químicos de la arena volcánica lavada manualmente.....	132
XXII.	Ensayos físicos de la arena volcánica lavada al intemperismo	134
XXIII.	Ensayos químicos de la arena volcánica lavada al intemperismo	134
XXIV.	Ensayos físicos de la arena estándar Norma ASTM C-778	136
XXV.	Ensayos químicos de la arena estándar Norma ASTM C-778	137
XXVI.	Ensayos químicos realizados al cemento	139
XXVII.	Ensayo de la resistencia a la compresión de cubos de cemento y arena estándar.....	140
XXVIII.	Ensayo de la resistencia a la compresión de cubos de cemento y arena volcánica con proceso sin lavar	140

XXIX.	Ensayo de la resistencia a la compresión de cubos de cemento y arena volcánica con proceso y lavada manualmente	141
XXX.	Ensayo de la resistencia a la compresión de cubos de arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo	141
XXXI.	Ensayo de la resistencia a la tensión de briquetas de cemento y arena estándar	142
XXXII.	Ensayo de la resistencia a la tensión de cubos de cemento y arena volcánica con proceso sin lavar.....	142
XXXIII.	Ensayo de la resistencia a la tensión de cubos de cemento y arena volcánica con proceso y lavada manualmente	143
XXXIV.	Ensayo de la resistencia a la tensión de cubos de cemento y arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo.....	144
XXXV.	Ensayo de reactividad alcalina potencial de las combinaciones cemento y agregados, por medio de la barra de mortero	145
XXXVI.	Comparación de resultados obtenidos en laboratorio y Norma ASTM C-1157	146

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HCl	Ácido clorhídrico
HF	Ácido fluorhídrico
C₃A	Acrónimo de aluminato tricálcico
C₄AF	Acrónimo de ferroaluminato tetracálcico
C₂S	Acrónimo de silicato dicálcico
C₃S	Acrónimo de silicato tricálcico
Sc	Acrónimo de sílice disuelta
cm	Centímetro
cm²	Centímetro cuadrado
SO₂	Dióxido de azufre
°C	Grado centígrado
NaOH	Hidróxido de sodio

kg	Kilogramo
kg/m²	Kilogramo por metro cuadrado
kg/m³	Kilogramo por metro cúbico
psi	Libra por pulgada cuadrada
±	Más menos
µm	Micrómetro
mmol/L	Milimol por litro
CO	Monóxido de carbono
N/mm²	Newton por milímetro cuadrado
Al₂O₃	Óxido de aluminio
CaO	Óxido de calcio
Fe₂O₃	Óxido de hierro
MgO	Óxido de magnesio
K₂O	Óxido de potasio
SiO₂	Óxido de silicio

Na₂O	Óxido de sodio
Na₂O_{eq}	Óxido de sodio equivalente
LOI	Pérdida por ignición
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrogeno
Rc	Reducción en alcalinidad
SO₃	Trióxido de azufre

GLOSARIO

Adición	Material mineral que es incorporado al cemento o al concreto en diferentes proporciones a fin de mejorar o transformar algunas de las propiedades.
Agregado	Es el material inerte que, unido con un aglomerante en una masa conglomerada, forma concreto o mortero. Estos se dividen según su tamaño en finos y gruesos, el límite es el tamiz de 4,75 milímetros de abertura.
Álcalis	Hidróxido que se forma cuando elementos alcalinos entran en contacto con el agua. En el cemento portland estos elementos alcalinos son el sodio y el potasio.
Andesita	Roca volcánica constituida por el feldespato plagioclasa y por minerales máficos-biotita, anfíboles y piroxenos. Es característica de los volcanes que surgen en los bordes continentales.
Arena volcánica	Material cristalino vesicular de composición basáltica a andesítica que es lanzada por el cráter durante una erupción explosiva, también conocida como escoria volcánica.

ASTM	Siglas en inglés de la Sociedad Americana para el Ensayo e Inspección de los Materiales (American Society for Testing and Materials).
Calcita	Carbonato de calcio, muy abundante que cristaliza en formas del sistema hexagonal, generalmente, blanco puro, a veces transparente.
Caliza	Son rocas de origen sedimentario compuestas por calcitas en su mayor parte. El mármol, también, está muy relacionado con ella.
Caliza dolomítica	Calizas formada por el carbonato doble de calcio y magnesio. Es más común que la verdadera caliza.
Caliza silícea	Rocas calcáreas, que contienen cal, con cantidades variables de sílice amorfa.
Cemento	Material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un sólido compacto con resistencia y durabilidad, este tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua.
Ceniza	Material muy fino que se produce por la fragmentación del magma. Es transportada por el viento a grandes distancias, sus dimensiones son menores a los 2 milímetros.

CESEM	Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas.
CII	Centro de Investigaciones de Ingeniería.
Clinker	Componente principal del cemento constituido por silicatos de calcio obtenido por medio de la cocción hasta fusión parcial de una mezcla convenientemente proporcionada y homogeneizada de materiales debidamente seleccionadas.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas.
Cuarzo	Mineral formado por sílice, su fórmula química es SiO_2 , de fractura concoidea, su brillo es vítreo; incoloro cuando es puro, pero es frecuente que esté teñido por impurezas, con una dureza de 7 en la escala de Mohs y una densidad relativa de 2,65; es tan duro que raya el acero. Es el mineral más abundante y frecuente de la corteza terrestre.
Deletéreo	Denominación que se le da al material pétreo el cual contiene sustancias nocivas, que al utilizarse como agregado para concreto son perjudiciales para la durabilidad en el concreto.
Escoria	Producto no metálico consistente esencialmente de silicatos y alúmino-silicatos de calcio y otras bases que se desarrolla durante la fabricación de acero y hierro.

Esquisto	Un tipo de roca sedimentaria blanda, que se forma por la deposición de capas sucesivas de partículas finas, arcilla, limo o barro, transportadas principalmente por el agua.
Fraguado	Reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de una mezcla de cemento y agua, la cual puede ser un concreto o mortero.
Geomorfología	Es la ciencia que estudia las formas del relieve terrestre; pues, según las partículas que componen el término, “geo” es tierra, “morfo” es forma y “logía” es tratado o estudio. Se remite sólo al estudio de la topografía.
Hormigón	Mezcla compuesta de cemento, agregado fino, agregado grueso y agua, que al endurecer forma una piedra artificial.
Hornablenda	Mineral ferromagnesiano del grupo de los anfíboles muy abundante en la naturaleza como componente de rocas eruptivas.
Inocuo	Denominación que se le da al material pétreo el cual no contiene sustancias nocivas, y que puede utilizarse como agregado para concreto garantizando su durabilidad.

Lapilli	Lava fragmentada y lanzada violentamente que se solidifica en el aire, sus dimensiones van de 4 a 32 milímetros.
Lignito	Carbón mineral cuya composición es 60 a 75 por ciento de carbono, 20 a 30 por ciento de oxígeno y 5,5 por ciento de hidrógeno.
Limonitas	Se forman de alteración de minerales que contienen hierro, una característica común de las limonitas es que todas dan rayas amarillas o pardo amarillentas.
Lutitas	Son rocas de grano muy fino, están cementadas por precipitación química y su porosidad puede llegar a ser inferior al 10 por ciento cuando se produce la compactación de limos y arcillas.
Máficos	Mineral rico en magnesio y hierro.
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
Magma	Masa ígnea en fusión existente en el interior de la Tierra, que se consolida por enfriamiento.
Mica	Es un mineral perteneciente a un grupo numeroso de silicatos de alúmina, hierro, calcio, magnesio y minerales alcalinos caracterizados por su fácil exfoliación en delgadas láminas flexibles, elásticas y muy brillantes.

Mineralogía	Ciencia que estudia los minerales.
Mortero	Mezcla constituida por material cementante, agregado fino, agua, con o sin aditivos empleado para obras de albañilería, como material de pega, revestimiento de paredes, etc.
Norma	Documento de aplicación voluntaria aprobado por un organismo de normalización reconocido que contiene especificaciones técnicas basadas en los resultados de la experiencia y del desarrollo tecnológico.
Olivinos	Mineral granujiento o cristalino, silicato de magnesia y hierro, de color verde amarillento, brillo fuerte, poco menos duro que el cuarzo y que suele encontrarse entre las rocas volcánicas.
Permeabilidad	Cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua se encuentra a presión, o bien, la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias.
Petrografía	Descripción de las rocas.
Piroclastos	Fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva arrojado al aire durante una erupción volcánica. Petrologicamente los piroclastos son fragmentos de roca ígnea volcánica solidificados en algún momento de la erupción.

Piroxenos	Mineral silíceo que aparece en rocas metamórficas ricas en magnesio y en hierro. Hay variedades blancas, amarillas, verdes, pardas y negruzcas.
Pómez	Vidrio volcánico muy poroso y es ligero debido a la liberación de los gases que contenía la lava de la que procede.
Poros	Espacio que hay entre las moléculas de los cuerpos.
Puzolana	Material con alto contenido de silicio o silicio-aluminio de origen natural o industrial, que una vez pulverizado en presencia de agua reacciona con el hidróxido de calcio del cemento formando a temperatura ambiente compuestos con propiedades hidráulicas permanentemente insolubles y estables.
RAA	Reacción Álcali Agregado.
RAC	Reacción Álcali-Carbonato.
RAS	Reacción Álcali-Sílice.
Reología	Estudio de la deformación y flujo de la materia, o bien, el estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos, es decir, la forma en la que un material responde a su fuerza.

Roca ígnea	Material fundido (magma) de estructura cristalina o vítreas que se ha enfriado y solidificado.
Roca sedimentaria	Material de la sedimentación de productos de meteorización y descomposición de diferentes rocas, la precipitación química y mecánica del agua, estas se encuentran característicamente en estratos, dentro de la corteza terrestre, y en los depósitos de partículas finas, generalmente sedimentados sobre el fondo de lagos o mares antiguos.
Roca metamórfica	Son generalmente rocas ígneas y sedimentarias, formadas a profundidad, bajo gran presión y temperatura; así como de otros procesos geológicos, físicos y químicos, han sufrido una transformación de estructura inicial por la organización de sus cristales.
Serpentina	El amianto es el nombre que se le da a un grupo de fibras minerales naturales que se divide en dos grupos dentro de ellos se encuentra la serpentina.
Sílice	Existe normalmente como un óxido en forma soluble, insoluble y coloidal que se encuentra en casi todas las rocas, siendo el componente principal de la arena, arenisca, cuarcita, granito, entre otros.
Subducción	Deslizamiento del borde de una placa de la corteza terrestre por debajo del borde de otra.

Tefra	son fragmentos de lava porosa producida por la rápida liberación de los gases, con dimensiones de unos cuantos centímetros.
Trabajabilidad	Característica de una mezcla o mortero en cuanto a la facilidad que presenta para ser colocado.
Vesicular	Forma característica de las rocas procedentes de una erupción volcánica; estas vesículas, cavidades o poros se forman durante la extrusión del magma a la superficie, como la presión disminuye disuelve los gases magmáticos presentes en las rocas, dando lugar a las cavidades.
Vidrio volcánico	Los vidrios son soluciones, excesivamente, viscoso y grandes, sobre enfriadas en las cuales las moléculas o los grupos atómicos están desordenados y no en un orden definido tal como en los cristales.

RESUMEN

La arena volcánica procedente de la erupción del volcán de Pacaya del 27 de mayo de 2010 y las cantidades acumuladas en los alrededores del volcán, poseen características físicas similares a las de un agregado fino, para lo cual en el siguiente trabajo se estudia y evalúa el efecto en las propiedades físicas, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland puzolánico Norma ASTM C-1157, ya que por ser un material proveniente de un proceso de vulcanización se cree que contiene materiales que pueden ser dañinos para la interacción con el cemento, por otra parte esto ha motivado a que personas comiencen a utilizarlo de manera desmedida en la realización de mezclas de concreto.

En esta investigación, el desarrollo experimental se realizó con base en especificaciones y procedimientos indicados por las normas de la Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM), en las cuales se evaluará la arena volcánica de forma física, química y mecánicamente, interactuando con el cemento, para así determinar si este material cumple con los requisitos establecidos por las normas. Dentro de los ensayos que se realizaron para la determinación de la calidad de la arena, se pueden mencionar análisis físicos completos, reactividad potencial, caracterización petrográfica, análisis químicos, ensayos de compresión y de tensión, y uno de los más importantes la evaluación de la expansión y/o contracción de barras de morteros. Dichos ensayos fueron realizados en el Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII).

Los resultados obtenidos, muestran que la utilización de esta arena no es apropiada, como agregado fino en mezclas de morteros o concretos estructurales y posiblemente su uso más adecuado es en acabados decorativos y en la agricultura pero para ello debe existir un estudio por parte de investigadores en esta rama; esto debido a los análisis de los resultados para el material determinaron que la arena volcánica es un material inocuo, no posee las características físicas y químicas que las de un agregado fino pétreo y su comportamiento mecánico no cumple con los requisitos de la norma.

OBJETIVOS

General

Evaluar y caracterizar física, mecánica, química y petrográficamente la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya ocurrida el 27 de mayo de 2010, así como determinar su reacción álcali-agregado que puede ocurrir al combinársele con el cemento puzolánico bajo la Norma ASTM C-1157, para ser utilizada como agregado fino.

Específicos

1. Determinar si la arena procedente del volcán de Pacaya, puede ser utilizada en la elaboración de mezclas de morteros y concretos.
2. Evaluar el comportamiento de las propiedades físico-químicas de las diferentes arenas a utilizar.
3. Elaborar 4 diferentes mezclas de morteros bajo la Norma ASTM C-109, 1 con arena estándar y 3 con arena procedente del volcán de Pacaya, con diferentes procesos.
4. Evaluar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de las 4 mezclas de mortero.
5. Evaluar la reacción álcali-agregado con el método de expansión o contracción en barras de mortero, de las 4 mezclas de mortero.

INTRODUCCIÓN

La calidad de un concreto endurecido, es factor determinante en la seguridad de una estructura, la degradación del concreto como un resultado de las reacciones químicas entre el cemento y los agregados deletéreos conlleva a un proceso de deterioro, cuando en un concreto se cuenta con la presencia de agregados contaminados con sustancias químicas perjudiciales, este se manifiesta en forma de expansión, ocasionando grietas o deformaciones, esto debido a su reacción álcali-agregado provocando pérdida progresiva de sus propiedades físicas y mecánicas.

Como una solución y necesidad de buscar alternativas para darle uso a la arena volcánica que se encuentra en las faldas del volcán de Pacaya, así como la arena que cayó en la ciudad de Guatemala derivada de la erupción ocurrida el 27 de mayo de 2010, la cual generó miles de metros cúbicos de este material; se propuso caracterizar física, mecánica, química y petrográficamente este material para así buscar un uso adecuado y mitigar el uso inadecuado de la arena volcánica como sustituto de un agregado fino.

Dicho material posee algún parecido a un agregado grueso por lo que como primer punto de partida se caracterizara bajo las mismas normas que se utilizan para un agregado fino siendo esta la Norma ASTM C-33, luego se aplicará un proceso de tamizaje para poder ajustar el material a una arena estándar bajo Norma ASTM C-778 y aplicarles procesos los cuales se describen en este trabajo, seguidamente se procederá a realizar ensayos mecánicos con las diferentes arenas volcánicas, bajo las Normas ASTM C-109 y ASTM C-227.

1. PRINCIPIOS GENERALES DE LOS VOLCANES

1.1. Definición

Los volcanes son conductos por donde es expulsado el material fundido y caliente (magma) que existe a grandes profundidades de la Tierra y que al ascender a la superficie, escurre sobre los flancos del volcán con el nombre de lava.

A pesar que los volcanes pueden tener una gran variedad de formas, la más característica es cónica, y es producto de la acumulación de materiales expulsados por diferentes erupciones que se depositan unos sobre otros, pudiendo alcanzar grandes alturas.

Sobre la superficie terrestre, existen más de 10 000 volcanes y varios millones se encuentran por debajo de la superficie del mar. Desde hace 10 000 años, más de 1 500 volcanes han entrado en erupción, cerca de 400 se manifestaron en el transcurso del siglo XX, y más de treinta hacen erupción cada año. Actualmente se estima que cerca de 260 000 personas han perecido por efecto de desastres volcánicos desde el 1700 D.C.

A pesar de lo anterior, el vulcanismo también es beneficioso para la naturaleza y el hombre, ya que la ceniza caída, contribuye al desarrollo de vegetación, y muchos recursos producto de la actividad volcánica, pueden ser aprovechados por el ser humano (energía geotérmica, materiales de construcción, entre otros).

1.2. Estructura interna de la tierra

Los volcanes, al igual que los terremotos y la formación de montañas entre otras manifestaciones, tienen su origen en los cambios que ocurren al interior de la Tierra debidos a la forma en la cual ésta libera calor. Para entender este proceso se debe conocer un poco sobre la estructura interna de la Tierra.

Por sus propiedades físicas, el interior de la Tierra se divide en tres zonas: corteza, manto y núcleo; las cuáles son medidas por medios indirectos, al estudiar la propagación de las ondas sísmicas producidas por los terremotos.

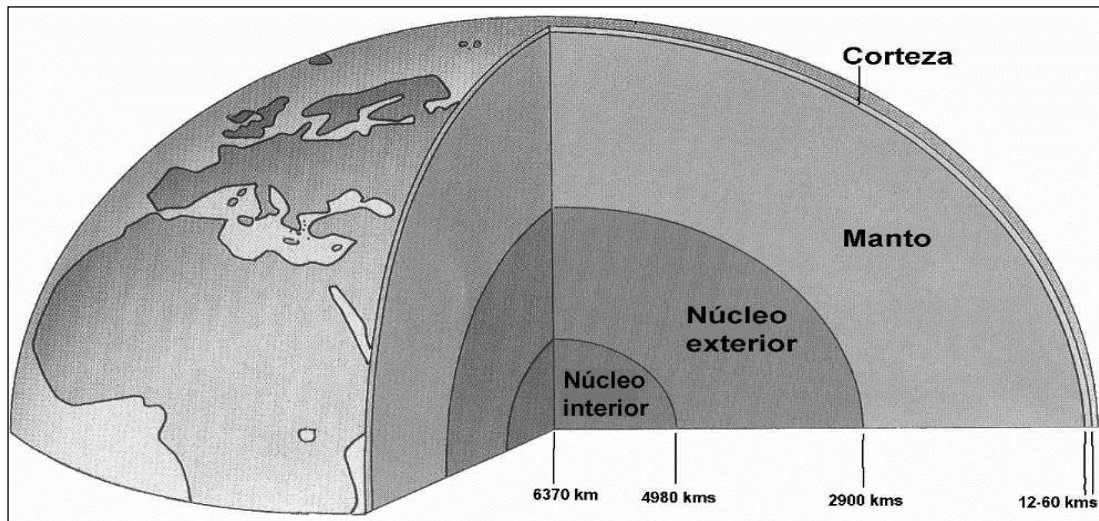
La corteza es la parte exterior del planeta, su espesor varía de 20 a 80 kilómetros en los continentes, y aproximadamente 6 kilómetros en los océanos.

El manto tiene un espesor de aproximadamente 2 900 kilómetros. Su composición química es muy parecida a la de la corteza, pero debido a la presión y temperatura, el material es más denso y tiene un comportamiento plástico.

El núcleo tiene un radio de 3 400 kilómetros aproximadamente. Su composición química es de níquel (Ni) y hierro (Fe), la temperatura a esta profundidad se estima entre 3 000 y 4 000 grados centígrados.

Por su estado físico el núcleo se divide en: núcleo externo, líquido, responsable del campo magnético terrestre, y núcleo interno en estado sólido.

Figura 1. Estructura interna de la tierra



Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Folleto Los Volcanes. p. 01.

El calor interno de la Tierra es el motor de los cambios que se generan en la corteza terrestre en la escala de tiempo geológico.

La forma por la cual se transmite el calor dentro de las diferentes partes de la Tierra es por convección y conducción. Es decir, existen flujos o corrientes de material caliente que al ser menos denso sube para luego descender al enfriarse. Esto es similar a lo que ocurre en la atmósfera con el movimiento de masas de aire caliente y frío, o lo que se observa cuando se calienta un líquido.

El modelo que explica el intercambio de calor entre el manto y la corteza se denomina tectónica de placas. Este propone que los primeros 100 kilómetros de la superficie terrestre se comportan como un material rígido, quebradizo y poco denso denominado litosfera, que incluye a la corteza y una pequeña parte del manto superior. La litosfera descansa sobre una capa de material más denso y fluido denominado astenósfera.

La litosfera no es una capa continua, está fragmentada en varios bloques o placas que se mueven con velocidades del orden de varios centímetros al año. El movimiento relativo entre placas produce roces, choques y deformaciones en sus bordes o límites, y en estas zonas, es donde principalmente se producen los terremotos y también se forman las montañas de volcanes.

1.3. Vulcanismo y ambientes tectónicos

A escala global, el fenómeno del vulcanismo se observa en tres tipos principales de ambientes tectónicos:

- En límites de placa tipo divergente o de formación de corteza, cuyo rasgo más característico son las dorsales oceánicas o cordilleras submarinas. Ejemplo de éste es la Dorsal Media del océano Atlántico, que es una cordillera de origen volcánico que corre por el centro y a todo lo largo del océano Atlántico. El vulcanismo asociado a este tipo de ambiente se caracteriza por erupciones efusivas con grandes emanaciones de lava y gases en forma poco violenta, a lo largo de grietas. Ejemplo de éste son los volcanes de Islandia.
- En límites de tipo convergente o zonas de subducción. En este tipo de límite dos placas de la litosfera chocan y una de ellas se mete o subduce por debajo de la otra. Esto puede ocurrir entre dos placas de corteza oceánica o una oceánica y la otra continental. En este último caso, la oceánica se subduce por debajo de la placa continental. Ejemplo de este proceso es el que originó al denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, el cual se caracteriza por formación de grandes cordilleras, como la de los Andes; arcos o ejes volcánicos, como la cadena Volcánica Centroamericana, y mucha actividad sísmica, como la que se registra en Centroamérica paralela a la costa del Pacífico.

- Puntos calientes, este tercer ambiente no tiene relación con la distribución de los límites entre placas. Su origen está asociado a regiones calientes muy localizadas dentro del manto y que permanecen quietas respecto al movimiento de las placas, de ahí su nombre de puntos calientes. El magma al alcanzar la superficie forma los volcanes y el movimiento de la placa sobre el punto caliente hace que se formen cadenas de islas volcánicas, en una forma similar a la que ocurre al pasar lentamente una hoja de papel sobre un fósforo encendido. El ejemplo más claro son las islas de Hawaii, las cuales se encuentran en medio de la placa del Pacífico.

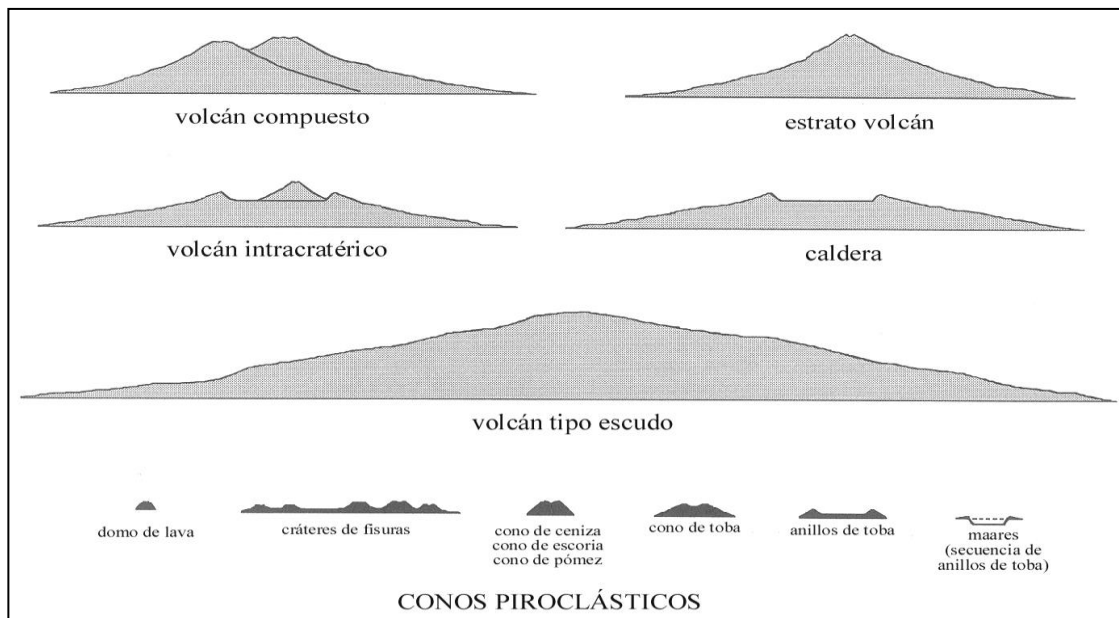
1.4. Clasificación de los volcanes

Los volcanes se clasifican por el tipo de estructura o edificio volcánico y por el tipo de actividad o de erupción que presentan. Ambos aspectos están relacionados al ambiente tectónico que les dio origen. Por otra parte, este tipo de clasificaciones no es exacta y un mismo volcán puede combinar diferentes estructuras, así como presentar cambios en la modalidad del tipo de erupción. Por su estructura, los volcanes se clasifican en:

- Estrato volcán. Tienen forma cónica con un cráter central, el edificio volcánico está formado por capas sucesivas de depósitos de lava, escoria, arena y cenizas producto de las diferentes erupciones. La mayoría de los volcanes en Guatemala son de este tipo.
- Calderas. Son el resultado de grandes erupciones, las cuales hacen que colapse o se derrumbe la parte central o todo el edificio volcánico, dejando un gran cráter o caldera. Ejemplos de este tipo de estructuras en Guatemala son las calderas de Atitlán y Amatitlán.

- Tipo escudo. Se caracterizan por ser grandes montañas, con pendientes suaves, formados por la superposición de ríos de la lava fluidos. Ejemplo de este tipo son los volcanes de Hawaii.
- Domo de lava. Presentan estructuras más pequeñas, comparadas a las anteriores, con fuertes pendientes y producto de la acumulación de lavas muy viscosas y flujos de bloques y ceniza incandescente. Ejemplo de éste es el Domo del Santiaguito localizado al suroeste del volcán Santa María.
- Cono de cenizas o escoria. Son conos relativamente pequeños que como su nombre lo indica están formados por la acumulación de ceniza y escoria. Ejemplo de éstos son todos los cerros alineados principalmente a la falla de Jalpatagua y del graben de Ipala.

Figura 2. **Tipos de estructura de volcanes**



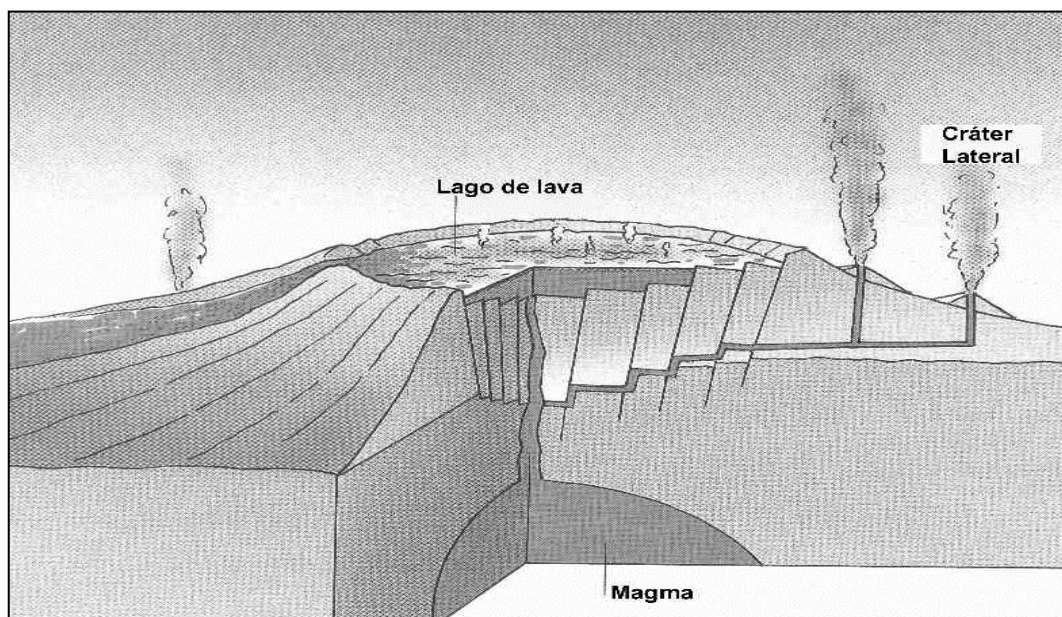
Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Folleto Los Volcanes. p. 03.

1.5. Clasificación de la actividad volcánica

La actividad volcánica se clasifica dependiendo del tipo de lava eruptada, así como por la cantidad de gases emanados durante las erupciones, y se nombran de acuerdo a los patrones observados en algunos volcanes más estudiados y que presentan un comportamiento definido, siendo los principales tipos:

- Erupción tipo hawaiano: se caracteriza por una abundante salida de lava muy fluida que forma grandes ríos y lagos. Los gases son liberados en forma tranquila. Las erupciones violentas son raras y los gases pueden impulsar fuentes de lava que llegan a alcanzar los 500 metros de altura.

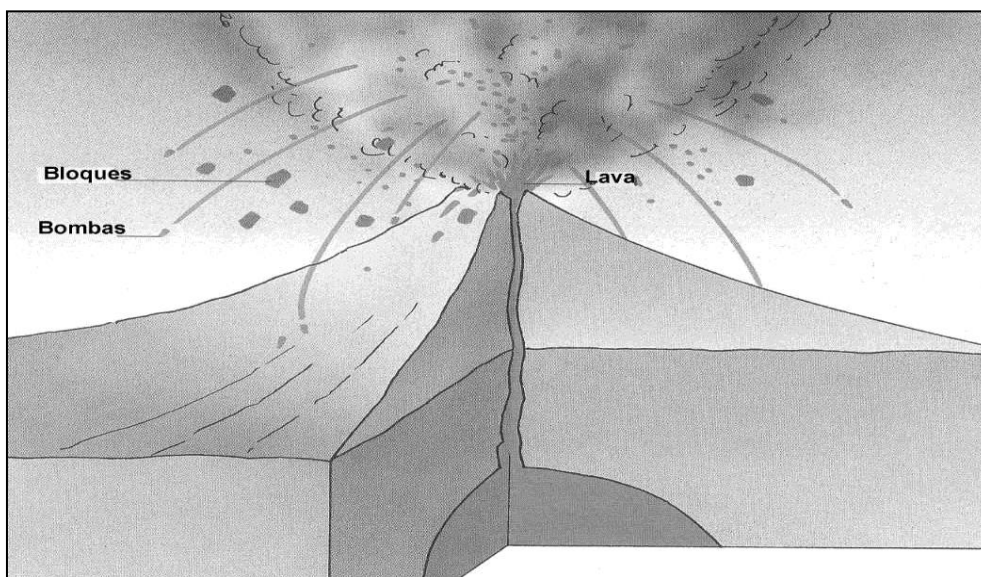
Figura 3. Erupción tipo hawaiano



Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Folleto Los Volcanes. p. 04.

- Erupción tipo estromboliano: se caracteriza por una actividad regular o constante de explosiones que lanzan lava pastosa en estado incandescente. Ríos de lava y emisión de gases y suelen edificar conos de escoria con bastante rapidez. Un ejemplo de este tipo de actividad es la del volcán de Pacaya.

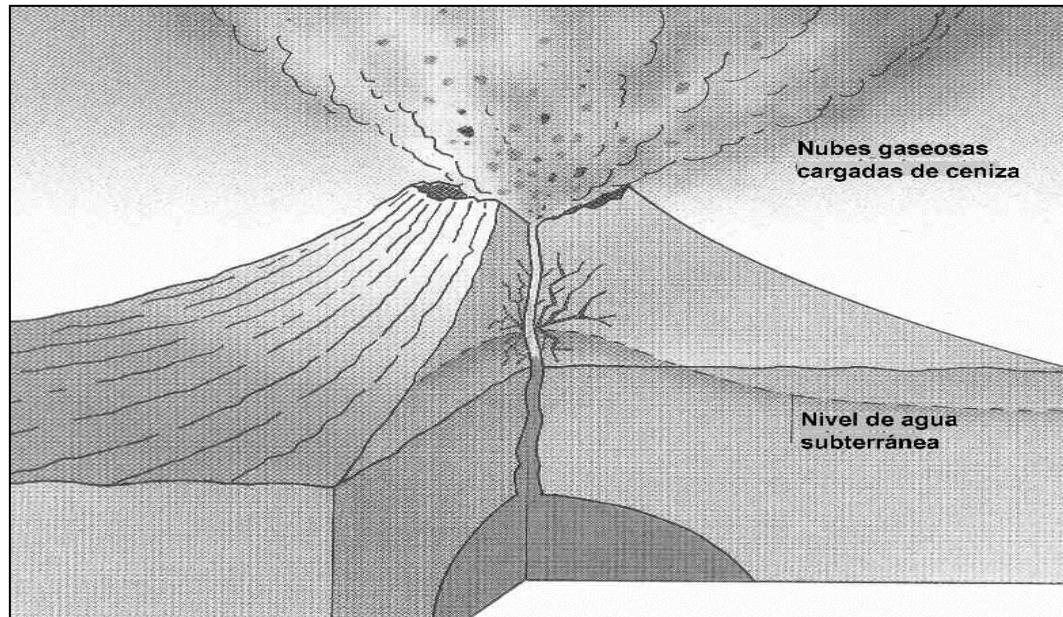
Figura 4. **Erupción tipo estromboliano**



Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Folleto Los Volcanes. p. 04.

- Erupción tipo vulcaniano: son erupciones poco frecuentes y más violentas, debido principalmente a que el magma es más viscoso y por lo tanto la liberación de los gases más difícil. Tales erupciones van acompañadas por una gran nube de gases cargados de ceniza, arena y fragmentos de rocas que alcanza varios kilómetros de altura. Después de ocurrida la explosión, que limpia la chimenea, aunque poco frecuente una corriente de lava puede tener lugar, ya sea saliendo por el cráter principal, secundario o por una fisura lateral. Un ejemplo de este tipo de actividad es el volcán de Fuego.

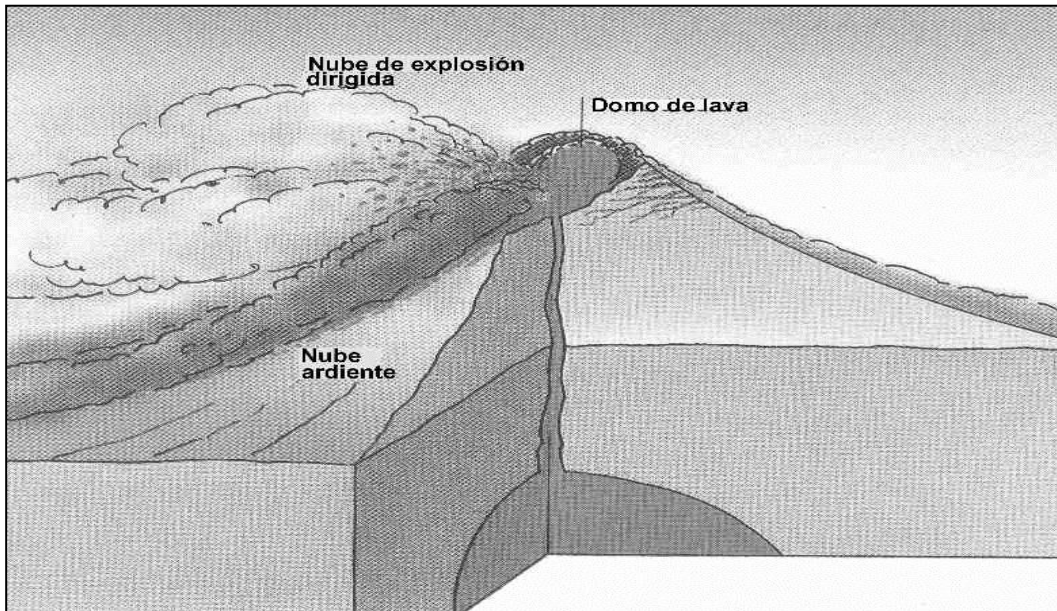
Figura 5. Erupción tipo vulcaniano



Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Folleto Los Volcanes. p. 04.

- Erupción tipo peleano: se caracterizan por ser muy explosivas, debido a la presencia de magmas viscosos con alto contenido de gases. Pueden producir explosiones de rocas, gases y magma muy pulverizado dirigido lateralmente formando nubes ardientes o flujos piroclásticos. Un ejemplo de este tipo de actividad es el volcán Santiaguito.

Figura 6. Erupción tipo peleano



Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Folleto Los Volcanes. p. 05.

- Vulcaniano: erupciones poco frecuentes y más violentas debido principalmente a que el magma es más viscoso y por lo tanto la liberación de los gases más difícil. Tales erupciones van acompañadas por una gran nube de gases cargados de ceniza, arena y fragmentos de rocas que alcanza varios kilómetros de altura. Después de ocurrida la explosión, que limpia la chimenea, aunque poco frecuente una corriente de lava puede tener lugar, ya sea saliendo por el cráter principal, secundario o por una fisura lateral. Ejemplo: volcán de Fuego.
- Pliniano: erupciones muy violentas que levantan columnas verticales de gases, piroclastos y fragmentos de roca a varias decenas de kilómetros de altura. A menudo son acompañadas por el colapso de la parte superior del edificio volcánico. Un ejemplo de este tipo de actividad fue la erupción del volcán Santa María el 24 de octubre de 1902.

- Islándico: no existe un cono con cráter central, como en todos los anteriores. La característica principal es la emisión de enormes volúmenes de lava a través de fisuras o grietas. Algunas forman coladas de poco espesor que cubren áreas enormes.
- Freática o geiseriana: producto del contacto de aguas subterráneas con la roca y fumarolas todavía caliente dentro del volcán. A diferencia de todas las anteriores no existe ascenso de magma. Por lo general presenta emanación de vapor de agua y gases en las proximidades o laderas del volcán que puede durar por mucho tiempo y a veces se intensifican en la época de lluvia. En algunos casos llegan a producir explosiones que forman pequeños cráteres. Un ejemplo de este tipo de actividad fue la actividad de los volcanes Tacaná, en 1986 y Acatenango, en 1972.

1.6. Productos de la actividad volcánica

Los principales productos en una erupción son: gases, lava y fragmentos sólidos calientes o en estado incandescente.

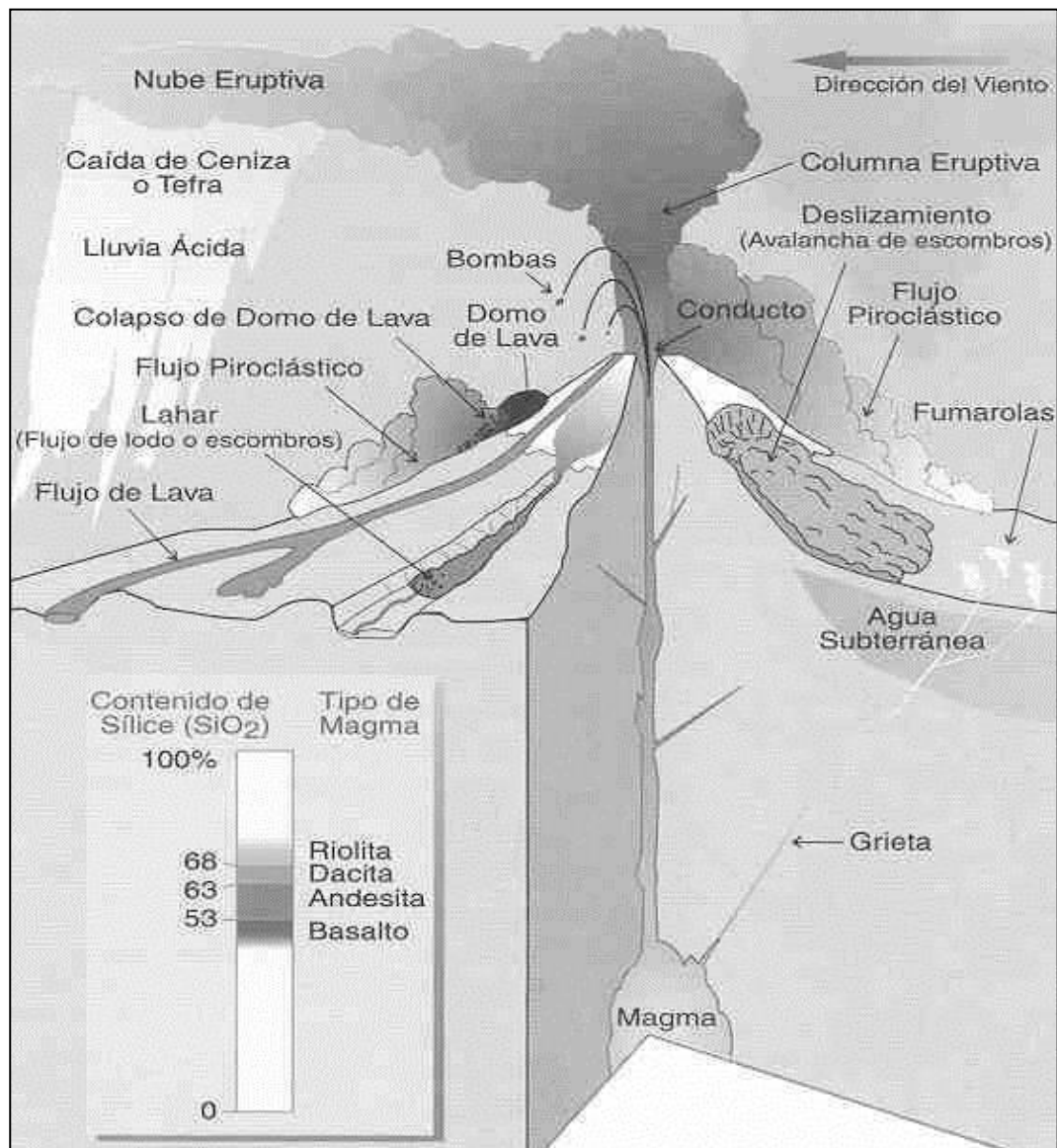
La composición de los diferentes tipos de lava, es muy similar y las principales diferencias serán algunas de sus propiedades (como color y viscosidad), y el porcentaje de dióxido de silicio (SiO_2) en su composición, ya que al incrementar su concentración, aumenta la viscosidad de la lava. La temperatura medida en ríos de lava, pueden variar entre 900 y 1 200 grados centígrados. En Guatemala las lavas más fluidas son las del volcán de Pacaya, seguidas por las del volcán de Fuego y finalmente las del volcán Santiaguito.

La fuerza que impulsa el magma hacia arriba, es la liberación o expansión de los gases disueltos en el magma, debido a la disminución en la presión. Los principales gases liberados por actividad volcánica son: vapor de agua (90 por ciento), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO) y sulfuro de hidrógeno (HS). Las concentraciones de los mismos varían de un volcán a otro y en un mismo volcán, también varían durante las diferentes etapas o fases de una erupción.

Piroclastos, es el nombre genérico dado a todo el material sólido fragmentado de diferente tamaño y forma, que es lanzado durante una erupción. Por sus dimensiones se dividen en:

- Bloques, son fragmentos de roca de forma irregular que formaban parte del cono volcánico. Sus dimensiones van de 64 milímetros en adelante.
- Bombas volcánicas, son masas de lava de consistencia plástica que al ser lanzadas al aire se solidifican tomando formas redondeadas y aerodinámicas. Sus dimensiones van de pocos a varias decenas de centímetros.
- Escoria o tefra, son fragmentos de lava porosa producida por la rápida liberación de los gases, con dimensiones de unos cuantos centímetros.
- Lapilli, es lava fragmentada y lanzada violentamente que se solidifica en el aire, sus dimensiones van de 4 a 32 milímetros.
- Ceniza, término genérico del material muy fino que se produce por la fragmentación del magma. Es transportada por el viento a grandes distancias, sus dimensiones son menores a los 2 milímetros.

Figura 7. **Productos generados por una erupción volcánica**



Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Folleto Los Volcanes. p. 06.

2. ANTECEDENTES DEL VOLCÁN DE PACAYA

2.1. Historia

El volcán de Pacaya forma parte de la cadena volcánica del cuaternario de Guatemala, la cual cruza completamente el país en forma paralela a la costa del pacífico y está catalogado como uno de los más activos de Centro América. Yace en la orilla de una considerable caldera formada en la era del Pleistoceno que contiene el lago de Amatitlán. La caldera se formó como resultado de al menos noventa grandes explosiones a lo largo de 300 000 años, generando un total de 70 kilómetros cúbicos de magma. Posteriormente se forman el Cerro Grande o Cerro de Agua y después, los dos Cerros Chiquitos, el cerro y el cono del volcán de Pacaya propiamente dicho, por último el cono que lleva el nombre de Cono MacKenney.

Según vulcanólogos, el cráter abierto hacia el occidente, empezó a formarse hace más de 2 000 años y en sus extremos empezó a formarse el cerro chino en un lado y en el otro el volcán de Pacaya. Aunado al volcán de Fuego, el de Pacaya es uno de los más activos que registra la historia de nuestra región, pues ya en 1524 (época de la conquista) se tienen referencias de constantes erupciones. De esta época se tienen crónicas, pinturas y grabados que datan de 1565, como testimonio de la primera erupción; sin embargo, el relato de la erupción de 1775 es aún más importante y se encuentra documentada en el archivo de Indias en Sevilla, España.

Hace 1 100 años, hubo un colapso mayor del edificio del volcán, causando un enorme derrumbe de tierra. Depósitos del derrumbe se desplazaron hasta aproximadamente 25 kilómetros del volcán sobre la llanura costera del Pacífico. El derrumbe dejó un gran cráter, dentro del cual el presente cono activo ha ido creciendo. Por la presencia de una cámara magmática a poca profundidad debajo del Pacaya, existe la posibilidad de que se formen distorsiones en el cono que pueden causar inestabilidad en el edificio volcánico. Por lo tanto, existe el riesgo de que ocurran derrumbes en el futuro que pueden afectar las áreas pobladas en las inmediaciones del volcán.

El parque comprende un total de 2 065 hectáreas, encontrándose dentro del mismo, la laguna de Calderas con una extensión de 35 hectáreas, la cual está asentada en un antiguo cráter y que actualmente surte de agua potable a 11 comunidades y 10 000 habitantes. Asimismo se encuentra el cráter activo del volcán.

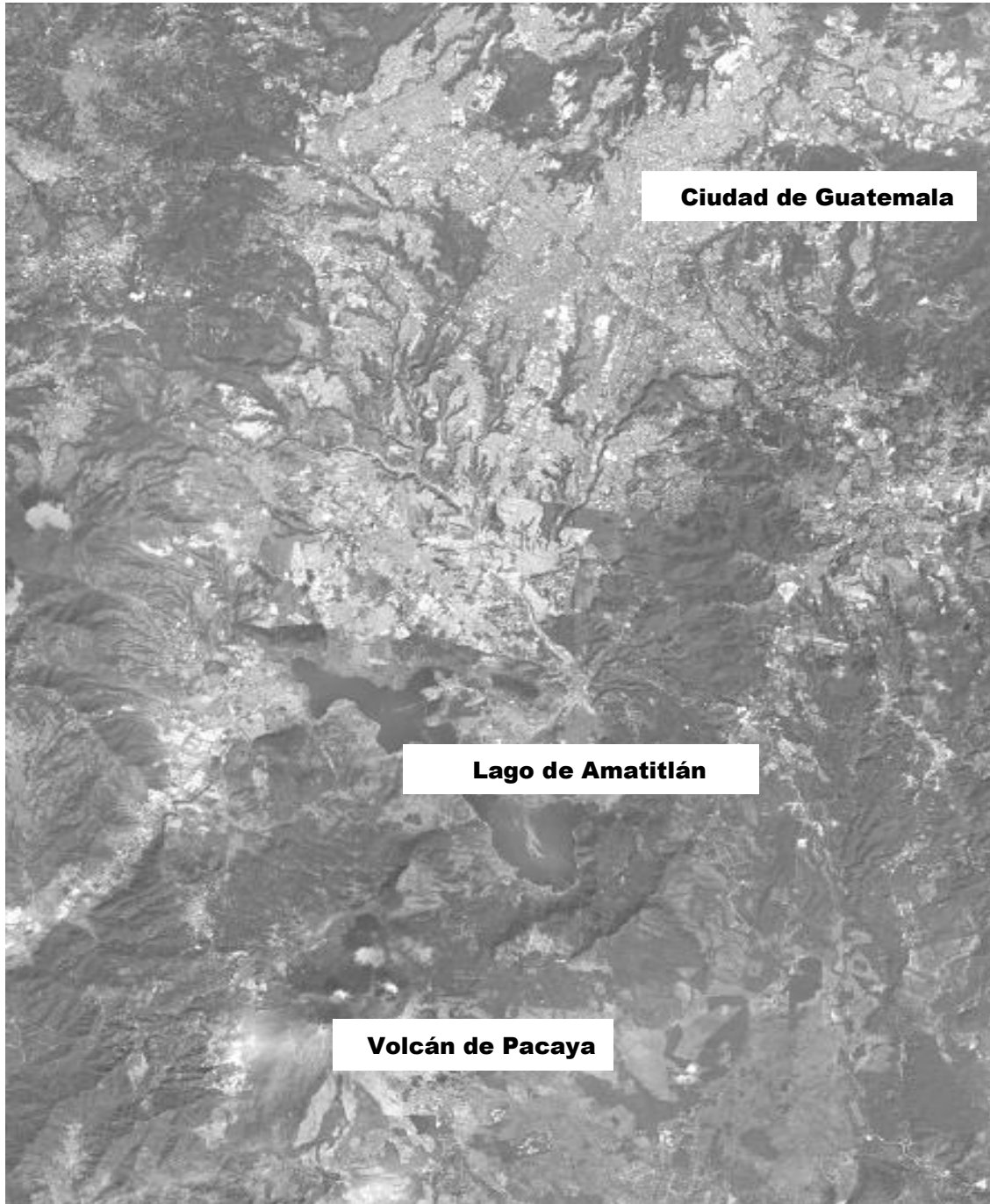
En el área puede observarse una gran variedad de fauna y flora; identificándose 28 especies de mamíferos, 101 especies de aves, 75 familias de flores, destacándose por su importancia la especie endémica Cedro del Pacaya (cedrilla pacayana) y otras como el árbol de hormigo, (*platimiscium dimorphadrum*), con el que se construye la marimba, instrumento musical nacional

Los suelos del área son reflejo de su origen volcánico. Permeables (el agua se filtra fácilmente) y con alto contenido de arena y grava, son ricos en potasio y bajos en fósforo. Esto les brinda un alto nivel nutritivo para ser cultivados. Es importante hacer un uso adecuado del suelo para que no pierda su cobertura natural. El volcán de Pacaya fue declarado parque nacional el 20 de julio de 1963 por acuerdo gubernativo.

2.2. Ubicación

Se ubica al sur del lago de Amatitlán y dista 30 kilómetros al sur-oeste de la ciudad de Guatemala. Su posición geográfica está dada por las coordenadas: latitud 14°22'50" N y longitud 90°36'00" W. El cráter del cono MacKenny (cráter actualmente activo) se localiza a 2 562 metros sobre el nivel del mar.

Figura 8. **Ubicación del volcán de Pacaya**



Fuente: www.maps.google.com.gt/maps?hl=es&authuser=0. Consulta: 12 de septiembre de 2012.

2.3. Forma y estructura volcánica

El complejo volcánico de Pacaya, se ubica en la parte sur de una muy antigua caldera volcánica, cuya depresión principal, está actualmente ocupada por el llamado lago de Amatitlán.

El complejo Pacaya comprende varias estructuras: un antiguo estrato-volcán, domos de lava y el moderno volcán compuesto. Este último es el que ha causado las erupciones en tiempos recientes.

El antiguo estrato-volcán, ocupa el centro del complejo volcánico, tiene laderas suaves parcialmente erosionadas y abarca hasta cerca de San Vicente Pacaya. Su actividad posiblemente inició hace 23 000 años, en el sitio que ocupa la laguna de Calderas.

En la margen sur del lago de Amatitlán y en los alrededores del actual volcán compuesto, hay presencia de domos que tienen una composición ácida e intermedia, y que se reflejan en la topografía como cerros redondeados. El llamado volcán compuesto moderno, es un estrato-volcán con una caldera en forma de herradura que se abre hacia el suroeste, y se ubica en la parte suroccidental del complejo volcánico.

Dentro de esta caldera, existe un cono formado posteriormente, llamado cono MacKenny, el cual ha ido cambiando su forma desde 1961 por un frecuente volcanismo efusivo y explosivo. Esta actividad ha generado frecuentes flujos de lava que cubren el fondo de la caldera y se extienden principalmente hacia el sur. En el borde norte de la caldera, existe un pequeño cono parásito, llamado cerro Chino.

Figura 9. **Complejo volcánico de Pacaya**



Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Folleto Volcán de Pacaya. p. 02.

2.4. Características de la actividad volcánica

La actividad del volcán de Pacaya se caracteriza por la efusión de flujos de lava, emisión de piroclastos que son depositados en los alrededores del cono activo y por la emisión de columnas de gases (principalmente vapor de agua). Las características químicas de los productos efusivos del volcán, permite clasificarlos como de composición intermedia, con un porcentaje de sílice que puede oscilar entre el 55 a 60 por ciento.

Figura 10. **Vista de columna de vapor de agua emanada por el cono activo MacKenny del volcán de Pacaya**



Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Folleto Volcán de Pacaya. p. 02.

2.5. Actividad histórica del volcán de Pacaya

Desde el siglo XVI, se han registrado muchas erupciones del volcán de Pacaya, en forma intermitente, distinguiéndose varios ciclos de actividad, alternados con períodos de baja actividad o de quietud. Desde 1961 hasta mayo de 2010 se han registrado un total de 15 erupciones mayores y otras muchas más, de menos intensidad.

Las principales actividades que se relacionan con la actividad del volcán de Pacaya desde el siglo XVI, se mencionan a continuación.

Tabla I. **Actividades históricas del volcán de Pacaya**

FECHA	DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDAD
1565	Fuerte erupción, acompañada por terremotos.
1651	Lanzamiento de cenizas, retumbos y temblores.
1664	Erupción con retumbos y fuerte resplandor nocturno.
1775	Lanzamiento de ceniza que obscurece varios días la ciudad de Antigua Guatemala.
1846	Activación en el cono de la cúspide.
1856 – 1880	Erupciones y actividad fumarólica.
1902	Actividad fumarólica de corta duración.
1917	Diciembre: actividad fumarólica que dura pocos meses.
1935	Junio: actividad fumarólica de poca duración.
1961	Marzo: fuerte erupción con efusión de lavas en ladera sur-oeste que alcanzan casi 8 kilómetros al sur.
1962	20 marzo: hundimiento del sector sur-oeste del cono principal (150 metros de largo y 100 metros de ancho).
1965	10 enero: flujo de lava quema bosques de pinos al sur-este. 21-22 mayo: actividad eruptiva. 26 junio: crecimiento de cono de escoria dentro del hundimiento de 1962. 11 julio: actividad fumarólica y flujo de lavas en el hundimiento. Ensanchamiento de foco eruptivo e incremento de explosiones y lava al sur-este.
1967	24 enero, 23 febrero, 09 mayo: emisión de ceniza y lava. 15 septiembre: actividad apreciable.
1983	Enero-febrero: explosiones ocasionales y emisión de lava en el flanco del hornito. Septiembre-noviembre: actividad estromboliana con flujo de lava en el flanco del hornito.
1984	Diciembre: erupción con flujo de lava y formación de columna de ceniza de casi 8 kilómetros de altura.

Continuación de la tabla I.

1986	<p>Enero: expulsión de casi 5 millones de metros cúbicos de material depositando ceniza en El Caracol, Los Pocitos y El Patrocinio. Evacuación de más de 3 000 personas, daños en viviendas y pérdida de animales domésticos.</p> <p>Diciembre: erupción con daños a la agricultura y a 12 personas; 25 viviendas con techo perforado por caída de proyectiles lanzados por el volcán (bloques de casi ¼ kilogramos y diámetro de 25 centímetros) obstrucción de caminos.</p>
1987	<p>21 – 25 enero: erupción afectando Amatitlán y Santa Elena Barillas. Caída de ceniza en El Caracol, El Rodeo y parcialmente en El Patrocinio; evacuación de habitantes.</p> <p>14 junio: río de lava al sur-oeste; 600 evacuados.</p>
1989	<p>7 - 11 marzo: flujos de lava amenazan El Patrocinio, El Rodeo y El Caracol.</p>
1990	<p>02 abril, 15 septiembre: erupciones con caída de ceniza en El Patrocinio y El Caracol.</p>
1991	<p>05 marzo, 8 - 15 julio: erupción con leve caída de ceniza en El Caracol y El Patrocinio.</p> <p>06 - 16 junio: erupciones y destrucción de cráter activo.</p> <p>27 julio: erupción con caída de ceniza en El Caracol, El Patrocinio, Escuintla y Santa Lucía Cotzumalguapa.</p> <p>01 agosto: columna de 3 000 metros de altura provoca caída de ceniza en Barberena y Cuilapa.</p>
1993	<p>10 enero: colapso de cráter activo provoca avalancha incandescente hacia El Caracol y la columna eruptiva fue transportada a Santa Elena Barillas; follaje quemado por efecto de la acidez de la ceniza.</p> <p>21 septiembre: erupción con caída de ceniza en El Caracol.</p>

Continuación de la tabla I.

<p>1994</p>	<p>16 marzo: erupción con fuente de lava de 300 metros de altura; caída de ceniza en las faldas del volcán.</p> <p>15 octubre: erupción freatomagmática, vegetación quemada debido a la ceniza entre el volcán, Santa Elena Barillas y la aldea Los Llanos. Reporte de enfermedades bronquiales y pulmonares entre los pobladores.</p>
<p>1995</p>	<p>07 abril: flujo de lodo volcánico sepulta casa en el Caserío Los Ríos (muere una niña), evacuación de habitantes y deposición de arena volcánica.</p> <p>01 - 07 junio: colapsos en cráter activo, avalanchas destruyen algunas antenas de transmisión y queman parcialmente la vegetación en 4 kilómetros cuadrados de la Montaña Las Granadillas. Flujos de lodo dañan caminos y un puente incomunicando las comunidades El Patrocinio y Los Ríos, obligando a la evacuación y al traslado parcial de los habitantes a otra área más segura.</p> <p>17 septiembre: erupción freatomagmática; caída de ceniza y polvo volcánico en Santa Elena Barillas, Barberena y Cuilapa.</p>
<p>1996</p>	<p>11 octubre: erupción con fuente de lava y flujo de lava de 1,5 kilómetros al sur-oeste; ceniza muy fina al Océano Pacífico.</p> <p>11 noviembre: erupción forma colada de lava de 2 kilómetros de largo y deposita ceniza volcánica en alrededores de El Caracol, Finca El Rabón y El Rodeo. Evacuación en El Caracol, El Rodeo y El Patrocinio.</p>

Continuación de la tabla I.

<p>1998</p>	<p>20 mayo: erupción y caída de ceniza en la capital, cierre del aeropuerto internacional La Aurora durante 3 días. Incendio forestal en Cerro Grande debido a caída de bombas y bloques incandescentes. Evacuación en comunidades San Francisco de Sales, El Cedro y El Pepinal. Dos personas heridas por caída de bloques en San Francisco de Sales.</p> <p>14 junio: erupción con fuente incandescente acompañada de columnas de ceniza que deposita una capa de 2,5 centímetros de escoria fina en El Caracol. Columna eruptiva hasta casi 1 700 metros de altura. Pérdidas de casi Q. 70 000 por daños en cultivos de café, maíz, frijol y pago de repasto de ganado evacuado a otros potreros (datos de MAGA). La navegación aérea detecta ceniza a 18 000 pies de altura.</p> <p>18 junio: explosión con caída de bloques incandescentes en los flancos del volcán, caída de ceniza fina en San Vicente Pacaya. Coladas de lava hacia el nor-oeste, el norte y al sur en dirección al caserío El Caracol. Columna de ceniza de casi 5 kilómetros de altura, produciendo caída de lapilli al sur-oeste y nor-oeste. Caída de ceniza muy fina en el aeropuerto internacional La Aurora, provocando el cierre por 35 horas. Colapso en el cráter activo, generando avalancha de escombros que produjo una nube de ceniza, gas y bloques calientes que quemaron vegetación.</p> <p>11 diciembre: explosiones con expulsión de material incandescente hasta 25 metros encima del cráter activo.</p>
-------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Continuación de la tabla I.

<p>2000</p>	<p>16 enero: erupción con fuente incandescente. Flujo de lava al sur-oeste acompañado de nubes ardientes que alcanzan la base del cono. Deposición de escoria basáltica hasta casi 7 kilómetros de distancia y ceniza en Escuintla. Debido a una nube oscura de ceniza muy fina, se dificulta la visibilidad y el tránsito en un tramo de la Carretera CA-2, entre Tiquisate y Patulul (Suchitepéquez). Caída de escoria, en las poblaciones de El Caracol, El Rodeo y El Patrocinio.</p> <p>29 febrero: erupción con fuente de lava, acompañada de columna de ceniza de casi 6 kilómetros de altura desplazada al sur-oeste por el viento. Caída de ceniza en El Caracol, El Rodeo y El Patrocinio. Coladas de lava al oeste y sur. Caída de escoria daña cultivos de café y los pastizales quedan cubiertos por una capa de color negro. La erupción persiste al siguiente día, expulsando moderada cantidad de ceniza muy fina, afectando las comunidades con polvo volcánico.</p> <p>01 - 02 agosto: erupción con columnas de 600 metros de altura con caída de ceniza a inmediaciones del Cerro Chino. Fuente de lava de hasta 400 metros de altura. La parte superior del volcán, crece casi 7 metros. Caída de ceniza en alrededores de Cerro Chino y montaña Las Granadillas.</p> <p>03 - 04 agosto: erupción, desgasificación y columnas de más de 2 000 metros de altura. Caída de ceniza en El Patrocinio, Los Ríos, Los Jazmines, El Rodeo, El Rabón, El Chupadero, y hasta 20 kilómetros del volcán. Constantes explosiones, con aporte de gases.</p> <p>07 - 08 agosto: erupción estromboliana con pequeñas explosiones de ceniza. Fuente de lava de hasta 300 metros de altura y columna de partículas finas de 1 500 metros de altura, caída de ceniza en San Francisco de Sales, El Cedro y San José Calderas. Columnas de ceniza de hasta 500 metros de altura que caen como una delgada capa de ceniza fina en Amatitlán y en menor cantidad en Villa Nueva, San Miguel Petapa y sur de la ciudad capital.</p>
<p>2010</p>	<p>27 – 28 mayo: erupción estromboliana-paroxismal con fuente de lava de aproximadamente 2 kilómetros de altura, acompañada de columnas de ceniza desplazada por el viento a 300 kilómetros al norte sobre la ciudad capital, Amatitlán, Villa Canales, Villa Nueva, Boca del Monte, San Miguel Petapa, así mismo en los departamento de Cobán, parte de Puerto Barrios y Peten. Así mismo el colapso de la pared oeste del cráter.</p>

Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Folleto Volcán de Pacaya. p. 04.

2.6. Erupciones del volcán de Pacaya del 27 y 28 de mayo de 2010

Una de las erupciones, más violentas de la última década ocurrió el 27 y 28 de mayo del 2010, luego de más de 10 años sin erupciones paroxismales desde el 2000. Esta erupción es comparada por la violencia a las ocurridas en 1987 y 1989. Las erupciones de esa fecha tuvieron varios factores determinantes, uno de ellos la dirección del viento la cual incidió en la caída de ceniza en varios municipios y departamentos de Guatemala, otro factor fue que en la fase más violenta de la erupción se generó dos fuertes fuentes incandescentes de varios kilómetros de altura.

Figura 11. Vista aérea de la erupción volcánica del 27 de mayo de 2010



Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

Así mismo el colapso de la pared oeste del cráter MacKenney, bajando en este una avalancha de escombros que bajo dentro de la meseta del volcán. Esta abertura dirigió las fuentes incandescentes sobre San Francisco de Sales, Calderas, El Cedro, Mesías Altas y Bajas situadas a 5 y 10 kilómetros en el flanco oeste y noroeste, el material balístico y bombas incandescentes encontradas en las aldeas provenientes de la erupción fueron de 10 a 15 centímetros de diámetro, también ceniza con espesores entre 10 y 20 centímetros, estos proyectiles y la ceniza aunada a la lluvia de la temporada ocasiono el colapso del 95 por ciento de los techos de zinc.

Figura 12. **Colapso y daños en techos de viviendas aledañas al volcán de Pacaya**



Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

Otro factor que influyó a aumentar la cantidad de daños en los municipios afectados fue la lluvia, ya que Guatemala se encontraba en época de invierno, lo cual contribuyó al daño de caminos, colapso de sistemas pluviales y de aguas servidas, daños en techos de viviendas y así como daños en vehículos. Debido a esta precipitación de tefra, durante los días de la erupción volcánica fue cerrado por 6 días el aeropuerto Internacional la Aurora.

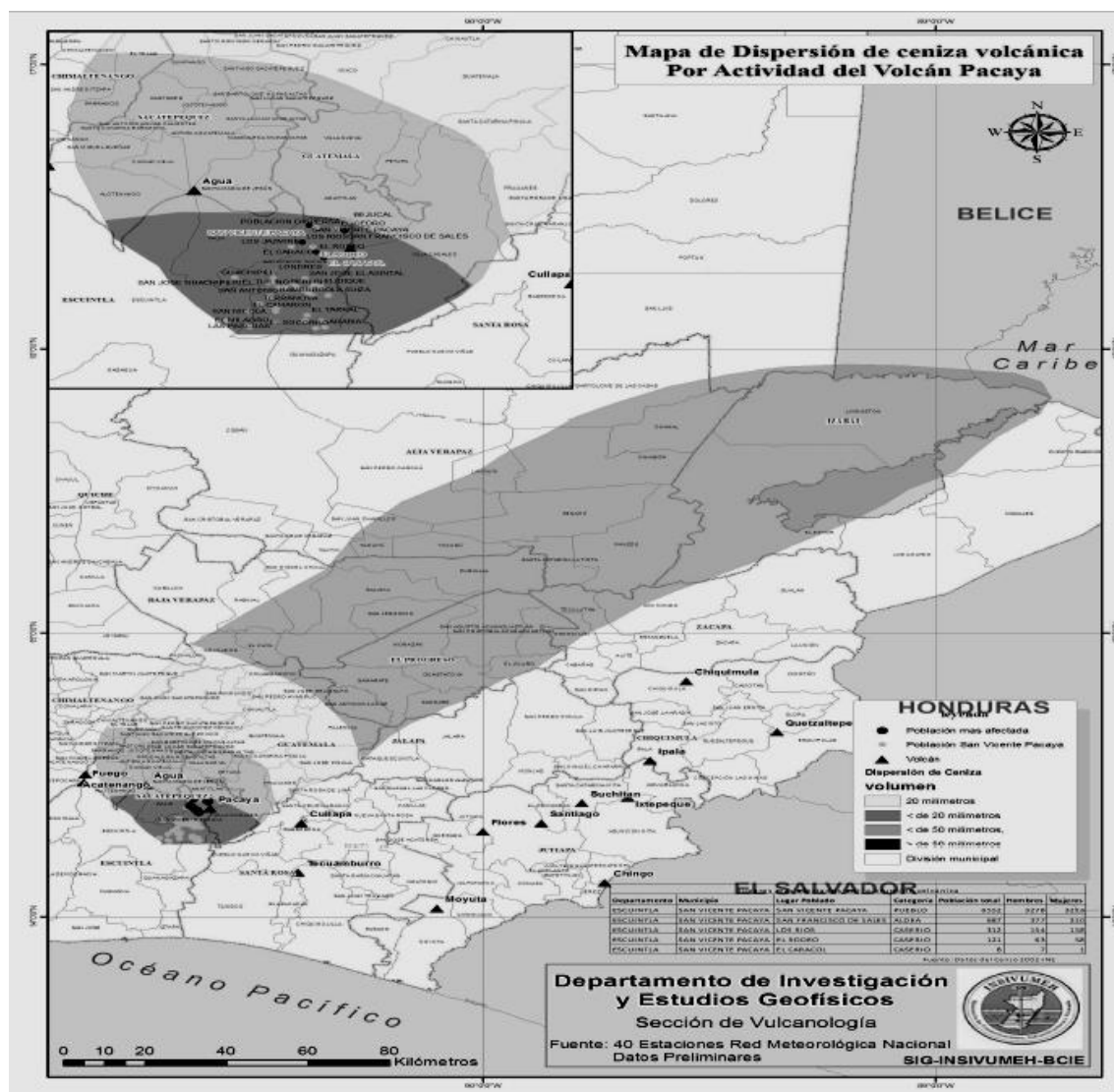
Figura 13. **Daños ocasionados en la pista y aeronaves del aeropuerto internacional La Aurora**



Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

La ceniza se dispersó en dirección norte del volcán, en las erupciones del 27 y 28 de mayo de 2010, esta fue arrastrada a 300 kilómetros del conducto principal sobre la ciudad capital, Amatitlán, Villa Canales, Villa Nueva, Boca del Monte, San Miguel Petapa, así mismo en los departamentos de Cobán, parte de Puerto Barrios y parte del Petén.

Figura 14. Mapa de dispersión de ceniza volcánica del volcán de Pacaya



Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

3. GENERALIDADES DEL CEMENTO

3.1. Reseña histórica del cemento

El origen del cemento es tan antiguo, como la humanidad ya que la necesidad que ha tenido el hombre de construir su propio hábitat, así como las estructuras necesarias para su progreso, ha constituido el factor principal en la búsqueda de materiales para esta finalidad.

Su nombre primitivo, o mejor dicho su origen viene de la ceniza calcinada, el cual era observado porque en la noche el hombre armaba fuegos, al quedar la ceniza calcinada y mezclada con la lluvia nocturna, se endurecía, la cal común se obtiene al calcinar la piedra caliza, la diferencia entre la cal común y la cal hidráulica radica en que la cal común se endurece en presencia de monóxido de carbono (CO) contenido en el aire, y por lo tanto no puede ocurrir bajo el agua; la cal hidráulica por proceder de calizas impuras, se endurece por la reacción que se produce entre los elementos constitutivos, lo cual permite que su fraguado pueda darse bajo agua; de ahí procede el nombre de cal hidráulica.

Los egipcios usaron el yeso además de la cal. Tanto los romanos como los griegos mezclaban cal con cenizas volcánicas o con tejas de arcillas quemadas, obteniendo un material de condiciones muy superiores a los de la cal común. La sílice activa y la alúmina que se encuentran en las cenizas y en las tejas con la cal para producir lo que es conocido como cemento puzolánico, proveniente del nombre de Puzzuoli ciudad que queda en el golfo de Nápoles, Italia, cerca del Vesubio, en este sitio los romanos extraían el material volcánico que mezclaban con la cal, estos utilizaron este cemento para construir el coliseo de Roma y el *Pont du Gard*. Los griegos obtenían estos materiales en la isla Santorin.

En la edad media hubo una disminución general en la calidad y uso del cemento. En 1756 Jhon Smeaton encontró que el mejor mortero se obtenía cuando se mezclaba puzolana con caliza que contenía una alta cantidad de material arcilloso, Smeaton fue el primero en conocer las propiedades químicas de la cal hidráulica. Posteriormente en 1824, Jhosep Aspin conoció los estudios de Smeaton y continuó las investigaciones llegando a obtener un material que al mezclarlo con el agua reaccionaba, dando lugar al endurecimiento de la pasta producida. Este material endurecido presentaba un aspecto similar al de unas piedras de construcción extraídas en Inglaterra, en la localidad de Portland.

El prototipo del cemento moderno fue obtenido en 1845 por Isaac Johnson, quien quemó una mezcla de arcilla y caliza hasta la formación del clínker. En general el cemento Portland, concebido originalmente por la semejanza de color y calidad entre el cemento fraguado y la piedra de portland, éste cemento se ha conservado en nuestros días para describir un cemento obtenido en la mezcla minuciosa de materiales calcáreos y arcillosos y otros materiales que contienen sílice, alúmina y quemándolos a una temperatura da la formación del clínker.

3.2. Cemento

El cemento es un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas. Este tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua ya que con ella experimenta una reacción química llamada hidratación.

Figura 15. **Cemento Portland**



Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y control de mezclas de concreto. p. 25.

3.2.1. Elaboración del cemento

El cemento Portland se produce por la pulverización del clínker, el cual consiste en silicatos de calcio hidráulicos. El clínker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele conjuntamente con el clínker para la fabricación del producto final.

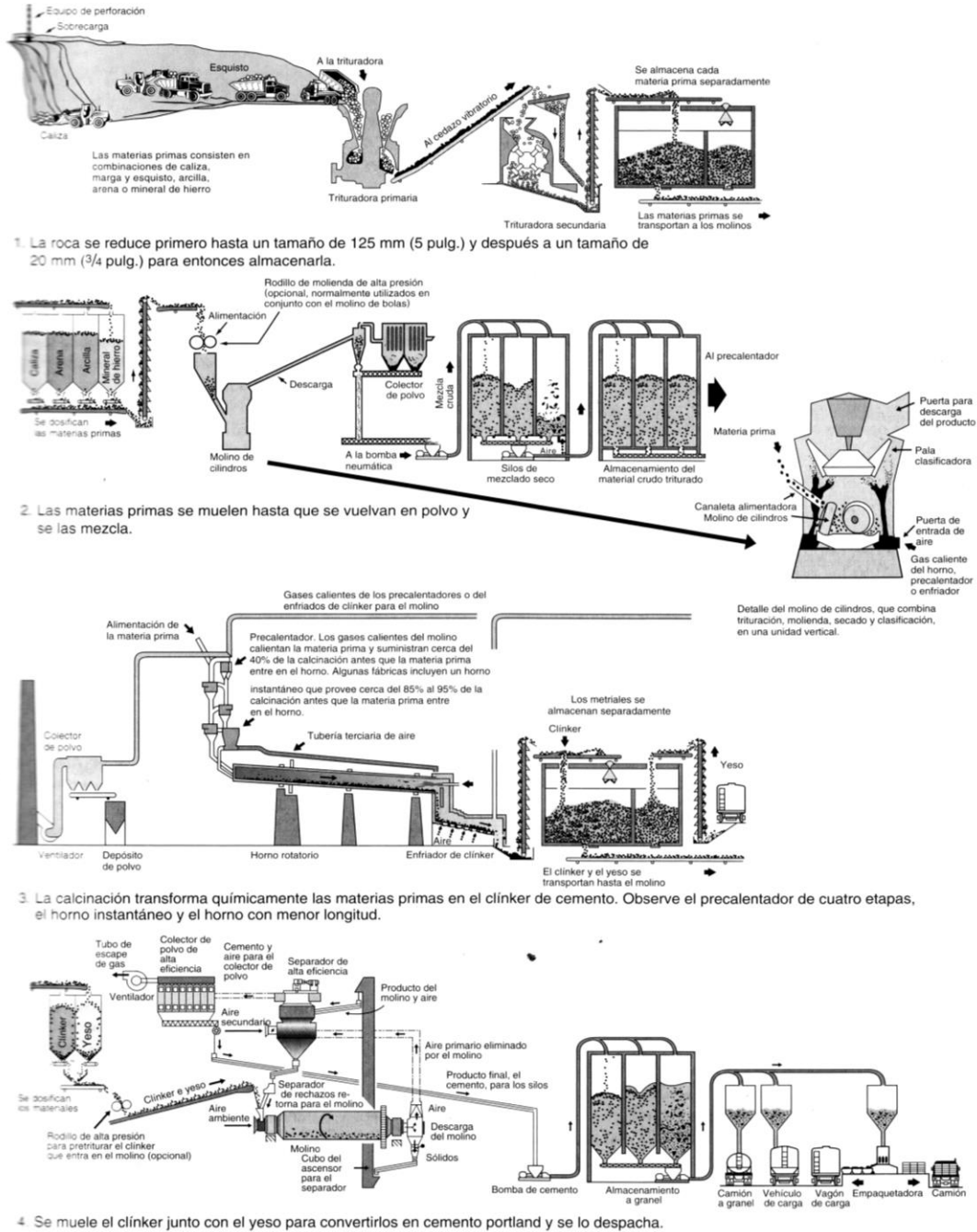
Los materiales usados para la producción del cemento Portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro. Durante la fabricación, se deben de hacer análisis químicos frecuentes de todos los materiales para garantizar una calidad alta y uniforme del cemento.

Las materias primas seleccionadas se transportan de la cantera, se trituran, muelen y dosifican de tal manera que la harina resultante tenga la composición deseada. La harina cruda es generalmente una mezcla de material calcáreo (carbonato de calcio), tal como la caliza y material arcilloso (sílice y alúmina), tal como arcilla, pizarra (esquisto) o escoria de alto horno. El cemento se fabrica tanto por vía seca como por vía húmeda. En el proceso de vía seca, las operaciones de molienda y mezcla se efectúan con los materiales secos, ya en el proceso vía húmeda los materiales se mezclan con agua en la forma de lechada.

Después del mezclado, se alimenta la materia prima molida en la parte superior del horno. La harina cruda pasa a lo largo del horno en una tasa controlada por la inclinación y la velocidad de rotación del horno. El combustible (carbón, *fuel-oil*, gas natural entre otros), se forza hacia la parte inferior del horno donde las temperaturas de 1 400 a 1 550 grados centígrados cambian químicamente el material crudo en clínker, pelotitas grises con tamaño predominante de 5 a 25 milímetros.

Después de esto, el clínker se enfría y se pulveriza. Durante esta operación, se adiciona una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado del cemento y para que se mejoren las propiedades de contracción y el desarrollo de resistencia. En el molino, el clínker se muele tan fino que puede pasar casi completamente a través de un tamiz de 45 micrómetros (malla No. 325). Este polvo gris extremadamente fino es el cemento Portland.

Figura 16. Proceso de producción del cemento Portland



Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y control de mezclas de concreto. p. 27.

Tabla II. **Fuentes de las materias primas usadas en la fabricación del cemento Portland**

Cal, CaO	Hierro Fe₂O₃	Sílice SiO₂	Alúmina Al₂O₃	Yeso o Sulfato CaSO₄ · 2H₂O
Aragonita	Arcilla	Arcilla	Mineral de aluminio	Yeso
Calcita	Mineral de hierro	Marga	Arcilla	Anhidrita
Caliza	Costras de laminado	Arena	Ceniza volante	Sulfato de calcio
Mármol	Cenizas de pirita	Esquisto	Esquisto	
Marga	Esquisto	Silicato de calcio	Bauxita	
Esquisto	Polvo de humo de fundición	Roca calcárea	Roca calcárea	
Arcilla		Ceniza volante	Escoria de cobre	
Greda		Greda	Greda	
Roca calcárea		Caliza	Caliza	
		Ceniza de arroz	Escoria	
		Arenisca	Estaurolita	
		Escoria	Granodiorita	
		Basalto		

Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y control de mezclas de concreto. p. 29.

3.2.1.1. Compuestos químicos e hidratación del cemento

En la fabricación del clinker de cemento Portland, durante la calcinación, el calcio se combina con otros componentes de la mezcla cruda para formar cuatro compuestos principales que corresponden al 90 por ciento de la masa del cemento. Durante la molienda, se añade yeso entre el 4 hasta el 6 por ciento u otra fuente de sulfato de calcio y otros auxiliares de molienda.

Dentro de la química del cemento se usan abreviaturas para describir los compuestos.

A = Al₂O₃

C = CaO

F = Fe₂O₃

H = H₂O

M = MgO

S = SiO₂

\bar{S} = SO₃

En la industria cementera se usa el término fase preferiblemente al término compuesto para describir los componentes del clínker. A continuación se describen los cuatro compuestos principales en el cemento portland, sus fórmulas químicas aproximadas y sus abreviaturas.

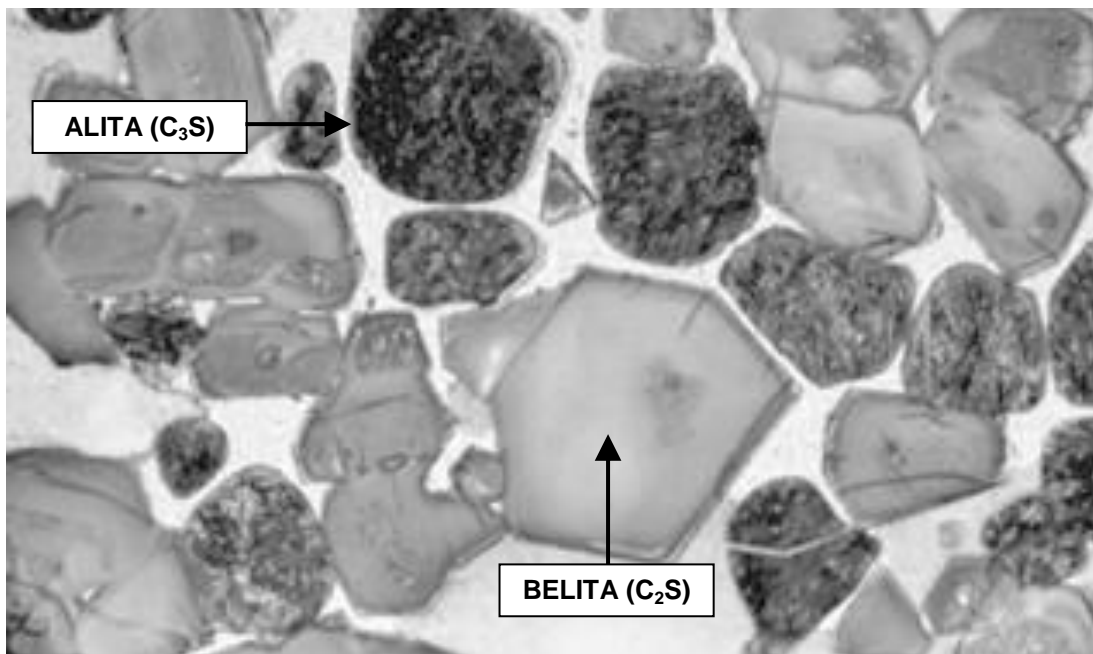
Silicato tricálcico	3CaO · SiO ₂	= C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO · SiO ₂	= C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO · Al ₂ O ₃	= C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	= C ₄ AF

A continuación se describen las formas de sulfato de calcio, sus fórmulas químicas y abreviaturas.

Sulfato de calcio anhídrido (anhidrita)	CaO · SO ₃	= CS
Sulfato de calcio dihidratado (yeso)	CaO · SO ₃ · 2H ₂ O	= $\bar{C}\bar{S}H_2$
Hemidrato de sulfato de calcio	CaO · SO ₃ · ½H ₂ O	= $\bar{C}\bar{S}H_{1/2}$

El yeso, sulfato de calcio dihidratado, es la fuente de sulfato más empleada en el cemento. El silicato tricálcico y el silicato dicálcico en el clínker se conocen como alita y belita respectivamente. La alita constituye del 50 al 70 por ciento del clínker, mientras que la belita es responsable por solo 15 a 30 por ciento. Los compuestos de aluminato constituyen aproximadamente del 5 al 10 por ciento del clínker y los compuestos de ferrita del 5 al 15 por ciento.

Figura 17. **Examen de secciones finas pulidas de clínker Portland**



Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y control de mezclas de concreto. p. 53.

En presencia de agua, estos compuestos se hidratan (se combinan químicamente con el agua) para formar nuevos compuestos, los cuales son la infraestructura de la pasta de cemento endurecida en el concreto. Los silicatos de calcio, el silicato tricálcico y el silicato dicálcico, se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado (llamado gel de tobermorita).

El cemento Portland hidratado contiene del 15 al 25 por ciento de hidróxido de calcio, aproximadamente 50 por ciento de silicato de calcio hidratado, en masa. La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente al silicato de calcio hidratado.

El ferroaluminato tetracálcico reacciona con el agua para formar ferroaluminato de calcio hidratado. El silicato tricálcico, sulfato (yeso, anhidrita u otra fuente de sulfato) y el agua se combinan para formar etringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado), monosulfato de calcio y otros compuestos afines.

Normalmente se describen los elementos como óxidos sencillos para la consistencia de las normas. Sin embargo, raramente se encuentran en el cemento en la forma de óxidos. Por ejemplo, el azufre del yeso normalmente se designa como trióxido de azufre (SO_3), sin embargo el cemento no contiene ningún trióxido de azufre. Las cantidades de calcio, sílice y alúmina establecen la cantidad de los compuestos principales en el cemento y efectivamente las propiedades del cemento hidratado. El sulfato está presente para controlar el tiempo de fraguado, bien como la contracción por secado y el aumento de resistencia.

El conocimiento actual de la química del cemento indica que los compuestos principales del cemento tienen las siguientes propiedades.

3.1.1.1.1. Silicato tricálcico (C₃S)

Se hidrata y se endurece rápidamente y es responsable, en gran parte, por el fraguado inicial y la resistencia temprana. En general la resistencia temprana del concreto del cemento portland es mayor, cuando el porcentaje de silicato tricálcico aumenta.

3.1.1.1.2. Silicato dicálcico (C₂S)

Se hidrata y se endurece lentamente y contribuye grandemente para el aumento de resistencia en edades más allá de una semana. Se caracteriza por una relativa velocidad de hidratación comparado con el silicato tricálcico.

3.1.1.1.3. Aluminato tricálcico (C₃A)

Su función es liberar una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye un poco para el desarrollo de las resistencias tempranas. Los cementos con bajos porcentajes de aluminato tricálcico resisten mejor a los suelos y aguas con sulfatos.

3.1.1.1.4. Ferroaluminato tetracálcico (C₄AF)

Es el producto resultante del uso de las materias primas de hierro y aluminio para la reducción de la temperatura de clinkerización durante la fabricación del cemento. Este compuesto contribuye muy poco para la resistencia. La mayoría de los efectos de color para la producción del cemento gris se deben al ferroaluminato tetracálcico y sus hidratos.

3.1.1.1.5. Sulfato de calcio

Como anhidra (sulfato de calcio anhidro), yeso (sulfato de calcio dihidratado) o hemidrato, comúnmente llamado de yeso de parís (sulfato de calcio hemidrato), se adiciona al cemento durante la molienda final, ofreciendo sulfato para la reacción con el aluminato tricálcico y la formación de etringita. Esto controla la hidratación del aluminato tricálcico. Sin sulfato, el fraguado del cemento sería rápido. Además del control del fraguado y del desarrollo de resistencia, el sulfato también ayuda a controlar la contracción (retracción) por secado y puede influenciar la resistencia hasta 28 días.

Tabla III. **Composición química y de los compuestos de los cemento Portland**

		Tipo de cemento portland				
		Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V
Composición química, %	SiO ₂	18,7-22,0	20,0-23,2	18,6-22,2	21,5-22,8	20,3-23,4
	Al ₂ O ₃	4,7-6,3	3,4-5,5	2,8-6,3	3,5-5,3	2,4-5,5
	Fe ₂ O ₃	1,6-4,4	2,4-4,8	1,3-4,9	3,7-5,9	3,2-6,1
	CaO	60,6-66,3	60,2-65,9	60,6-65,9	62-63,4	61,8-66,3
	MgO	0,7-4,2	0,6-4,8	0,6-4,6	1,0-3,8	0,6-4,6
	SO ₃	1,8-4,6	2,1-4,0	2,5-4,6	1,7-2,5	1,8-3,6
	Na ₂ O _{eq}	0,11-1,20	0,05-1,12	0,14-1,20	0,29-0,42	0,24-0,76
Composición potencial de los compuestos, %	C ₃ S	45,0-55,0 40,0-63,0	40,0-50,0 37,0-68,0	50,0-65,0 46,0-71,0	37,0-49,0	40,0-50,0 43,0-70,0
	C ₂ S	20,0-30,0 9,0-31,0	25,0-35,0 6,0-32,0	15,0-25,0 4,0-27,0	27,0-36,0	25,0-35,0 11,0-31,0
	C ₃ A	8,0-12,0 6,0-14,0	5,0-7,0 2,0-8,0	8,0-14,0 0,-13,0	3,0-4,0	0,0-4,0 0,0-5,0
	C ₄ AF	6,0-10,0 5,0-13,0	6,0-10,0 7,0-15,0	6,0-10,0 4,0-14,0	11,0-18,0	10,0-20,0 10,0-19,0

Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y control de mezclas de concreto. p. 55.

3.2.2. Definición natural

Es cualquier material aglomerante, aglutinante capaz de unir fragmentos de propiedades físicas diferentes. Entre estos se tienen a las calizas naturales calcinadas.

3.2.3. Definición química

Es un compuesto con propiedades adhesivas que tiene la capacidad de unir fragmento en forma sólida o en forma líquida. En esta categoría se tiene el cemento duco, acrílico (pegadit), la cal y el cemento asfáltico (asfalto).

3.2.4. Definición de ingeniería

Es un producto que está hecho básicamente de la combinación de un material calcáreo (piedra caliza y yeso) y una base de sílice y alúmina (arcilla y esquisto), pulverizada y expuestas a grandes temperaturas por medio de un proceso de horneado, con adición de yeso que al entrar en contacto con el agua, desarrolla la capacidad de unir fragmentos de grava y arena, para formar un sólido único o piedra artificial.

3.3. Tipos de cementos según normas ASTM

Dentro de la industria cementera existen variedades de cementos los cuales se definen en las normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM), siendo estos los más importantes.

3.3.1. Cemento hidráulico

Es un cemento finamente pulverizado que tiene la propiedad de fraguar, endurecer y desarrollar resistencia por reacción química con el agua, puede ser utilizado tanto para obras en la superficie como bajo el agua.

3.3.1.1. Tipos de cementos hidráulicos

La Norma ASTM C-1157, especificaciones de norma para el desempeño del cemento hidráulico *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*, menciona 7 tipos de cementos siendo estos.

3.3.1.1.1. Tipo GU, para uso general en la construcción

Este cemento es adecuado para toda clase de obras, pequeñas, medianas o grandes, donde no se requieran otros tipos de cementos con propiedades especiales. Su uso en concreto incluye, pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tubería, productos de concreto prefabricado y otras aplicaciones donde se usa el cemento tipo I.

3.3.1.1.2. Tipo HE, alta resistencia temprana

Este cemento se utiliza para obras especiales de concreto simple, reforzado y pre esforzado de endurecimiento rápido y altas resistencias iniciales. Para la prefabricación liviana y de elementos estructurales y cuando se requiere desencofrado y desmoldado rápido. Este cemento se usa de la misma manera que el cemento portland tipo III.

3.3.1.1.3. Tipo de MS, moderada resistencia a los sulfatos

Este cemento se emplea donde sean importantes las precauciones contra el ataque moderado por los sulfatos, como en estructuras de drenaje, terrenos que contienen sulfatos, estructuras en aguas marinas o en ambientes marinos donde las concentraciones de sulfatos de calcio, sodio y magnesio son mayores que lo normal, pero estas no llegan a ser severas. Este cemento se usa de la misma manera que el cemento tipo II.

3.3.1.1.4. Tipo HS, alta resistencia a los sulfatos

Este cemento se usa en concreto expuesto a la acción severa de los sulfatos, principalmente donde el suelo o el agua subterránea tienen altas concentraciones de sulfato. Este cemento se emplea de la misma manera que el cemento portland tipo V.

3.3.1.1.5. Tipo MH, moderado calor de hidratación

Este cemento se usa donde el concreto necesite tener un calor de hidratación moderado y se deba controlar el aumento de temperatura, por ejemplo obras de concreto masivo susceptibles de fuertes retracciones por variaciones térmicas y peligro de fisuración (presas, estribos, cimentaciones, muros gruesos y grandes losas) y obras de concreto normal en ambientes muy calurosos. Este cemento se emplea de la misma manera que el cemento portland de moderado calor tipo II.

3.3.1.1.6. Tipo LH, bajo calor de hidratación

Este cemento se usa donde la tasa y la cantidad del calor generado por la hidratación deban ser minimizadas. Este desarrolla resistencia en una tasa más lenta que los otros cementos. También se debe usar en estructuras de concreto masivo donde se deba minimizar el aumento de la temperatura resultante del calor generado durante el endurecimiento. Se usa de la misma manera que el cemento Portland tipo IV.

3.3.1.1.7. Tipo opción R, baja reactividad con agregados álcali-reactivos

Este cemento es empleado cuando un concreto se somete a una reactividad con agregados potencialmente álcali-reactivos. La característica principal de este cemento, es su bajo contenido en álcalis, menores al 0,60 por ciento

3.3.2. Cemento Portland

El cemento Portland es llamado así puesto que tiene un parecido con una piedra natural que se encuentra en Inglaterra, precisamente en la isla de Portland, es un cemento producido por la pulverización del clínker, consistente esencialmente de silicatos de calcio cristalinos hidráulicos, y que usualmente contienen uno o más de los siguientes ingredientes: agua, sulfato de calcio hasta 5 por ciento de caliza y otros componentes minerales minoritarios y aditivos de proceso; este cemento es capaz de desarrollar todas sus propiedades en presencia del agua como son el fraguado y endurecimiento.

3.3.2.1. Tipos de cementos Portland

La norma ASTM C-150, especificaciones de norma para el cemento portland *Standard Specification for Portland Cement*, menciona 8 tipos de cementos siendo estos.

3.3.2.1.1. Tipo I

Para uso general, apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias. Sus empleos en concreto incluyen pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tanques, embalses, tubería, unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado y precolado. No se imponen límites en ninguno de los cuatro compuestos principales.

3.3.2.1.2. Tipo IA

Sus características son similares al tipo I, se utiliza en obras donde se desea la incorporación de aire (por ejemplo, para elaborar concreto resistente al congelamiento).

3.3.2.1.3. Tipo II

Se usa donde sean necesarias precauciones contra el ataque por sulfatos o un moderado calor de hidratación. Se le puede utilizar en estructuras normales o miembros expuestos a suelos o agua subterránea, donde la concentración de sulfatos sea más alta que la normal pero no severa. Puesto que el aluminato tricálcico y el silicato tricálcico producen altos calores de hidratación, la especificación limita al contenido de aluminato tricálcico de cemento un máximo de 8 por ciento y tiene un límite opcional máximo de 58 por ciento en la suma de silicato tricálcico y aluminato tricálcico.

3.3.2.1.4. Tipo IIA

Sus características son similares al tipo II, se utiliza en obras expuestas a suelos y aguas sulfatadas, donde la concentración de sulfatos sea más alta que la normal, pero no severa, con la incorporación de aire.

3.3.2.1.5. Tipo III

Este ofrece resistencia a edades tempranas, normalmente una semana o menos. Este es química y físicamente similar al cemento tipo I, a excepción de que sus partículas se muelen más finamente. Es usado cuando se necesita remover los encofrados lo más rápido posible. Para asegurar que la alta resistencia no se debe principalmente a los productos de hidratación del aluminato tricálcico, la especificación limita su contenido a un máximo de 15 por ciento.

3.3.2.1.6. Tipo IIIA

Sus características son similares al tipo III, se utiliza en estructuras que necesitan resistencias a edades tempranas, normalmente una semana o menos pero con la incorporación de aire.

3.3.2.1.7. Tipo IV

Se utiliza donde se debe minimizar la tasa y la cantidad de calor generado por la hidratación. Por lo tanto, desarrolla la resistencia en una tasa más lenta que otros tipos de cemento. Se puede usar el cemento tipo IV en estructuras de concreto masivo, tales como grandes presas por gravedad, donde la subida de temperatura derivada del calor generado durante el endurecimiento deba ser minimizada.

Dado que el silicato tricálcico y el aluminato tricálcico producen alto calor de hidratación, pero el silicato dicálcico produce mucho menos calor, se fijan límites máximos de 35 y 7 por ciento de silicato tricálcico y el aluminato tricálcico respectivamente y un mínimo del 40 por ciento de silicato dicálcico en el cemento.

3.3.2.1.8. Tipo V

Se utiliza en concretos expuestos a la acción severa de sulfatos, principalmente donde el suelo y el agua subterránea tienen alta concentración de sulfatos. Su desarrollo de resistencia es más lento que el tipo I, este no es resistente a ácidos y a otras sustancias altamente corrosivas. La especificación fija un límite máximo de 5 por ciento de aluminato tricálcico, que se aplica cuando las pruebas de expansión por sulfato no se requieren.

3.3.3. Cemento hidráulico adicionado

Es un cemento consistente de dos o más ingredientes inorgánicos (al menos uno de los cuales no es cemento portland o clínker portland), que separadamente o combinados contribuyen a las propiedades de desarrollo o ganancia de resistencia del cemento, con o sin otros ingredientes, aditivos de proceso o aditivos funcionales. Los cementos hidráulicos adicionados pueden ser producidos por molienda uniforme y conjunta o por la mezcla de dos o más tipos de materiales finos, los materiales principales son cemento, escoria de alto horno, ceniza volante, humo de sílice, arcilla calcinada, otras puzolanas, cal hidratada y otras combinaciones premezcladas de estos materiales.

3.3.3.1. Tipos de cementos hidráulicos adicionados

La norma ASTM C-595, especificaciones de norma para cemento hidráulico mezclado *Standard Specification for Blended Hydraulic Cement*, menciona 5 tipos de cementos siendo estos.

3.3.3.1.1. Tipo IS, cemento Portland alto horno

Es un tipo de cemento que se puede utilizar para la construcción en concreto en general. El uso histórico de cementos mezclados con escorias data a inicios del siglo XX en Europa, Japón, y América del Norte. En la realización de estos cementos la escoria granulada de alto horno se muele juntamente con el clinker del cemento portland o se le muele separadamente y se la mezcla con el cemento portland. El contenido de escoria de alto horno en este cemento debe estar entre 25 y 70 por ciento de la masa del cemento. Se puede especificar el tipo IS con aire incluido (A), moderada resistencia a los sulfatos (MS) o moderado calor de hidratación (MH).

3.3.3.1.2. Tipo IP y tipo P, cemento Portland puzolánico

Los cementos portland puzolánicos se designan como tipo IP el cual se puede usar para la construcción en general y el tipo P se usa en construcciones que no requieran altas resistencias iniciales. Estos cementos se fabrican a través de la molienda conjunta del clinker de cemento portland con una puzolana adecuada, o por el mezclado de cemento portland o cemento de alto horno con puzolana, o por la combinación de la molienda y del mezclado. El contenido de puzolana de estos cementos debe estar entre 15 y 40 por ciento de la masa del cemento.

Se puede especificar el tipo IP con aire incluido (A), moderada resistencia a los sulfatos (MS) o moderado calor de hidratación (MH), así mismo se puede especificar el tipo P con bajo calor de hidratación (LH), moderada resistencia a los sulfatos (MS) o aire incorporado (A).

3.3.3.1.3. Tipo I (PM), cemento Portland modificado con puzolana

Estos cementos se utilizan en construcciones de concreto en general. El cemento se fabrica con la combinación del cemento portland de alto horno y una puzolana fina, esta combinación se puede lograr por el mezclado del cemento portland con la puzolana, el mezclado del cemento portland de alto horno con la puzolana, la molienda conjunta del cemento portland y de la puzolana o la combinación de la molienda y el mezclado. El contenido de puzolana de estos cementos debe ser menor al 15 por ciento de la masa del cemento. Se puede especificar el tipo I (PM) con aire incluido (A), moderada resistencia a los sulfatos (MS) o moderado calor de hidratación (MH).

3.3.3.1.4. Tipo S, cemento de escoria de alto horno o siderúrgico

Este tipo de cemento de escoria de alto horno, se usa con el cemento portland, se usa en la fabricación de concreto o con cal hidratada en la fabricación de mortero de albañilería, pero no se le debe de emplear separadamente en concreto estructural. El cemento de escoria se produce por el mezclado de la escoria granulada de alto horno y el cemento portland, el mezclado de la escoria granulada de alto horno con la cal hidratada o mezclado. El contenido mínimo de escoria es del 70 por ciento de la masa del cemento. Únicamente se puede especificar el tipo S con aire incluido (A).

3.3.3.1.5. Tipo I (SM), cemento Portland modificado con escoria

El cemento portland modificado con escoria, tipo I (SM), se usa para construcciones de concreto en general. Este cemento se fabrica por molienda conjunta del clínker de cemento portland con la escoria granulada de alto horno finamente molida y su combinación finalmente. El contenido de escoria de estos cementos debe ser menor al 25 por ciento de la masa del cemento. Se puede especificar el tipo I (SM) con aire incluido (A), moderada resistencia a los sulfatos (MS) o moderado calor de hidratación (MH).

3.3.4. Cemento de albañilería y morteros

Los cementos de albañilería y de morteros son cementos hidráulicos diseñados para que se empleen en morteros en la construcción de mampostería. Consisten en una mezcla de cemento portland, cemento hidráulico adicionado y materiales plastificantes (tales como caliza o cal hidratada), junto con otros materiales introducidos para mejorar una o más propiedades, tales como tiempo de fraguado, trabajabilidad, retención de agua y durabilidad.

Los cementos de albañilería satisfacen los requisitos de la Norma ASTM C-91 especificación estándar para cemento de albañilería *Standard Specification for Masonry Cement*, mientras los cementos de morteros satisfacen los requisitos de la Norma ASTM C-1329 especificación estándar para cemento de mortero *Standard Specification for Mortar Cement*.

3.3.5. Cementos plásticos

El cemento plástico consiste en una mezcla de cemento portland, cemento adicionado y materiales plastificantes tales como caliza, cal hidratada, cal hidráulica, conjuntamente con materiales introducidos para la mejoría de una o más propiedades como tiempo de fraguado, trabajabilidad, retención de agua y durabilidad. El cemento plástico es un cemento hidráulico que satisface a los requisitos de la Norma ASTM C-1328 especificación estándar para cemento plástico (estuco) *Standard Specification for Plastic (Stucco) Cement*. Se le usa para la preparación de revoques y estucos a base de cemento portland que satisface la Norma ASTM C-926 *Standard Specification for Application of Portland Cement-Based Plaster*.

3.3.6. Cementos finamente molidos

También llamados cementos ultra finos, son cementos hidráulicos los cuales se muelen muy finamente para usarlos en selladura de suelos finos o fisuras muy finas de rocas. Las partículas de cemento son más pequeñas que 10 micrómetros de diámetro y 50 por ciento de las partículas son menores que 5 micrómetros. Estos cementos muy finos consisten en cemento portland, escoria granulada de alto horno y adiciones minerales.

3.3.7. Cementos expansivos

Es un cemento hidráulico que se expande ligeramente durante el inicio del período de endurecimiento, después del fraguado. Este cemento debe estar de acuerdo con los requisitos de la Norma ASTM C-845 especificación estándar para el cemento hidráulico expansivo *Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement*, en la cual está designado como el tipo E-1.

Actualmente se reconocen tres variedades de cementos expansivos, llamadas de K, M y S., las cuales se añaden como sufijo al tipo. El E-1(K) contiene cemento portland, trisulfoaluminato tetracálcico, sulfato de calcio y óxido de calcio no combinado (cal). El tipo E-1(M) contiene cemento portland, cemento de aluminato de calcio y sulfato de calcio. El tipo E-1 (S) contiene cemento portland con alto contenido de aluminato tricálcico y sulfato de calcio.

3.3.8. Cementos para pozos petroleros (petrolíferos)

Estos cementos son usados para sellar pozos de petróleo, también llamados de cementación de pozos petroleros, se fabrican normalmente con clínker de cemento portland o de cementos hidráulicos adicionados. Estos cementos generalmente, deben tener tiempo de fraguado lento y deben ser resistentes a altas temperaturas y presiones. La especificación para cementos y materiales para selladura de pozos de la *American Petroleum Institute* (API), incluye requisitos para ocho clases de cementos para pozos (clase A hasta la H) y tres grados (grado O, común; MSR, moderada resistencia a los sulfatos y HSR, alta resistencia a los sulfatos). Cada clase se aplica para el uso hasta una cierta gama de profundidades del pozo, temperaturas, presiones y ambientes sulfatados.

3.3.9. Cementos con adiciones funcionales

Las adiciones funcionales se pueden moler con el clínker de cemento para modificar las propiedades del cemento hidráulico. Estos cementos se pueden utilizar en construcciones de concreto normales o especiales, cimentaciones y otras aplicaciones.

Estas adiciones deben cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C-226 especificación estándar para adiciones con incorporador de aire para su uso en la fabricación de cemento hidráulico incorporador de aire, *Standard Specification for Air-Entraining Additions for Use in the Manufacture of Air-Entraining Hydraulic Cement*, y la Norma ASTM C-688 especificación estándar para funciones adicionales para el uso de cementos hidráulicos, *Standard Specification for Functional Additions for Use in Hydraulic Cements*. La Norma ASTM C-226 indica la adición de inclusor de aire, mientras que la Norma ASTM C-688 indica las siguientes adiciones: reductores de agua, retardantes, acelerantes, reductores de agua y retardadores, reductores de agua y aceleradores y adiciones para control del fragüe.

3.3.10. Cementos repelentes de agua

Algunas veces se llaman cementos impermeables, se producen normalmente con la adición al clínker de pequeñas cantidades de aditivos repelentes de agua, tales como estearato (sodio, aluminio y otros) durante la molienda final. Se fabrican tanto en color blanco como en color gris, los cementos repelentes al agua reducen la transmisión de agua por capilaridad cuando hay poco o ninguna presión pero no paran la transmisión de vapor de agua. Se usan en morteros para baldosas y azulejo, pinturas y revestimiento final en estuco.

3.3.11. Cementos de fraguado regulado

Son cementos hidráulicos de fluoraluminato de calcio que se pueden formular y controlar para la producción de concreto con tiempo de fraguado que varíen de pocos minutos hasta una hora y con correspondiente desarrollo rápido de la resistencia. Este es un cemento a base de cemento portland con adiciones funcionales y que se puede producir por el mismo horno usado en la fabricación convencional del cemento portland.

El cemento de fraguado regulado incorpora componentes de control de fraguado y de desarrollo de resistencia a las edades tempranas. Las propiedades físicas finales del concreto resultante son en su mayoría similares a las de los concreto portland comparables.

3.3.12. Cementos de geopolímeros

Son cementos hidráulicos inorgánicos que se basan en la polimerización de minerales. El término se refiere más específicamente a cementos alúmino-silicato activados por álcalis, también llamados cementos zeolíticos o polisialato. Se les han usado para la construcción en general, aplicaciones de concreto de alta resistencia inicial y estabilización de desechos. Estos cementos no contienen polímeros orgánicos o plásticos.

3.3.13. Cementos de etringita

Estos son cementos de sulfoaluminato de calcio que se formulan especialmente para aplicaciones especiales, tales como la estabilización de materiales de desecho. Se pueden formular con grandes cantidades de etringita para la estabilización de iones metálicos específicos a lo largo de la estructura de la etringita. También se los han empleado en aplicaciones de fraguado rápido, incluyendo su uso en minas de carbón.

3.3.14. Cementos de endurecimiento rápido

El cemento hidráulico de endurecimiento rápido, alta resistencia inicial, se usa en construcciones tales como pavimentos de rápida habilitación al tránsito (*fast track*), donde el desarrollo rápido de resistencia se hace necesario (aproximadamente 4 horas). Estos cementos normalmente usan sulfoaluminato de calcio para la obtención de la resistencia temprana.

3.3.15. Cementos de aluminato de calcio

Este cemento no tiene como base el cemento portland. Se le utiliza en aplicaciones especiales para desarrollo rápido de resistencia (resistencia de diseño en un día), resistencia a altas temperaturas y resistencia a los sulfatos, ácidos débiles y agua de mar. La combinación del cemento portland y del cemento de aluminato de calcio se ha empleado para la preparación de concretos y morteros de fraguado rápido. Las aplicaciones típicas de los concretos con cementos de aluminato de calcio incluyen: pisos industriales con resistencia química, resistencia a altas temperaturas y resistencia a corrosión; revestimientos refractarios moldeados y reparación.

3.3.16. Cementos de fosfato de magnesio

Es un cemento de fraguado rápido y alta resistencia inicial. Se le utiliza normalmente en aplicaciones especiales, tales como reparación de pavimentos y estructuras de concreto o por ejemplo en ciertos productos químicos. Este cemento no contiene cemento portland.

3.3.17. Cementos blancos o coloreados

El cemento blanco es producido pulverizando un clínker blanco de cemento portland. El color gris del clínker del cemento portland ordinario se debe generalmente a la presencia de hierro. Los cementos coloreados se dividen en dos grupos: la mayoría se derivan de la adición de pigmentos al cemento blanco, pero otros son producidos con clínker que tienen el color correspondiente.

Así, disminuyendo el contenido de hierro del clínker, se pueden producir cementos ligeramente coloreados. Cuando el hierro total en el clínker corresponde a menos de 0,5 por ciento de óxido férrico (Fe_2O_3) y el hierro es retenido en estado iónico (Fe^{2+}), el clínker es generalmente blanco. Estas condiciones son logradas en la elaboración del cemento usando arcilla libre de hierro y roca de carbonato como materias primas, así como molinos de bola especiales con cubiertas de cerámica y bolas para moler la mezcla prima y combustible limpio tal como el petróleo o el gas, para la producción del clínker en un ambiente reducido en la zona de alta temperatura del horno rotatorio de cemento.

En consecuencia los cementos blancos son aproximadamente tres veces más costosos que el cemento portland normal.

4. GENERALIDADES DE LOS AGREGADOS

4.1. Formación de las rocas

En el proceso de formación de las rocas existen eventos geológicos que constituyen el origen de los minerales, se agrupan en la forma de masas consistentes y adquieren la forma, composición y las propiedades de las rocas, así como se presentan en la corteza terrestre. Estos eventos geológicos se producen en el interior y exterior de la corteza terrestre, y así poder clasificar las rocas en tres grupos importantes: ígneas o magmáticas, sedimentarias y metamórficas.

4.2. Clasificación de las rocas

Las rocas según el origen y naturaleza de su formación, se dividen en tres grupos; rocas ígneas o magmáticas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas; aunque puede considerarse aparte una clase de rocas de alteración, que se estudian a veces entre las sedimentarias.

4.2.1. Rocas ígneas o magmáticas

Estas se constituyen de material fundido (magma) que se ha enfriado y solidificado. Son de estructuras cristalinas o vítreas, o en algunas ocasiones combinadas dependiendo de la velocidad de enfriamiento.

En este grupo se distinguen dos tipos de rocas de acuerdo al proceso de enfriamiento del magma: extrusivas e intrusivas.

Figura 18. **Rocas ígneas**



Fuente: <http://www.jmarior.net/piedras-igneas/>. Consulta: 12 de septiembre de 2012.

4.2.1.1. Rocas extrusivas

Son formadas sobre la superficie terrestre, durante una actividad volcánica o actividad geológica similar. Esta roca tiene una apariencia y estructura vidriosa, debido a que el material se enfría rápidamente.

4.2.1.2. Rocas intrusivas

Son formadas por el magma que queda atrapado en las propiedades de la corteza terrestre. Al ser atrapado el magma endurece y enfría lentamente, y en consecuencia las rocas ígneas son cristalinas en estructura y apariencia.

4.2.2. Rocas sedimentarias

Se forman como resultado de la sedimentación de productos de meteorización y descomposición de diferentes rocas, la precipitación química y mecánica del agua y la actividad biológica de las plantas.

Las rocas sedimentarias se encuentran característicamente en capas (estratos), dentro de la corteza terrestre, y en los depósitos de partículas finas, generalmente sedimentados sobre el fondo de lagos o mares antiguos.

La calidad de las rocas sedimentarias es afectada por el grado de consolidación, cementación, laminación y contaminación.

Figura 19. Rocas sedimentarias



Fuente: <http://www.ucm.es/info/diciex/programas/las-rocas/tiposderocas/sedimentarias.html>.

Consulta: 12 de septiembre de 2012.

4.2.3. Rocas metamórficas

Son generalmente rocas ígneas y sedimentarias, formadas a profundidad, bajo gran presión y temperatura; así como de otros procesos geológicos, físicos y químicos, han sufrido una transformación de estructura inicial por la organización de sus cristales, dando origen a las rocas metamórficas.

Las rocas metamórficas presentan un rasgo característico: los minerales están alineados en capas o planos paralelos. Si se parte la roca en el sentido de sus planos es mucho más fácil que en otras direcciones. Las rocas que exhiben este tipo de estructura se denominan foliadas. Aunque no todas las metamórficas son foliadas.

Figura 20. Rocas metamórficas



Fuente: <http://www.ucm.es/info/diciex/programas/las-rocas/tiposderocas/metamorficas.html>.

Consulta: 12 de septiembre de 2012.

Tabla IV. Ejemplos de rocas según origen y naturaleza de su formación

Rocas Ígneas	Rocas sedimentarias	Rocas metamórficas
Granito	Conglomerado	Mármol
Sienita	Arenisca	Metacuarcita
Diorita	Cuarcita	Pizarra
Gabro	Grauvaca	Filita
Periodita	Arcosa	Esquisto
Pegmatita	Piedra arcillosa	Anfibolita
Vidrio volcánico	Limonita	Hornfels
Obsidiana	Argilita	Gneis
Piedra pómez	Carbonatos	Serpentinita
Toba volcánica	Caliza dolomita	
Cagafierro	Marga	
Perlita	Chert	
Felsita	Greda	
Basalto		

Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. p. 104.

4.3. Definición de agregado

Son aquellos materiales pétreos resultantes de la desintegración natural y desgaste de las rocas o que se obtienen mediante la trituración de rocas, con forma, y distribución de tamaños apropiados.

4.4. Propiedades de los agregados

El estudio de las rocas es importante desde el punto de vista geológico, industrial y geotécnico, para conocer y/o analizar su procedencia, componentes minerales, textura y estructura, de las cuales se puede deducir su historia y el ambiente en donde se formaron. Desde el punto de vista geotécnico es preciso saber características importantes, como son el grado de alteración al que las rocas serán sometidas, resistencia, desgaste, impacto, entre otras; sobre todo en obras civiles de gran magnitud.

4.5. Clasificación de los agregados

Para el estudio de los materiales pétreos desde su punto de vista geológico, los agregados se clasifican en cuatro; siendo estos: por su origen, tamaño, densidad y forma.

4.5.1. Según su origen

Dentro del ámbito de la construcción, los agregados pétreos según su origen dentro de la corteza terrestre se dividen en agregados pétreos naturales y agregados pétreos artificiales.

4.5.1.1. Agregados naturales

Son los que se encuentran en la corteza terrestre, y se forman a partir de procesos naturales que involucran presión, temperatura, meteorización, erosión. A través de estos procesos se obtiene los agregados tradicionales como arena y grava.

4.5.1.2. Agregados artificiales

Son los que provienen de la trituración de piedras de cantera o piedras de canto rodado, a través de un proceso industrial. De igual forma que los agregados naturales, por medio de estos procesos se obtienen agregados pétreos.

4.5.2. Según su tamaño

Por su uso en las mezclas de concreto, los agregados atendiendo al volumen de sus partículas, se clasifican en 2 ramas: agregados finos y agregados gruesos.

4.5.2.1. Agregados finos

Lo constituyen materiales de partículas muy pequeñas, generalmente son llamadas arenas. Se clasifica como agregado fino el material que pasa por el tamiz No. 4 (4,75 milímetros) y se retiene en el tamiz No. 200 (75 micrones).

4.5.2.2. Agregados gruesos

Son aquellos agregados en los cuales sus partículas se retienen en el tamiz No. 4. Lo constituyen materiales de partículas grandes, son generalmente llamados piedrines o gravas.

Figura 21. **Agregado fino**



Fuente: área de prefabricados. CII/USAC.

Figura 22. **Agregado grueso**



Fuente: área de prefabricados. CII/USAC.

4.5.3. Según su densidad

De acuerdo a la densidad de sus partículas, los agregados pétreos se pueden clasificar en 3 ramas: agregados ligeros, agregados normales y agregados pesados.

4.5.3.1. Agregados ligeros

Son aquellos agregados pétreos cuya densidad está entre 500 a 1 000 kilogramos sobre metro cúbico, se utilizan en concreto de relleno o en mampostería estructural.

4.5.3.2. Agregados normales

Son aquellos agregados pétreos cuya densidad está entre 1 300 a 1 600 kilogramos sobre metro cúbico, se utilizan en concretos de uso tradicional como columnas, vigas, losas, pavimentos entre otros.

4.5.3.3. Agregados pesados

Son aquellos agregados pétreos cuya densidad está entre 3 000 a 7 000 kilogramos sobre metro cúbico, se utilizan en concretos pesados, como centrales nucleares o usos especiales.

4.5.4. Por su forma

Los agregados pétreos, atendiendo la forma de sus partículas, así como su medio de obtención se clasifican en 3 ramas: canto rodado, triturado y mixto.

4.5.4.1. Agregados de canto rodado

Son los agregados provenientes de cauces de ríos, lagos o del lecho marino, también llamados agregados naturales. Una característica de estos agregados es su forma redondeada.

4.5.4.2. Agregados triturados

Son los agregados provenientes de canteras o ríos, los cuales se han triturado en una máquina de trituración. Una característica de estos agregados, es su forma angular.

4.5.4.3. Agregados mixtos

Son agregados que resultan de la combinación de agregados de canto rodado y agregados triturados. Una característica de estos agregados, es su forma redondeada con caras fracturadas.

4.6. Normas aplicables para la caracterización de los agregados

En la siguiente tabla se describen las propiedades a estudiar y las normas aplicables para agregados, así como una descripción de la importancia de las mismas.

Tabla V. **Ensayos realizados a los agregados**

Ensayo	Significado e importancia	Normas Aplicables
Muestreo de agregados	Mostrar de manera efectiva la naturaleza y las condición de los materiales que lo representan	ASTM D-75
Reducción de muestra	Reducción de muestra para prueba	ASTM D-702
Peso específico y absorción	Cálculo de volumen ocupado por el agregado en mezclas que contienen agregados. Densidad de las partículas que no incluyen espacios de poros La absorción es el cambio en el peso de un agregado debido al agua absorbida por los poros de las partículas	ASTM C-127, ASTM C-128

Continuación de la tabla V.

Ensayo	Significado e importancia	Normas Aplicables
Peso unitario y vacíos	Determina valores de peso unitario necesarios para valores de selección para mezclas de concreto, y computar el porcentaje de vacíos entre partículas de agregados	ASTM C-29
Impurezas orgánicas	Suministra advertencia de impurezas orgánicas presentes en los agregados finos	ASTM C-40
Cantidad de material fino que pasa el tamiz # 200	Cantidad de material más fino, que no se puede calcular por la prueba C-136	ASTM C-117
Estabilidad en agregados	Determina la resistencia de los agregados en solución de sulfato de sodio. Simula la expansión de agua en la congelación. Juzga la firmeza o solidez de los agregados sujetos a la acción del clima	ASTM C-88
Terrones de arena y partículas friables	Índice de terrones de arcilla y partículas friables	ASTM C-142
Gradación	Determina la distribución de las partículas en agregados gruesos y finos por medio de tamiz	ASTM C-136
Abrasión en agregados gruesos	Índice de calidad de los agregados de la fuente de agregados. Mide la degradación y el porcentaje de pérdida	ASTM C-131
Partículas planas y alargadas	Determina las características de la forma del agregado	ASTM D-4791
Caras fracturadas	Determina la característica de caras fracturadas del agregado grueso	INV E-227
Reactividad potencial	Determina la reactividad potencial alcali-silíce de los agregados (método químico)	ASTM C-289

Fuente: elaboración propia.

4.7. Materiales potencialmente perjudiciales

Las sustancias perjudiciales que pueden estar presentes en los agregados incluyen impurezas orgánicas, limos, arcillas, esquisto, óxido de hierro, carbón mineral, lignito y ciertas partículas ligeras y suaves, rocas y minerales como el chert y el cuarzo, ciertas calizas dolomíticas son reactivas con álcalis, el yeso y la anhídrida pueden causar ataque por sulfatos. Ciertos agregados como el esquisto causan erupciones por el abundamiento o por el congelamiento del agua absorbida.

Las impurezas orgánicas pueden retrasar el fraguado y el endurecimiento del concreto, reducir el desarrollo de la resistencia y en algunos casos poco usuales causar el deterioro. Las impurezas orgánicas, como las turbas, los humos y las margas orgánicas pueden no ser tan perjudiciales pero se las debe evitar.

Los materiales más finos que el tamiz No. 200, especialmente el limo y la arcilla, pueden estar presentes como polvo suelto y pueden formar un revestimiento en las partículas de agregados. Incluso hasta los revestimientos finos de limo o arcilla, sobre las partículas de agregado grueso, pueden ser dañosos, pues debilitan la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado. Si ciertos tipos de limo o arcilla están presentes en cantidades excesivas, la demanda de agua puede aumentar significativamente.

El carbón mineral o el lignito u otros materiales de baja densidad como la madera y los materiales fibrosos, cuando están presentes en grandes cantidades, afectan la durabilidad del concreto. Si estas impurezas ocurren en la superficie o cerca de ella, se pueden desintegrar, causar erupciones o manchas.

Las partículas blandas en el agregado grueso son especialmente indeseables pues pueden causar erupciones y pueden afectar la durabilidad y la resistencia al desgaste del concreto. Si son desmenuzables, se pueden romper y aumentar aún más, la demanda de agua. Donde la resistencia a la abrasión sea importante, como en los pisos industriales, los ensayos pueden indicar que se justifica una investigación u otra fuente de agregados. Los terrones de arcilla en el concreto pueden absorber parte del agua de mezcla, causar erupciones en el concreto endurecido y afectar la durabilidad y resistencia al desgaste. También se pueden fracturar durante el mezclado y como consecuencia aumentar la demanda de agua.

La mayoría de las especificaciones limitan cantidades permisibles de estas sustancias. Los métodos de ensayo para la detección cualitativa y cuantitativa de las sustancias perjudiciales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla VI. **Ensayos para materiales perjudiciales en agregados**

Sustancia	Efecto en el concreto	Normas Aplicables
Impurezas orgánicas	Afecta el tiempo de fraguado y el endurecimiento, puede causar deterioro	ASTM C-40 ASTM C-87
Tamiz # 200	Afecta adherencia, aumenta la demanda de agua	ASTM C-117
Carbón, lignito u otro material ligero	Afecta la durabilidad, puede causar manchas y erupciones	ASTM C-123
Partículas blandas	Afecta la durabilidad	ASTM C-235
Terrones de arcilla y partículas desmenuzables	Afecta la trabajabilidad y la durabilidad, puede causar erupciones	ASTM C-142
Agregados reactivos con los álcalis	Causa expansión anormal (viboritas, acocodrilamiento, piel de cocodrilo) fisuración en forma de mapa	ASTM C-227, C-289, C-342 C-1260, C-1293

Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. p. 120.

5. REACCIONES QUÍMICAS DE LOS AGREGADOS

5.1. Reactividad álcali-agregado

La expansión y el agrietamiento, que conducen a una pérdida de la resistencia, elasticidad y la durabilidad del concreto, también pueden ser el resultado de reacciones químicas que incluyen iones alcalinos del cemento portland, iones de hidroxilo y ciertos constituyentes de sílice que pueden estar presentes en el agregado.

La reacción álcali-agregado es una causa del deterioro de estructuras de concreto que se produce cuando se ponen en contacto agregados que tienen compuestos reactivos con componentes alcalinos y se dan unas condiciones de elevada humedad. La reactividad es potencialmente perjudicial solo cuando produce una expansión significativa.

Para evitar estas reacciones se recomienda no emplear agregados potencialmente reactivos y el empleo de cementos con bajo contenido de óxidos alcalinos, el cual conviene que sea inferior al 0,60 por ciento de óxido de sodio equivalente ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$) en peso de cemento. Esta reactividad álcali-agregado (RAA) se presenta en dos formas: reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC).

La RAS es más preocupante que la RAC porque la ocurrencia de agregados que contienen minerales reactivos de sílice es más común. Los agregados de carbonatos reactivos con álcalis tienen una composición específica que no es muy común. Para este trabajo, el enfoque será más la RAS en los agregados.

Figura 23. **Daño en estructura de concreto por reacción álcali-agregado**



Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. p. 121.

5.2. Reacción álcali-sílice

La reacción álcali-sílice (RAS) involucra reacciones químicas entre los áridos reactivos y los álcalis contenidos en el concreto, que ocasionan un incremento de volumen e inducen a la fisuración temprana lo cual puede causar la pérdida de la prestación de servicio de las estructuras afectadas.

5.2.1. Cómo se da la reacción álcali-sílice

El concreto endurecido contiene una red de poros (capilares) con una solución alcalina ($\text{pH} > 12,5$) compuesta por hidróxidos de sodio y potasio derivados de los álcalis del cemento.

Cuando la sílice de los áridos es pobremente cristalina, puede reaccionar con otros compuestos del concreto. Las probabilidades de combinación son mayores a mayor solubilidad de la sílice, y al mismo tiempo, la solubilidad (capacidad de disolverse) incrementa a mayor pH de la solución de poros.

La reacción álcali-sílice se da entre los iones hidroxilos de los hidróxidos de sodio y potasio presentes en el cemento (a veces, a través del suelos o agua que están en contacto) y los constituyentes silíceos reactivos de los áridos.

Cuando se encuentran presentes iones hidroxilos, estos quiebran la estructura del sílice de los agregados y después, la diferencia de carga da lugar a la absorción de los iones alcalinos, dando lugar a la formación de un gel de sílice alcalino, también denominado gel de RAS (que tiene constitución semejante a la de los silicatos de sodio y potasio), expansivo al absorber agua en presencia de calcio.

Este gel, al absorber agua puede inducir presión, expansión, y figuración del agregado y de la pasta. La reacción se puede visualizar en dos etapas.

- Hidróxido alcalino + gel de sílice reactiva \rightarrow producto de la reacción (gel álcali-sílice)
- Gel de productos de la reacción + humedad \rightarrow expansión

5.2.2. La acción del sílice

Varias formas de óxido de sílice o silicio tetraédrico se pueden encontrar en los agregados naturales. El silicio tetraédrico que se muestra en la figura, donde Si^{4+} ocupa el centro de la estructura y cuatro iones oxígeno (O^{2-}), unidos a Si^{4+} , ocupando las esquinas. Una estructura cristalina de silicato que se forma por la repetición del tetraedro de silicio orientado en un espacio tridimensional, es un ejemplo de sílice cristalina completamente donde están vinculados los diferentes tetraedros por iones de oxígeno. Cada ion oxígeno está unido a dos silicios en orden para lograr neutralidad eléctrica.

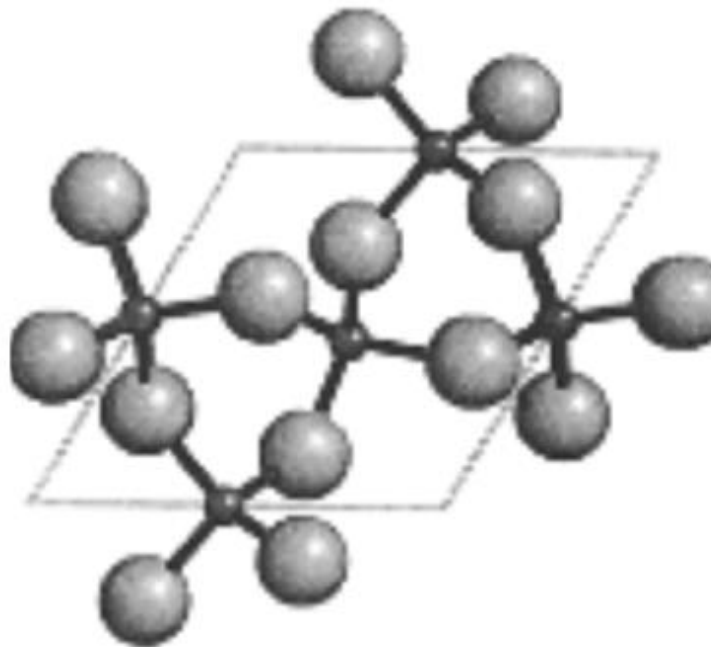
Figura 24. **Silicio tetraédrico (sílice, SiO_2)**



Fuente: reacción álcali-sílice en concreto de cemento portland: métodos de ensayo y alternativas de mitigación. p. 32.

A continuación se muestra la estructura del cuarzo, un tetraedro completo no puede formarse en la superficie de una estructura cristalina. Las uniones entre oxígeno y silicio que están rotas en la superficie, resultan de cargas negativas que están insatisfechas. Tales estructuras son química y mecánicamente estables, impermeables, y solo reaccionan en la superficie. Silicatos amorfos (no cristalinos), también son formados por una combinación de sílice tetraédrico, con la excepción que el tetraedro está arreglado en una red aleatoria tridimensional sin formar una estructura rectangular.

Figura 25. **Estructura del cuarzo (estructura cristalina, SiO_2)**



Fuente: reacción álcali-sílice en concreto de cemento portland: métodos de ensayo y alternativas de mitigación. p. 34.

En consecuencia, el sílice amorfo es más poroso, tiene una gran área superficial, y como consecuencia, es muy reactivo. Entre más amorfo es el sílice, más reactivos se vuelve. Ciertos agregados volcánicos, por ejemplo, que contienen materiales vidriosos formados por el rápido enfriamiento de sílice derretido que les impide cristalizar y los hace muy reactivos.

En adición al grado de cristalización de sílice, la cantidad de energía almacenada en la estructura cristalina, también afecta la reactividad de un agregado. Algunas estructuras pueden contener grandes cantidades de energía de deformación causada por calor y presión, usualmente llamadas estructuras deformadas. Los agregados que contienen este tipo de sílice es probable que sean susceptibles a reacciones deletéreas álcali-sílice. Sin embargo, la velocidad de reacción es mucho más lenta que de los agregados que contienen sílice amorfo. Agregados metamórficos que contienen cuarzo deformado son un ejemplo de tales agregados.

Algunos agregados contienen sílice cristalino, formados por cristales muy finos que tienen áreas superficiales muy grandes. Estos tipos de agregados, tal como sílex (pizarra, esquisto), son propensos a la RAS. La cantidad de sílice contenida en los agregados también afecta su reactividad como se muestra en la figura 25. Hay una máxima cantidad de sílice más allá de la cual la reacción no tiene lugar, esta es llamada el efecto pésimo.

Tabla VII. **Cantidades de sílice en agregados susceptibles a la RAS**

Componente silíceo reactivo presente en agregado	Cantidad
Ópalo	> 5%
Sílex y calcedonia	> 3%
Cuarzo deformado o microcristalino por ejemplo: granitos, argelinas, filitas, limonitas, y arenas naturales y gravas	> 5%
Vidrios volcánicos naturales	> 5%

Fuente: reacción álcali-sílice en concreto de cemento portland: métodos de ensayo y alternativas de mitigación. p. 35.

5.2.3. La acción del álcali

Dependiendo del tipo de sílice reactivo que contienen los agregados dentro de su composición mineralógica, la reacción álcali-sílice puede ser dividida en 2 grupos.

5.2.3.1. Grupo A

Reacción álcali-sílice que ocurre con minerales de sílice amorfos (poco cristalino) y vidrios volcánicos o artificiales.

Álcalis tales como el sodio (Na^+) y el potasio (K^+) presentes en la pasta de concreto romperán las uniones sílice-oxígeno, abriendo la estructura de cristal para álcalis y agua. El resultado es un silicato de sodio hidratado ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que es muy higroscópico, capaz de absorber grandes cantidades de agua, de esto resultan sucesivamente presiones de hinchamiento que, si son mayores que la resistencia a tensión del concreto, causarán fisuración.

Las fisuras o grietas permitirán la penetración de agua adicional causando que las presiones de hinchamiento incrementen. Este tipo de reacción es bastante rápido y puede causar agrietamiento dentro de unos pocos años.

5.2.3.2. Grupo B

Reacción álcali-sílice que ocurre con diversas variedades de cuarzo tales como; cuarzo deformado y fracturado.

Los agregados en este grupo contienen moderadamente sílice reactivo o contienen una pequeña cantidad de sílice. Desde que la sílice reactiva de estos agregados es localizada en la superficie, el resultante producto gel es más estable debido a la presencia de grandes cantidades de hidróxido de calcio, en la interfase entre el agregado y la pasta. Los agregados, porosos son una excepción, porque los álcalis penetrarán los agregados causando un gel menos estable para formar lejos de la interfase y el hidróxido de calcio.

Este proceso causará el reblandecimiento o debilitamiento de los agregados. Los efectos perjudiciales de esta reacción en el concreto son un proceso lento y menos evidente que los efectos del grupo A.

Cuanto mayor sea la concentración de álcalis sodio y potasio en el hormigón, mayor será la concentración de iones hidroxilo (a mayor pH), y a su vez, más pronto reaccionará el sílice con los iones hidroxilo. Si todos los ingredientes para esta reacción están presentes en concreto fresco, entonces el gel puede a menudo ser detectado en la interfase entre el agregado y la pasta de cemento. Las grietas empezarán a propagarse desde las partículas de agregado. Sin embargo, si los álcalis son previstos desde una fuente exterior tal como sales de deshielo, agua de mar, y soluciones industriales que las reacciones propagarán desde las caras expuestas al interior del hormigón.

5.2.4. La acción del calcio

El calcio no interviene al inicio de la reacción, pero su presencia es determinante para que el producto de la reacción sea o no expansivo. Una baja cantidad de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) produce el gel de RAS alcalino, pero no expansivo, cuando se encuentra suficiente cantidad de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) se forma un producto expansivo.

Por otra parte, da basicidad a la solución que se encuentra en los poros, por lo que incrementa la solubilidad de la sílice. También, la concentración de calcio controla, la rapidez de difusión de la sílice; altas concentraciones de calcio cohiben la migración de la sílice y esto da como resultado la expansión.

Además, cuando se encuentra presente el calcio, cambia las propiedades del gel, tales como la viscosidad, en presencia de poca concentración de calcio (tal caso de los concretos con material puzolánico) se produce un gel más fluido, el cual circula por los poros sin generar elevada presión, evitando el incremento de volumen y los conflictos.

5.2.5. Clasificación de la RAS

Dependiendo del estado y la forma en que esté presente el sílice reactivo (sílice disuelto) en el agregado, a partir de la cinética química se conocen dos velocidades de reacción álcali-sílice.

5.2.5.1. RAS rápida

Los agregados están constituidos por formas de cuarzo microcristalino, tensionado o deformado, ya que sus cristales demasiado diminutos tienen una reacción lenta o diferida, con señales de deterioro externo en el concreto después de 8 a 25 años.

5.2.5.2. RAS lenta

Los áridos están conformados por minerales de sílice pobremente cristalizados como son: el vidrio volcánico, ópalo y tridimita, los cuales si se encuentra presentes en un 1 o 2 por ciento en peso, pueden ocasionar deterioros en el concreto en un período corto de tiempo, a menos de un año de construido.

5.2.6. Condiciones que intervienen en las RAS

Para que ocurra una reacción álcali-sílice deben darse un conjunto de condiciones desencadenantes y favorables para tal reacción, estas se muestran a continuación:

- Tiempo
- Contenido de álcalis del cemento
- Fineza del cemento
- Una forma reactiva de sílice en el agregado
- Agentes externos: alta humedad, periódica o permanente; temperatura
- Factores relacionados al concreto: dosificación, permeabilidad, pH, efecto de las armaduras y relación agua/cemento

5.2.7. Proceso de las RAS en función del tiempo

Se conocen tres períodos de tiempo relevantes, para la evolución o desarrollo de la reactividad álcali-sílice en los agregados, estos se muestran a continuación.

- Período de inducción

En este se mueven los iones en la solución de poros hasta el momento en el cual se da el inicio del ataque a los agregados reactivos.

- Período de reacción franca

Se da lugar a la reacción entre los constituyentes activos, los cuales poseen alta rapidez de incremento de volumen.

- Período de amortiguamiento

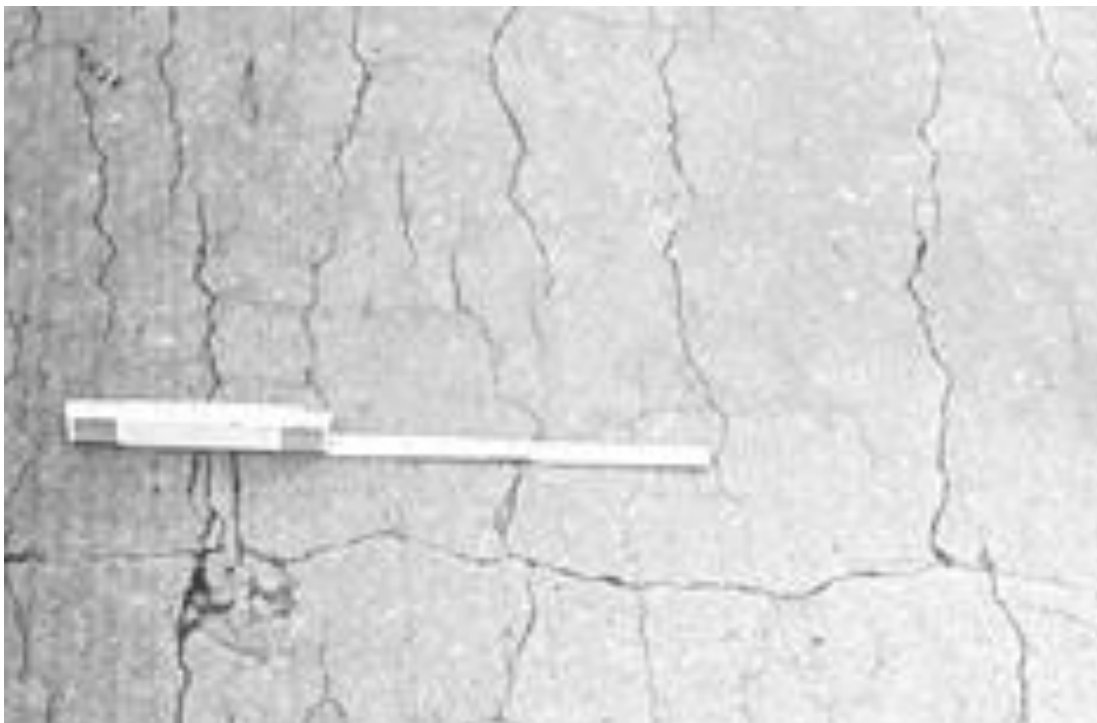
La relevancia de este período se debe a una reducción de la velocidad de reacción provocada por el agotamiento de algunos reactivos influyentes hasta desaparecer.

5.2.8. Cómo se manifiesta la RAS

Los indicadores de RAS pueden ser: red de fisuras y grietas las cuales presentan en veces una coloración más oscura y expulsión de un material de color ámbar que cuando se seca se torna de color blanco, juntas cerradas o lascadas, desplazamiento relativo de diferentes partes de la estructura o la aparición de erupciones en la superficie.

Como el deterioro del RAS es lento, el riesgo de la falla catastrófica es bajo. La RAS puede causar problemas de funcionalidad o utilización y puede agravar otros mecanismos de deterioro, como aquellos que ocurren en la expansión a congelación, a descongelantes y a sulfatos. En los pavimentos se observa ondulación en las losas y rotura debido a la presión de hinchamiento y saltaduras del concreto. Cuando la estructura tiene armaduras las fisuras son paralelas a ellas.

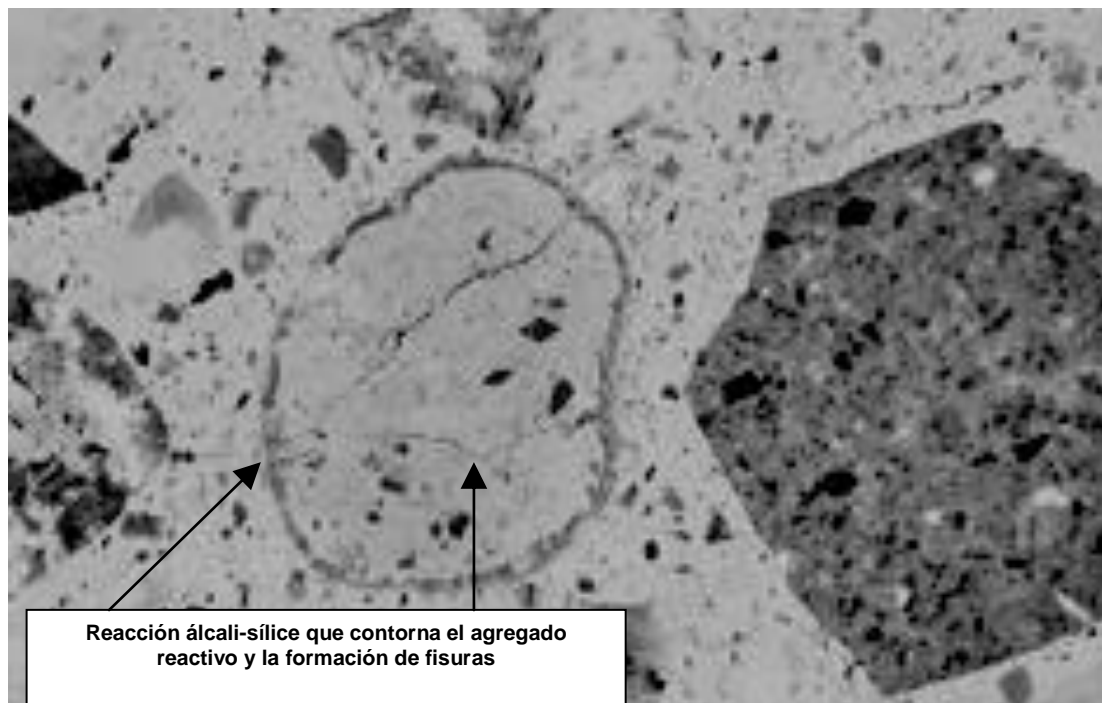
Figura 26. **Agrietamiento en el concreto debido a la reacción álcali-sílice**



Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. p. 121.

La abertura de las fisuras puede variar desde décimas de milímetros a centímetros. En testigos extraídos se observa que el fenómeno se produce en toda la masa del concreto, el gel puede estar presente en las fisuras y vacíos también puede estar presente como un anillo alrededor de los bordes de las partículas de agregados áridos como manifestación del deterioro de la interfase pasta agregado. También se observa variación en el color de los agregados o del mortero, y las fisuras y poros se rellenan con los productos de la reacción. Además se puede dar lugar a efectos de corrosión sobre la armadura y otros ataques externos con una deterioración creciente del concreto a causa de que las grietas dan entrada desde la superficie.

Figura 27. **Sección pulida de un agregado reactivo con álcalis en el concreto**



Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. p. 122.

El examen petrográfico es el método más seguro para la identificación del gel de la RAS en concreto. La petrografía cuando se le usa para estudiar una reacción conocida puede confirmar la presencia de los productos de reacción y verificar la RAS como la causa principal del deterioro. A continuación se muestran los ensayos más comunes para identificar la reactividad álcali-sílice.

Tabla VIII. **Métodos de prueba para la reactividad álcali-sílice**

Nombre de la prueba	Propósito	Tipo de prueba	Duración de la prueba
ASTM C 227 Método estándar para determinar la reactividad potencial alcalina de cemento-agregado (método barra-mortero)	Para probar la susceptibilidad de cemento-agregado combinaciones de reacciones expansivas participación de álcalis	Barras de mortero sobre el agua almacenada a 37,8 °C y humedad relativa alta	Varía: la primera medida a los 14 días, luego 1, 2, 3, 4, 6, 9 y 12 meses, cada 6 meses según sea necesario
ASTM C 289 Reactividad potencial álcali-sílice de los agregados	Para determinar la reactividad potencial de agregados silíceos	Muestra tratada con una solución alcalina a 80 °C	24 horas
ASTM C 342 Cambio de volumen potencial de cemento-agregado combinaciones	Para determinar la expansión potencial de álcali-sílice de cemento-agregado barras de mortero combinaciones almacenados en agua a 23 °C	Barras de mortero combinaciones almacenados en agua a 23 °C	52 semanas

Continuación de la tabla VIII.

<p>ASTM C 1260 Reactividad potencial alcalina de agregados (método barra-mortero)</p>	<p>Para probar el potencial de nocivos reacción álcali-sílice de los agregados en barras de mortero</p>	<p>La inmersión de barras de mortero en una solución alcalina a 80 °C</p>	<p>16 días</p>
<p>ASTM C 1293 Determinación de cambiar la longitud del hormigón debido a la reacción álcali-sílice (prueba de prisma de hormigón)</p>	<p>Para determinar la expansión potencial álcali-sílice de cemento-agregado combinaciones</p>	<p>Prismas de hormigón almacenados en agua a 38 °C</p>	<p>Varía: la primera medición a los 7 días, luego 28 y 56 días, luego 3,6,9 y 12 meses, cada 6 meses después de que sea necesario</p>
<p>ASTM C 1567 Potencial reactividad álcali-sílice de combinaciones de materiales de cemento y agregados (método acelerado de barra mortero)</p>	<p>Para probar el potencial de nocivos reacción álcali-sílice de los materiales de cemento y las combinaciones de agregados en barras de mortero</p>	<p>La inmersión de barras de mortero en una solución alcalina a 80 °C</p>	<p>16 días</p>

Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. p. 123, 124, 125.

5.2.9. Identificación de los agregados potencialmente reactivos

El comportamiento histórico en campo es el mejor medio de evaluarse la susceptibilidad de un agregado a la RAS. Para una evaluación más definitiva, el concreto existente debe estar en servicio, por lo menos 15 años. Los métodos de ensayo más nuevos y rápidos se pueden utilizar para la investigación inicial. Cuando aparezcan incertidumbres, se deben usar ensayos más demorados para confirmar los resultados.

Tabla IX. **Minerales reactivos potencialmente perjudiciales y materiales sintéticos**

Sustancias reactivas álcali-sílice		Sustancias reactivas álcali-carbonato
Andesitas	Esquistos	Calizas dolomíticas
Argilitas	Fillitas	Dolomitas calcíticas
Calcedonia	Gneis granítico Grauvacas	Dolomitas finamente graduadas
Cherts	Ópalo	
Cherts calcedónicos	Material volcánico vitrificado	
Ciertas calizas silíceas	Metagrauvacas	
y dolomitas	Pizarras opalinas	
Cristobalita	Pizarras silícicas	
Cuarcitas	Riolitas	
Cuarzo	Vidrio silicio natural y sintético	
Cuarzosas	Tridimita	
Dacita		

Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. p. 120.

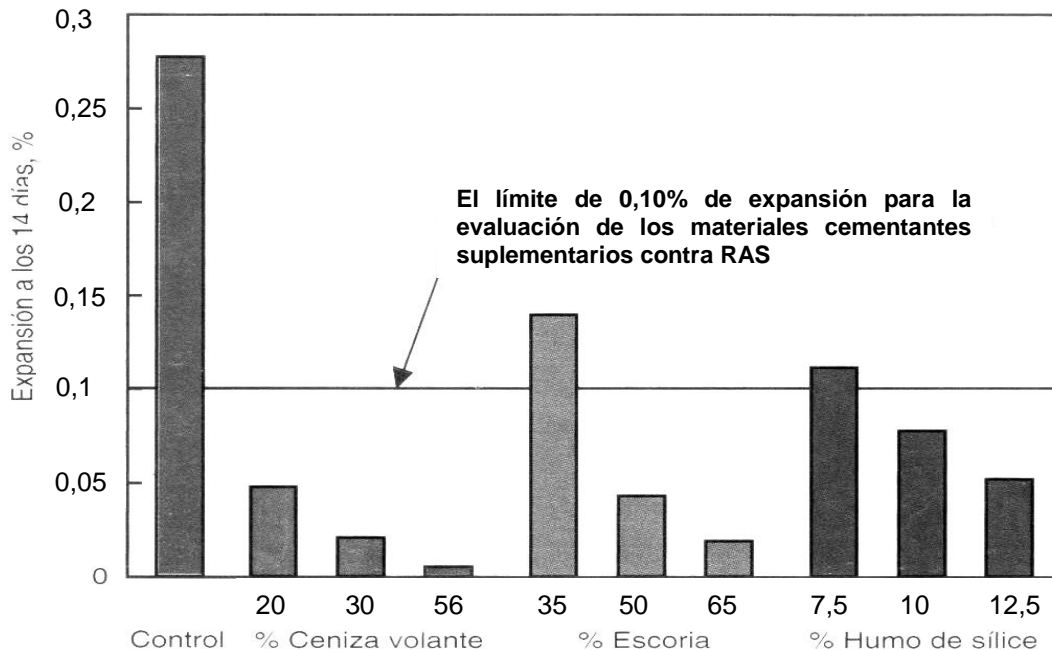
5.2.10. Materiales y métodos para control de la RAS

El medio más eficiente de control de la expansión causada por la RAS es el diseño de mezclas especiales, preferentemente con el uso de materiales disponibles localmente. Las siguientes opciones no se listan en orden de prioridad y aunque normalmente no sean necesarias, se les pueden utilizar en combinación de una con la otra.

En las prácticas actuales incluyen el uso de materiales cementantes suplementarios o cementos mezclados (adicionados) que comprobado a través de ensayos, controlan o limitan el contenido de álcalis en las mezcla. Los materiales cementantes suplementarios incluyen ceniza volante, escoria granulada de alto horno, humo de sílice y puzolanas naturales para controlar la RAS. El cemento con bajo contenido de álcalis inferior a 0,60 por ciento (óxido de sodio equivalente) se puede usar para controlar el RAS.

Su empleo ha sido bien sucedido con agregados ligeramente reactivos. Sin embargo, los cementos con bajo contenido de álcalis no están disponibles en todas las regiones. Por lo tanto se prefiere la utilización de cementos disponibles localmente o combinación con puzolanas, escorias o cementos adicionados para controlar el RAS. Cuando estas adiciones son usadas para controlar la RAS, su eficiencia se debe de determinar a través de ensayos tales como ASTM C-1260 la expansión normalmente disminuye con el aumento de la dosis de puzolana o escoria.

Figura 28. **Influencia en la expansión de la barra de mortero de diferentes cantidades de ceniza volante, escoria y humo de sílice con relación a la masa de material cementante después de 14 días, al usarse agregado reactivo**



Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. p. 126.

5.3. Métodos ASTM para determinar la reactividad álcali-sílice

Dentro de los métodos para determinar la reactividad álcali en los agregados, que se utilizaran para la realización de mezclas de concreto o mortero, se encuentran las siguientes:

5.3.1. Examen petrográfico de los agregados

El examen petrográfico se hace acorde a la Norma ASTM C-295, describe los procedimientos para los exámenes petrográficos de muestras representativas de materiales propuestos para utilizarse como agregados en mezclas de cemento o como materia prima para utilizarse en la producción de tales agregados.

Esta norma también describe el grado en que las técnicas petrográficas se deben utilizar, la selección de propiedades que se deben buscar, y la manera en que estas técnicas pueden ser empleadas en el análisis de muestras de áridos para concreto. Deben de ser utilizados los nombres de rocas y minerales dados en la nomenclatura descriptiva de la Norma ASTM C-294.

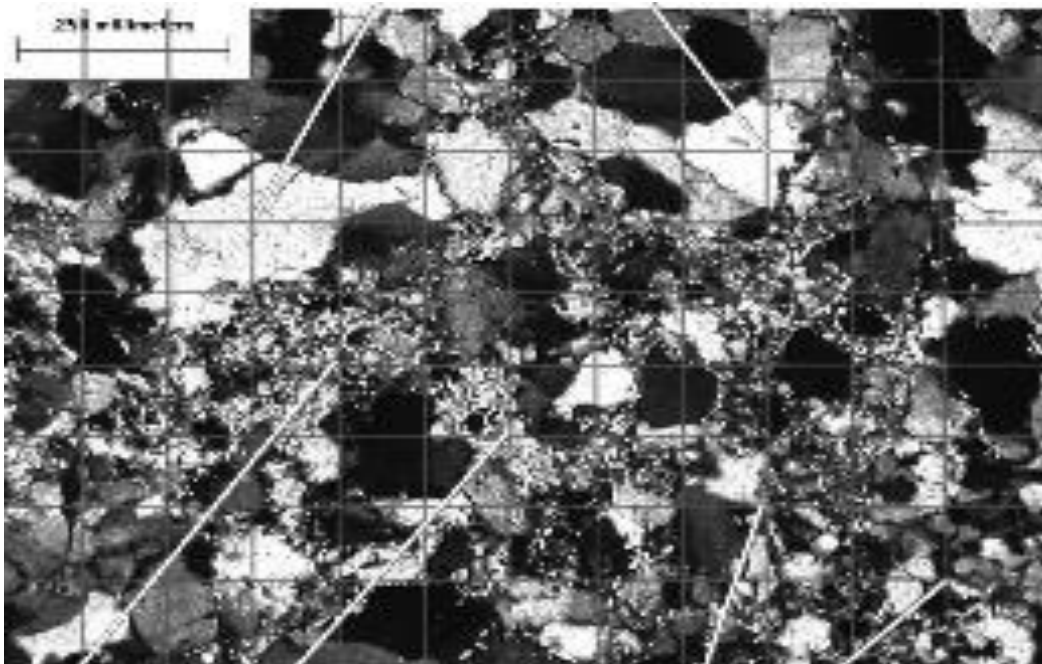
Los exámenes petrográficos se realizan para los siguientes propósitos:

- Para determinar las características físicas y químicas de los materiales que se pueden observar por métodos petrográficos y que inciden en el rendimiento del material en su uso previsto.
- Para describir y clasificar los constituyentes de la muestra.
- Para determinar las cantidades relativas de los constituyentes de la muestra que son esenciales para una adecuada evaluación de la muestra cuando los constituyentes difieren significativamente en propiedades que tienen relación en el rendimiento del material en su empleo previsto.
- Para comparar muestras de agregados de nuevas fuentes con muestras de agregados de una o más fuentes, para que los datos de prueba o los registros de rendimiento estén disponibles.

También se pueden utilizar para determinar las proporciones de partículas cúbicas, esféricas, elipsoidales, piramidales, tabulares, planas y alargadas en una muestra o muestras de agregados. Partículas planas, alargadas y delgadas como chip en áridos incrementan el agua de mezclado y por lo tanto disminuyen la resistencia del hormigón.

Este examen debe identificar y llamar la atención sobre potenciales constituyentes reactivos álcali-sílice y álcali-carbonato, y recomendar pruebas adicionales para confirmar o descartar la presencia de cantidades insignificantes de constituyentes de agregado, capaces de provocar una reacción álcali en el concreto.

Figura 29. **Examen petrográfico para identificación de diferentes tipos de cuarzo (promotor de RAS)**



Fuente: aplicación de técnicas microscópicas en el estudio de la reactividad potencial de los áridos. p. 10.

Además puede ser dirigido específicamente a la posible presencia de contaminantes en agregados, tanto como vidrio sintético, escorias, clinker, carbón o ceniza, óxido de magnesio, óxido de calcio, o ambos, yeso, tierra, hidrocarburos y productos químicos que puedan afectar el comportamiento del fraguado del concreto o propiedades del agregado, excremento de animales, plantas o vegetación podrida, y cualquier otro contaminante que puede resultar indeseable en el concreto.

En resumen los procedimientos específicos empleados en el examen petrográfico de cualquier muestra dependerán en gran medida en la finalidad del examen y la naturaleza de la muestra. En la mayoría de los casos el examen requerirá la utilización de la microscopía óptica.

Los exámenes petrográficos completos para fines particulares y para investigar problemas particulares pueden requerir un examen de los agregados o de los constituyentes seleccionados por medio de procedimientos adicionales, tales como análisis de difracción de rayos X (XRD), análisis térmico diferencial (DTA), espectroscopía de infrarrojo, u otros análisis como microscopía electrónica de barrido (SEM) y energía dispersiva de rayos X (EDX). En algunas instancias, tales procedimientos son más rápidos y más definitivos que los métodos microscópicos.

Los procedimientos que se siguen en el análisis petrográfico de agregados dependen del uso que se le quiera dar a dicho agregado. En ocasiones la petrografía no basta para hacer el estudio y es necesario complementarlo con procedimientos como difracción de rayos X (entre otros).

Figura 28. **Equipo de Fluorescencia de Rayos X**



Fuente: www.interempresas.net/MetalMecanica/FeriaVirtual/Producto-Espectrometros-de-fluorescencia-de-Rayos-X-Spectro-23119.html. Consulta: 24 de septiembre de 2012.

Este permite clasificaciones más seguras de minerales poco comunes y arcillas. La determinación de constituyentes no es el fin último del análisis petrográfico, pero si permite efectuar muchas conclusiones importantes a nivel práctico.

Lo más importante es, determinar si hay componentes que puedan efectuar el comportamiento de un agregado en una aplicación específica, como por ejemplo, determinar y cuantificar los componentes reactivos potenciales de álcali sílice y álcali carbonato y recomendar ensayos que confirmen o no la reacción.

5.3.2. Método químico para determinar la reactividad potencial álcali-sílice de los agregados

Esto se realiza mediante el método de la Norma ASTM C-289, tal método cubre la determinación química de la reactividad potencial de un agregado con los álcalis, en concreto de cemento Portland, de acuerdo con la cantidad de la reacción que ocurre durante 24 horas a 80 grados centígrados, entre una solución de hidróxido de sodio 1 N y un agregado que ha sido triturado y tamizado, de forma que pase por una malla # 50 y quede retenido en una malla # 100 referentes a la especificación de la Norma ASTM E-11.

Cuando este método de prueba se utiliza para evaluar la reactividad potencial de los componentes silíceos de los agregados con los álcalis en el concreto de cemento hidráulico, debe de ser utilizado en combinación con otros métodos. Los métodos de ensayo deben de ser seleccionados en base a las características mineralógicas de los agregados. Se recomienda que estas propiedades sean determinadas con un examen petrográfico de acuerdo con las disposiciones de la guía de la Norma ASTM C-295.

No utilice los resultados de las pruebas realizadas por este método de prueba (Norma ASTM C-289) como la única base para la aceptación o el rechazo de las fuentes con respecto a la reactividad álcali-sílice (RAS), debido a que los resultados de este método de ensayo se pueden obtener rápidamente, y aunque no son del todo fiables en todos los casos, pueden proporcionar datos útiles que pueden mostrar la necesidad de obtener información adicional a través de los métodos descritos en las Normas ASTM C-227 y ASTM C-295.

Las reacciones entre solución de hidróxido de sodio (NaOH) y constituyentes de sílice en el agregado se han demostrado por la correlación con el rendimiento de algunos agregados en estructuras de concreto. Este método puede ser empleado como una herramienta de control de calidad comprobar periódicamente muestras de una fuente existente con un historial de servicio aceptable.

En resumen el método describe una selección y preparación de la muestras para ensayo, después menciona un procedimiento de reacción entre el agregado previamente tamizado y el hidróxido de sodio (NaOH), luego de establecen dos procedimientos que se deben realizar paralelamente para llegar al resultado final. Estos procedimientos son la reducción de alcalinidad y la determinación gravimétrica de sílice disuelto.

Determinación gravimétrica del sílice disuelto (S_c)

El sílice disuelto se determina de forma gravimétrica pero antes debe de realizarse otra pequeña preparación a través de digestiones ácidas. En tal preparación se dan las etapas de descomposición de las muestras de sílice y silicatos, la separación, la calcinación, y la determinación de sílice corregido. A partir del sílice corregido se puede calcular el sílice disuelto.

En la etapa de descomposición de las muestras de sílice y silicatos, el sílice es resistente al ataque químico por todos los ácidos minerales, a excepción del ácido fluorhídrico. Cuando el silicio es un componente secundario, así como es el caso de muchos minerales, la muestra se ataca con ácido clorhídrico (HCl) como lo sugiere el método de la Norma ASTM C-289, quedando el sílice insoluble.

En la etapa de separación, el ácido silícico (sílice hidratada) es uno de los ácidos inorgánicos de mayor debilidad y cuando se forma por metátesis es uno de los coloides inorgánicos más hidrofílicos. Para separar el sílice, se evapora a sequedad la disolución clorhídrica que contiene el sílice hidratado coloidal y el residuo se calienta entre 105 y 110 grados centígrados durante una hora, con lo que se obtiene un producto granular representado aproximadamente por la fórmula: $\text{SiO}_2 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ que se separa bien por filtración como lo dicta la Norma ASTM C-289.

Algo de sílice pasa siempre con el filtrado y para recogerla es necesaria otra evaporación tal como lo describen la Norma ASTM C-289. En la etapa de la calcinación, se quema el papel y finamente se calcina el sílice a temperatura máxima de la flama, esto se puede conseguir con un mechero de Meker, también se puede calcinar en una mufla. El residuo calcinado está constituido rara vez por sílice pura; su peso representa sílice e insolubles o también llamado sílice sin corregir.

Para determinar el sílice corregido, el residuo silicio se evapora con ácidos fluorhídrico (HF) como lo dicta la Norma ASTM C-289, en crisol de platino con objeto de volatilizar el silicio en forma de tetrafluoruro de silicio.

La impureza de hierro queda después en la misma forma, Fe_2O_3 , que en el residuo original, y la pérdida de peso representa SiO_2 , el sílice corregido, pues a partir de este sílice corregido se determina el sílice disuelto que se presenta en el agregado. Debido a que en la muestra pueden encontrarse presentes fluoruros, se produce una pérdida de silicio en forma de tetrafluoruro de silicio en el tratamiento de ácido preliminar de la muestra y en la evaporación para la separación del sílice.

En consecuencia debe de emplearse material de platino para la descomposición de la muestra, y se puede evitar prácticamente la pérdida del silicio cubriendo la cápsula de ataque con una tapa de platino, con objeto de mantener saturada el vapor de agua la atmósfera de la cápsula; con esto se tiene lugar la hidrólisis del fluoruro de silicio.

Volatilizándose el fluoruro de hidrógeno por calefacción en presencia de ácido perclórico hasta humos abundantes.

El boro que puede estar presente en la muestra siempre queda arrastrado en forma de ácido bórico por el sílice hidratado. El óxido bórico que se forma en la calcinación se volatiliza también con el tratamiento con ácido fluorhídrico.

Y esta pérdida de peso podría quedar asignada al sílice. La separación del boro del sílice puede realizarse antes de la deshidratación por tratamiento del residuo casi seco con metanol, con lo que se volatiliza el trimetilborato.

Reducción de la alcalinidad (R_c)

La reducción de la alcalinidad se determina a través de una volumetría ácido base, en la cual comúnmente se utiliza una alícuota de 20 mililitros de la solución que se hace después del procedimiento de reacción entre hidróxido de sodio (NaOH) y agregado después de 24 horas, a esta solución se le agregan dos gotas de fenolftaleína se titula con ácido clorhídrico (HCl) 0,05 N.

5.3.3. Método de la barra de mortero para determinación de reactividad potencial álcali-sílice

Este se realiza mediante el método de la Norma ASTM C-227, el cual tiene como alcance determinar la susceptibilidad de las combinaciones cemento-agregado a reacciones expansivas que involucren iones hidroxilo asociados con los álcalis (sodio y potasio), mediante la medición del aumento (o reducción) en la longitud de barras de mortero que contengan la combinación, durante el almacenamiento bajo condiciones prescritas en la prueba.

Los álcalis participantes en las reacciones de expansión son aportados usualmente por el cemento; en algunas circunstancias pueden provenir de otros componentes del hormigón o de fuentes externas.

La correlación de los datos de los resultados de los ensayos efectuados mediante este método con el comportamiento de las combinaciones cemento-agregado en hormigones en servicio, los resultados de la evaluación petrográfica de los agregados (Norma ASTM C-295), y los resultados de los ensayos para determinar la reactividad potencial de los agregados mediante métodos químicos, ha sido publicada en la Norma ASTM C-289, y debe de ser consultada junto con los resultados de los ensayos efectuados, usando esta Norma ASTM C 227 como base para las conclusiones y recomendaciones concernientes al uso de las combinaciones cemento-agregado en hormigón.

Los resultados de los ensayos efectuados usando esta norma proporcionan información sobre la posibilidad de que una combinación cemento-agregado, que tenga una reactividad potencial álcali-sílice perjudicial, cause una consecuente expansión del hormigón. Los criterios para determinar esta reactividad se encuentran en el apéndice de la Norma ASTM C-33.

En caso de utilizar otro tipo de cemento como cemento mezclado hidráulico UGC o también llamado acorde a las normas ASTM, cemento mezclado hidráulico tipo GU, los criterios para determinar esta reactividad se encuentran en la Norma ASTM C-1157.

Puede resultar una expansión insignificante cuando estén presentes rocas de sílice potencialmente reactivas en una proporción comparativamente alta, aun cuando se use cemento con alto álcali, probablemente porque los productos de la reacción álcali-sílice se caracterizan por una proporción álcali a sílice tan baja como para minimizar la filtración del agua y el abultamiento.

Los agregados dolomíticos (cuando se hayan empleado como agregado grueso en el hormigón), que son afectados perjudicialmente por la reacción álcali-carbonato no pueden producir una expansión notable en este método de ensayo.

También puede ocurrir, eventualmente, una expansión significativa en el ensayo por razones diferentes a la reacción álcali-agregado, particularmente, por la presencia de sulfatos en el agregado, los cuales producen un ataque de sulfato sobre la pasta de cemento, sulfuros ferrosos (pirita, marcasita o pyrrhotita) que se oxidan e hidratan con el escape o pérdida de sulfato, y materiales tales como la cal libre (CaO) o magnesio libre (MgO) en el cemento o agregado que progresivamente se hidratan y carbonatan.

Cuando los resultados de los ensayos descritos en esta norma presenten expansiones que excedan las determinadas en el apéndice de Norma ASTM C-33, o en su defecto de la Norma ASTM C-1157 si se usa cemento UGC tipo GU, es recomendable desarrollar información suplementaria para confirmar que la expansión real se debe a la reactividad a los álcalis.

6. DESARROLLO EXPERIMENTAL

6.1. Materiales

Para la realización de este trabajo de investigación, los materiales son en esencia la base primordial de los ensayos de laboratorio, que se realizaran dentro del método experimental, para poder determinar las características físico-mecánicas de los materiales.

6.1.1. Arena volcánica

Material cristalino vesicular de composición andesítica y basáltica que es lanzada por el cráter durante una erupción explosiva, también conocida como escoria volcánica. La naturaleza vesicular de la escoria, se debe al escape de gases volcánicos durante la erupción. La escoria es típicamente de color gris oscuro a negro, debido a su contenido de hierro.

Figura 31. **Arena volcánica**



Fuente: laboratorio de Morteros CII/USAC, 24 de febrero de 2011.

Las arenas del volcán de Pacaya, se pueden clasificar como andesitas basálticas, esta clasificación basada en criterios geoquímicos, como el contenido en K_2O en relación a SiO_2 , ya que los caracteres petrológico-mineralógicos de estas rocas no son suficientemente diagnósticos como para permitir su correcta clasificación.

La referencia consultada comenta "presentan la interpretación microscópica de las arenas andesítico-basálticas y andesíticas en relación a su composición geológica son constituidas esencialmente por grandes cristales de plagioclasa (An_{95-68}), ortopiroxeno ($En_{79-55} Fs_{18-43} Wo_{3-2}$) y clinopiroxeno ($En_{50-41} Fs_{9-17} Wo_{41-42}$), si bien en las más silíceas de estas últimas aparecen también cristales de anfíbol, biotita y cuarzo, que están incluidos en una matriz vítrea o poco cristalina que puede representar hasta el 50 por ciento de la roca, en la que aparecen además magnetita (Usp_{29-11}) e ilmenita (Ilm_{80-74})".¹

En lo que concierne a su composición química, las arenas del volcán de Pacaya exhiben relativamente un amplio rango de SiO_2 , así como altos contenidos de Al_2O_3 y CaO , moderados de Na_2O y bajos de K_2O y P_2O_5 .

6.1.1.1. Recolección de las muestras

La arena volcánica fue recolectada en el parqueo del Centro de Investigaciones de Ingeniería, del Campus Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12 de la ciudad de Guatemala, el día 28 de mayo de 2010. Durante su recolección fue colocada en bolsas de plástico para su estudio posteriormente.

¹ Reactividad potencial de las rocas andesíticas de Cabo de Gata (SE de España) J. Soriano, A. La Iglesia, M.A. García Calleja, J López-Ruiz.

Es importante mencionar que por parte de la Sección de Agregados, Concreto y Morteros conjuntamente con la Sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería, se procedió a realizar ensayos a la arena volcánica emanada de la erupción del volcán de Pacaya, así como esta fue recolectada sin ningún tipo de beneficio o tratamiento.

6.1.1.2. Preparación de las muestras

Para la realización de los ensayos para el desarrollo de esta investigación, se debían preparar tres muestras de arena volcánica, siendo las siguientes.

- Arena volcánica con proceso sin lavar
- Arena volcánica con proceso lavada manualmente
- Arena volcánica con proceso de intemperismo

Para el caso de la arena volcánica sin lavar, se procede a utilizarla como se recolecto, la arena volcánica lavada manualmente se lavó constantemente por una semana y la arena volcánica lavada a la intemperie, se colocó en un lugar en el cual, el agua de lluvia le aplicara el lavado, para este caso el tiempo fue el del período de invierno de 2010.

6.1.1.3. Tamizaje de la arena volcánica

Ya separadas y lavadas las muestras, se procedió a realizar un tamizaje como lo indica la Norma ASTM C-778, el cual permitió ajustar las tres arenas volcánicas a la de una arena estándar.

Figura 32. Tamizaje de arena volcánica



Fuente: bancos de trabajo, área de máquinas CII/USAC, 08 de febrero de 2011.

Luego del tamizaje de las arenas por medio de los tamices # 16, # 20, # 30, # 40, # 50 y # 100, se procedió a separar las arenas retenidas en cada uno de los tamices, y utilizando los porcentajes que establece la Norma ASTM C-778 se determinan los pesos de cada tamiz, para luego unificarlas y formar cada una de las arenas a utilizar en los ensayos mecánicos de este trabajo.

Figura 33. **Separación y pesaje de las arenas después del tamizaje**



Fuente: bancos de trabajo, área de máquinas CII/USAC, 08 de febrero de 2011.

6.1.1.4. Ensayo del examen petrográfico

Este ensayo, sirve para examinar una muestra de agregado o una muestra de una fuente potencial de agregados para determinar si hay presentes sustancias potencial y perjudicialmente reactivas, y si las hay, en qué cantidades.

El examen petrográfico se realizó en el Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, siguiendo procedimientos y especificaciones indicados en la Norma ASTM C-295.

Tabla X. **Examen petrográfico**

Presentación:	MATERIAL GRANULAR
Color:	OBSCURO (NEGRO)
Estructura:	VESICULAR-ESCORIÁCEA (microscópica)
Composición Química:	ES UNA ROCA BÁSICA (FERROMAGNESIANA) SiO ₂ entre 45% y 52% (como indicador). Para su clasificación se tomaron en cuenta también los contenidos de Aluminio, Hierro, Magnesio, Calcio, Sodio, Potasio y Titanio
Composición Mineralógica:	FRAGMENTO VOLCÁNICO, compuesto principalmente por piroxenos y olivinos.
Nombre:	PIROCLASTOS BASÁLTICOS ESCORIÁCEOS

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

6.1.1.5. **Ensayos físicos y químicos**

Terminados los procesos de muestreo, tamizaje y preparación, se procedió a realizar ensayos, siendo estos: granulometría, peso unitario, peso específico, porcentaje de absorción, porcentaje de vacíos, contenido de materia orgánica, tamiz # 200, reactividad potencial, determinación de óxido de potasio (K₂O), óxido de sodio (Na₂O), óxido de silicio (SiO₂), óxido de hierro (Fe₂O₃), óxido de aluminio (Al₂O₃), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), y trióxido de azufre (SO₃).

Los ensayos físicos fueron realizados en el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería, utilizando procedimientos y especificaciones indicados en las normas ASTM aplicables, mientras que los ensayos químicos fueron realizados por el Laboratorio Químico del Centro Tecnológico del Cemento de Cementos Progreso y el Laboratorio de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

6.1.2. Arena estándar Norma ASTM C-778

Es una arena que se utiliza para la preparación de morteros en el ensayo de cementos hidráulicos, arena de sílice compuesta casi completamente de granos de cuarzo redondeados naturalmente casi pura. Existen dos tipos de arena estándar, siendo estas.

- Arena 20-30, normalizada, graduada predominantemente entre el tamiz de 850 μm (No. 20), y el tamiz de 600 μm (No. 30).
- Arena graduada, normalizada, graduada predominantemente entre el tamiz de 600 μm (No. 30) y el tamiz de 150 μm (No. 100).

6.1.2.1. Ensayos físicos y químicos

Esta arena se utilizó tal como se vende en el mercado, no necesito ningún tipo de muestreo, preparación o tamizaje, se procedió a realizar ensayos, siendo estos: granulometría, peso unitario, peso específico, porcentaje de absorción, porcentaje de vacíos, contenido de materia orgánica, tamiz # 200, reactividad potencial, determinación de óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), óxido de silicio (SiO_2), óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), y trióxido de azufre (SO_3).

Los ensayos físicos fueron realizados en el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería, siguiendo procedimientos y especificaciones indicados en las normas ASTM aplicables.

Figura 34. **Arena estándar**



Fuente: laboratorio de Morteros CII/USAC, 18 de septiembre de 2012.

6.1.3. Cemento portland puzolánico Norma ASTM C-1157

Este es un cemento portland con adición de puzolana natural, y se clasifica como cemento para uso general en la construcción. Esto quiere decir que por las características propias de éste, puede ser utilizado en prácticamente todas las actividades típicas de la construcción, en especial en la fabricación de concreto premezclado y mezclado en obra y en la elaboración de morteros de diferentes tipos.

El cemento usado para el desarrollo experimental fue cemento Progreso para Uso General en la Construcción (UGC), que es ideal para zapatas, cimientos, columnas, paredes, vigas, losas, morteros, suelo cemento y demás aplicaciones. En la actualidad el cemento Progreso UGC cumple con la categoría de resistencia de 4 000 libras por pulgada cuadrada (28 N/mm²) a los 28 días en la prueba de resistencia a compresión de morteros estandarizados de cemento.

Figura 35. **Presentación del saco de cemento Portland puzolánico**



Fuente: <http://www.cempro.com/servicios-y-productos/productos/cemento>. Consulta: 25 de septiembre de 2012.

6.1.3.1. Ensayos mecánicos y químicos

Al cemento no se le realizaron ensayos físicos, únicamente mecánicos que son parte del desarrollo experimental de este trabajo y químicos entre ellos determinación de óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), óxido de silicio (SiO_2), óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), y trióxido de azufre (SO_3), silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y álcalis equivalentes

Los ensayos mecánicos se realizaron en el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería, y los ensayos químicos fueron realizados en el Laboratorio Químico del Centro Tecnológico del Cemento, de cementos Progreso.

Existen más ensayos para evaluar el desempeño del cemento, estos ensayos se describen en la Norma ASTM C-1157, pero para el siguiente estudio los ensayos de mayor relevancia, son los dos antes mencionados. En la siguiente tabla se muestran los requisitos que se deben de cumplir.

Tabla XI. **Requisitos físicos y mecánicos del cemento**

Ensayo	Norma ASTM	Tipos de cementos						
		UGC	ARI	DLR	MRS	ARS	MCH	BCH
Finura	C-430 C-204	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)
Expansión al autoclave, % máximo	C-151	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Tiempo de fraguado Vicat ^C								
Inicial, no menor que	C-191	45	45	45	45	45	45	45
Inicial, no mayor que		420	420	420	420	420	420	420
Contenido de aire en el mortero, %	C-185	(D)	(D)	(D)	(D)	(D)	(D)	(D)

Continuación de la tabla XI.

Ensayo	Norma ASTM	Tipos de cementos						
		UGC	ARI	DLR	MRS	ARS	MCH	BCH
Resistencia a compresión mínima en Mpa, (psi) ^E	C-109							
1 día		---	12 (1749)	---	---	---	---	---
3 días		13 (1890)	24 (3480)	---	11 (1600)	11 (1600)	5 (1890)	---
7 días		20 (2900)	---	---	18 (2610)	18 (2610)	11 (1600)	11 (1600)
28 días		28 (4060)	---	11 (1600)	---	25 (3620)	---	21 (3050)
90 días		---	---	18 (2610)	---	---	---	---
Calor de hidratación, máximo	C-186							
7 días, kJ/kg (kcal/kg)		---	---	---	---	---	290 (70)	250 (60)
28 días, kJ/kg (kcal/kg)	---	---	---	---	---	---	290 (70)	
Expansión de la barra mortero, % máximo 14 días	C-1038	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
Expansión a los sulfatos (resistencia a los sulfatos) ^F	C-1012							
6 meses, % máximo		---	---	---	0,10	0,05	---	---
1 año, % máximo	---	---	---	---	0,10	---	---	
Opción BRA/R, Baja reactividad con agregados reactivos a los álcalis (G)								
Expansión barra mortero,	C-227							
14 días, % máximo		0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
56 días, % máximo	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	
Opción BL, Color Blanco								
Índice de blancura, % mínimo		70	70	70	70	70	70	70
Opción A, con incorporador de aire								
Contenido de aire en el mortero, %	C-185	19 ± 3	19 ± 3	19 ± 3	19 ± 3	19 ± 3	19 ± 3	19 ± 3

Continuación de la tabla XI.

Ensayo	Norma ASTM	Tipos de cementos						
		UGC	ARI	DLR	MRS	ARS	MCH	BCH
Requisitos físicos opcionales								
Endurecimiento temprano, penetración final, % mínimo	C-451	50	50	50	50	50	50	50
Resistencia a la compresión, Mpa, (psi) ^{E a 28 días}	C-109	---	---	---	28 (4060)	---	22 (3190)	---
Contracción por secado, %	C-596	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)

- A. En los certificados que sean solicitados al fabricante, se deben consignar ambos resultados, el de ensayos de residuo en el tamiz (No. 325) y la superficie específica del permeabilímetro de aire Blaine, en m²/kg.
- B. Ensayo opcional, alternativo al de expansión en autoclave.
- C. El tiempo de fraguado se refiere al tiempo de fraguado inicial en el método de ensayo C191.
- D. El contenido de aire se debe consignar en todos los certificados solicitados al fabricante. Un valor dado en mortero no necesariamente asegura que el contenido de aire deseado será obtenido en el concreto.
- E. Los cementos pueden despacharse antes que se disponga de datos de edad tardía. En tales casos el dato de ensayo queda en blanco. Alternativamente, el fabricante puede proveer estimados basados en datos del historial de la producción. El informe debe indicar si se proveen tales estimados.
- F. En el ensayo para el cemento ARS, no se requiere del ensayo a un año cuando el cemento cumple con el límite de 6 meses. Un cemento ARS que falle en el límite de 6 meses no debe ser rechazado a menos que también falle en el límite de un año.
- G. El cumplimiento de este requisito no debe ser solicitado a menos que vaya a ser utilizado con agregados reactivos con los álcalis.
- H. A solicitud del comprador, debe suministrársele datos sobre la contracción por secado.

Fuente: Norma Técnica Guatemalteca, COGUANOR NTG-41095, Comisión Guatemalteca de Normas Ministerio de Economía, 2011.

6.2. Ensayos mecánicos

Dentro del desarrollo experimental se realizarán dos ensayos mecánicos que son sumamente importantes; la resistencia a compresión y tensión, que medirá el desarrollo de resistencia que irá adquiriendo el cemento con las diferentes mezclas de arenas y la reactividad potencial álcali-agregado en barras de mortero que medirá la expansión o contracción del cemento con las diferentes arenas.

Los ensayos mecánicos fueron realizados en el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería, siguiendo procedimientos y especificaciones indicados en las normas ASTM aplicables.

6.2.1. Determinación de la resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico (usando cubos de 2 pulgadas de lado)

Este método de ensayo tiene por objeto establecer la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico, utilizando cubos de 50,8 milímetros de lado. Este ensayo se basa en la Norma ASTM C-109, la cual se describirá en el apéndice.

Para la realización de los cubos de cemento con las diferentes arenas a evaluar, se definieron las diferentes proporciones, temperaturas del laboratorio, temperatura y humedad de la cámara de curado, así como las diferentes edades de ensayo a compresión.

6.2.1.1. Proporciones

Estas son determinadas conforme la Norma ASTM C-109, siendo estas para elaborar 9 especímenes, 740 gramos de cemento, 2 035 gramos de arena y 359 mililitros de agua para un cemento portland, o habrá que buscar la cantidad de agua para lograr un flujo de la mezcla de 110 ± 5 .

En la siguiente tabla se muestran las diferentes proporciones utilizadas en las diferentes mezclas.

Tabla XII. **Proporciones utilizadas para las diferentes mezclas**

MUESTRA	MATERIAL	PROPORCIÓN EN PESO (gramos)	PROPORCIÓN EN VOLUMEN	FLUJO
Arena estándar	Cemento	740	1	110 ± 5
	Agregado fino	2035	2,75	
	Agua	378,88	0,512	
Arena volcánica con proceso sin lavar	Cemento	740	1	110 ± 5
	Agregado fino	2035	2,75	
	Agua	583,12	0,788	
Arena volcánica con proceso lavada manualmente	Cemento	740	1	110 ± 5
	Agregado fino	2035	2,75	
	Agua	568,32	0,768	
Arena volcánica con proceso de intemperismo	Cemento	740	1	110 ± 5
	Agregado fino	2035	2,75	
	Agua	560,18	0,757	

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

6.2.1.2. **Temperaturas y humedades del laboratorio y cámara de curado**

Dentro de la propia Norma ASTM C-109, se sugieren ciertos parámetros de temperatura y humedad, tanto para el laboratorio, herramientas y utensilios, así como materiales a utilizar en la elaboración de cubos para compresión, para el caso de cámaras de curado y aguas de mezclado y de almacenamiento, se utiliza la Norma ASTM C-511.

En la siguiente tabla se muestran los diferentes parámetros recomendados por las Normas ASTM C-109 y ASTM C-511, como también los datos de temperaturas y humedades que se tenían al momento de realizar los ensayos de laboratorio.

Tabla XIII. **Parámetros de temperaturas y humedades**

	VALORES DE LAS NORMAS ASTM C-109 Y ASTM C-511		VALORES OBTENIDOS EN LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO	
	TEMPERATURA	HUMEDAD	TEMPERATURA	HUMEDAD
Laboratorio, materiales, moldes, tazón de mezclado y utensilios a utilizar en la elaboración de cubos	23,0 ± 3,0 °C	No menor al 50%	21,0 °C	70 %
Agua de mezclado, agua de almacenamiento y cámara de curado	23,0 ± 2,0 °C	No menor al 95%	21,0 °C	No menor al 95%

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

6.2.1.3. Realización de mezclas en el laboratorio

Ya obtenidos los ensayos a las diferentes arenas, ajustadas las temperaturas y humedades del laboratorio, y calculadas las proporciones; se procedió a la realización de los diseños de mezcla prácticos de los cubos de morteros, cumpliendo todos los requerimientos de las Normas ASTM C-109 ASTM C-305.

Figura 36. **Elaboración de cubos de mortero en el laboratorio**



a. Materiales para elaborar cubos de mortero.



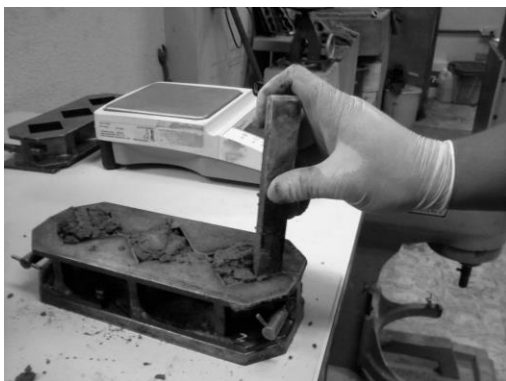
b. Colocación del cemento en la mezcladora de mortero.



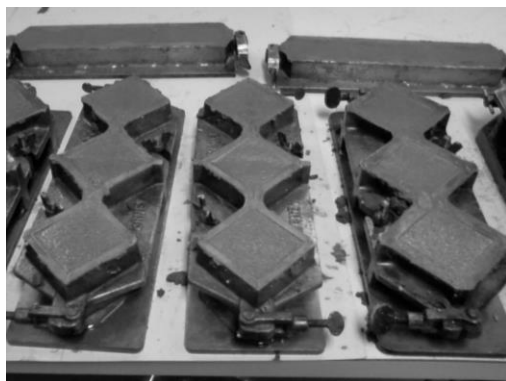
c. Colocación del agregado fino en la mezcladora de mortero.



d. Mezclado de materiales en la mezcladora de mortero.



e. Llenado y compactado de cubos de mortero.



f. Finalización de llenado, compactado y razado de cubos y briquetas de mortero.

Fuente: laboratorio de Morteros. CII/USAC. 11 de julio de 2011.

6.2.1.4. Curado de cubos y briquetas de mortero

Elaborados los cubos y las briquetas de mortero de cada una de las muestras, se procedió a desencofrar de los moldes a las 24 horas después de su fundición, y a colocarse dentro de recipientes con agua destilada saturada con hidróxido de sodio (cal); todas las muestras permanecieron sumergidas completamente hasta antes de su ensayo.

6.2.1.5. Edades de ensayo

Las edades recomendadas conforme la Norma ASTM C-1157 son; 1, 3, 7 y 28 días, sin embargo para la realización de este trabajo se muestrearon también las edades de 42, 56, 70, 84 y 91 días, esto para obtener resultados a largo plazo y proyectar las posibles consecuencias estructurales.

6.2.1.6. Ensayo a la compresión de cubos y briquetas de mortero

Establecidas las fechas de ensayo se procedió a ensayar a compresión los cubos y a tensión las briquetas de mortero. A las edades establecidas anteriormente.

Figura 37. **Ensayo de compresión de cubos de cemento y arena estándar**



a. Materiales para elaborar cubos de mortero.



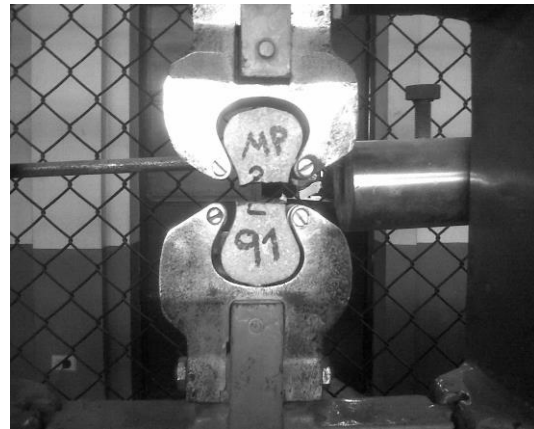
b. Colocación del cemento en la mezcladora de mortero.

Fuente: Área de máquinas. CII/USAC. 04 de julio de 2011.

Figura 38. **Ensayo de tensión de briquetas de cemento y arena estándar**



a. Materiales para elaborar cubos de mortero.



b. Colocación del cemento en la mezcladora de mortero.

Fuente: área de máquinas. CII/USAC. 04 de julio de 2011.

6.2.2. Determinación de la reactividad alcalina potencial de las combinaciones cemento y agregados (método de la barra de mortero)

Este método de ensayo, tiene por objeto la determinación de la susceptibilidad de combinaciones cemento-agregados a reacciones expansivas, en las cuales intervengan los álcalis (sodio y potasio), por medio de la medición del incremento o disminución de la longitud de barras de mortero almacenadas bajo condiciones descritas en el ensayo. Este ensayo se basa en la Norma ASTM C-227, la cual se describirá en el apéndice.

6.2.2.1. Proporciones

Estas son determinadas conforme la Norma ASTM C-227, siendo estas para elaborar 2 especímenes; 300 gramos de cemento, 675 gramos de arena y habrá que buscar la cantidad de agua para lograr un flujo de la mezcla de 110 ± 5 .

En la siguiente tabla se muestran las diferentes proporciones utilizadas en las diferentes mezclas.

Tabla XIV. **Proporciones utilizadas para las diferentes mezclas**

MUESTRA	MATERIAL	PROPORCIÓN EN PESO (gramos)	PROPORCIÓN EN VOLUMEN	FLUJO
Arena estándar	Cemento	300,00	1	110 ± 5
	Agregado fino	675,00	2,25	
	Agua	154,60	0,515	
Arena volcánica con proceso sin lavar	Cemento	300,00	1	110 ± 5
	Agregado fino	675,00	2,25	
	Agua	201,00	0,670	
Arena volcánica con proceso lavada manualmente	Cemento	300,00	1	110 ± 5
	Agregado fino	675,00	2,25	
	Agua	220,40	0,735	
Arena volcánica con proceso de intemperismo	Cemento	300,00	1	110 ± 5
	Agregado fino	675,00	2,25	
	Agua	215,70	0,719	

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

6.2.2.2. Temperaturas y humedades del laboratorio y cámara de curado

Dentro de la propia Norma ASTM C-227, sugiere ciertos parámetros de temperatura y humedad, tanto para el laboratorio, así como materiales a utilizar en la elaboración de barras de mortero, para el caso de cámaras de curado y aguas de mezclado y de almacenamiento, se utiliza la Norma ASTM C-511.

A diferencia de los cubos de mortero, las barras de mortero se almacenan en una cámara u horno que proporcione una temperatura de $38,0 \pm 2$ grados centígrados y suficiente humedad en la misma.

En la siguiente tabla se muestran los diferentes parámetros recomendados por las Normas ASTM C-109 y ASTM C-511, como también los datos de temperaturas y humedades que se tenían al momento de realizar los ensayos de laboratorio.

Tabla XV. **Parámetros de temperaturas y humedades**

	VALORES DE LAS NORMAS ASTM C-109 Y ASTM C-511		VALORES OBTENIDOS EN LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO	
	TEMPERATURA	HUMEDAD	TEMPERATURA	HUMEDAD
Laboratorio y materiales a utilizar en la elaboración de cubos	No menos de 20,0 °C y no más de 27,5 °C	No inferior a 50%	21,0 °C	70%
Agua de mezclado, cámara de curado y habitación donde se efectuaron las mediciones	23,0 ± 2,0 °C	No menor al 95%	22,0 °C	No menor al 95%
Cámara u horno de almacenamiento	38,0 ± 2,0 °C	-----	37 °C	90%

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

6.2.2.3. Realización de mezclas en el laboratorio

Ajustadas temperaturas y humedades del laboratorio, calculadas las proporciones según norma; se procedió a la realización de los diseños de mezcla de las barras de mortero, cumpliendo todos los requerimientos de las Normas ASTM C-227 y ASTM C-305.

Figura 39. **Elaboración de barras de mortero en el laboratorio**



a. Pesada de arena volcánica



b. Pesada de cemento portland



c. Colocación de cemento y agua en la batidora



d. Mezclando todos los materiales en la batidora

Continuación de la figura 39.



e. Colocación de mortero en los moldes de barras para expansión



f. Apisonado de mortero en los moldes de barras para expansión



g. Razado del mortero de los moldes de barras para expansión



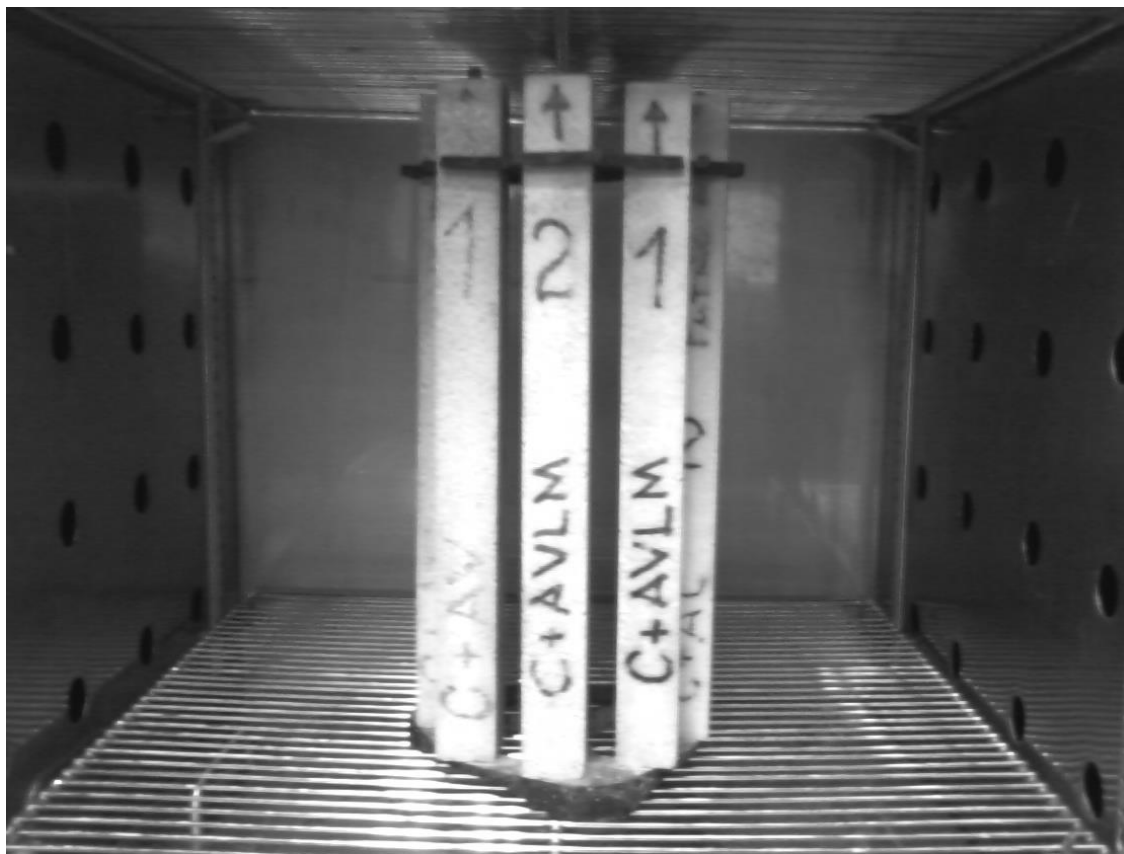
h. Barras de mortero terminadas

Fuente: laboratorio de Morteros. CII/USAC. 06 de marzo de 2011.

6.2.2.4. Curado de barras de mortero

Elaboradas las barras de mortero de cada una de las muestras, se procedió a desencofrar de los moldes a las 24 horas después de su fundición, se realiza su primera lectura y luego se colocan en un contenedor de barras, donde se colocan de forma vertical, y se introducen dentro de la cámara u horno de almacenamiento a la temperatura y humedad establecida por la norma, todas las muestras permanecen dentro de la cámara u horno hasta el momento de sus ensayos.

Figura 40. Curado de barras de mortero en horno de laboratorio



Fuente: laboratorio de Morteros. CII/USAC. 08 de marzo de 2012.

6.2.2.5. Edades de ensayo

Las edades recomendadas conforme la Norma ASTM C-1157 son 14 y 56 días, pero también recomienda muestrear a edades de 1, 2, 3, 4, 6, 9, y 12 meses; sin embargo para la realización de este trabajo, se muestrearon a 3, 7, 14, 28, 42, 56 días y a 3, 4, 5 y 6 meses.

6.2.2.6. Ensayo de medición de la expansión o contracción de barras de mortero

Después de su elaboración, las muestras se mantendrán en los moldes las primeras 24 ± 2 horas, cumplidas estas, las barras se retiran de los moldes y deberán ser protegidas contra la pérdida de humedad, se identificarán y se procederá a medir correctamente su longitud inicial.

Luego de realizar la medición inicial, se colocaran en un contenedor de barras y se introducirán en la cámara u horno de curado a una temperatura de $38,0 \pm 2,0$ grados centígrados y suficiente humedad. Cuando las muestras se ensayan en sus diferentes días se deberán de sacar por lo menos 16 horas antes de su medición y colocar dentro de una cámara de curado a una temperatura de $23,0 \pm 2,0$ grados centígrados, el día de su ensayo se deberá sacar las muestras y protegerlas contra la pérdida de humedad y realizar las mediciones.

Realizadas las mediciones, se deberán volver a colocar en el contenedor de barras e introducirse en la cámara u horno de curado a una temperatura de $38,0 \pm 2,0$ grados centígrados y suficiente humedad para mantenerse allí hasta sus próximas mediciones, haciéndolo de la misma forma que cuando se realizó la segunda medición.

Figura 41. **Ensayo de expansión o contracción de barra de mortero**



Fuente: laboratorio de Morteros. CII/USAC. 07 de marzo de 2012.

7. TABULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Ensayos físicos y químicos de la arena volcánica

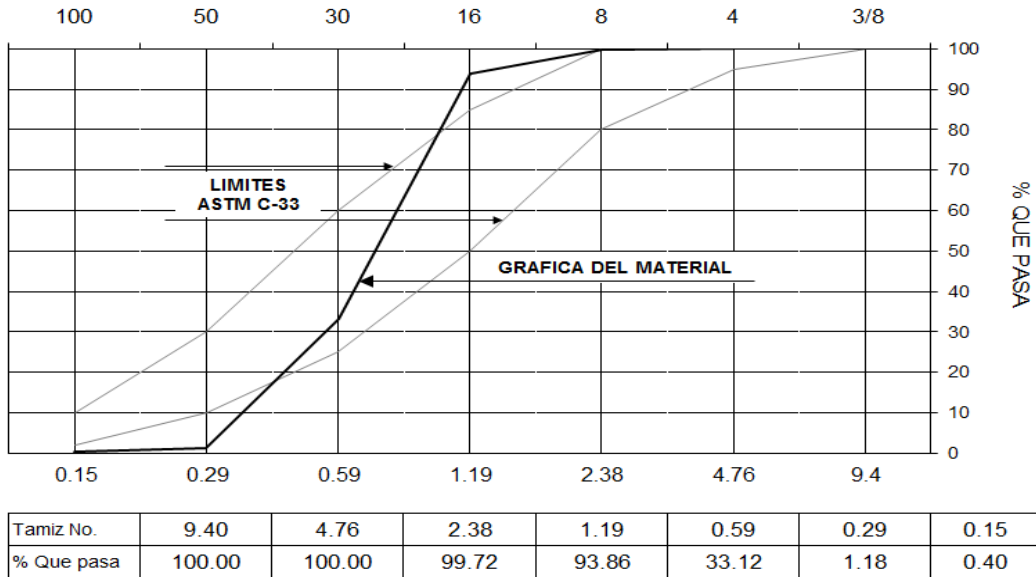
A continuación se presentan los resultados de los ensayos físicos de la arena volcánica sin ningún tipo de beneficio o tratamiento, siendo ensayada exactamente como el volcán la arrojo, estos ensayos se realizaron en fecha de 28 de mayo de 2012, por parte de la Sección de Agregados, Concreto y Morteros, del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla XVI. **Ensayos físicos de la arena volcánica recolectada inmediatamente después de la erupción**

ENSAYO	NORMA	RESULTADO
Peso específico	ASTM C-188	2,48 ± 0,05
Peso unitario suelto	ASTM C-29	912,18 ± 2,00 kg/m ³
Peso unitario compactado	ASTM C-29	944.42 ± 1,61 kg/m ³
Porcentaje de vacíos	ASTM C-29	60,71 %
Porcentaje de absorción	ASTM C-128	47,50 %
Porcentaje de humedad	ASTM C-566	2,76 %
Contenido de materia orgánica	ASTM C-40	1,00
Porcentaje retenido en tamiz # 6.35	-----	0,00 %
Porcentaje que pasa tamiz # 200	ASTM C-117	0,96 %
Módulo de finura	ASTM C-125	2,72

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Figura 42. **Granulometría de la arena volcánica sin ningún proceso**



Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos. Norma ASTM C-136.

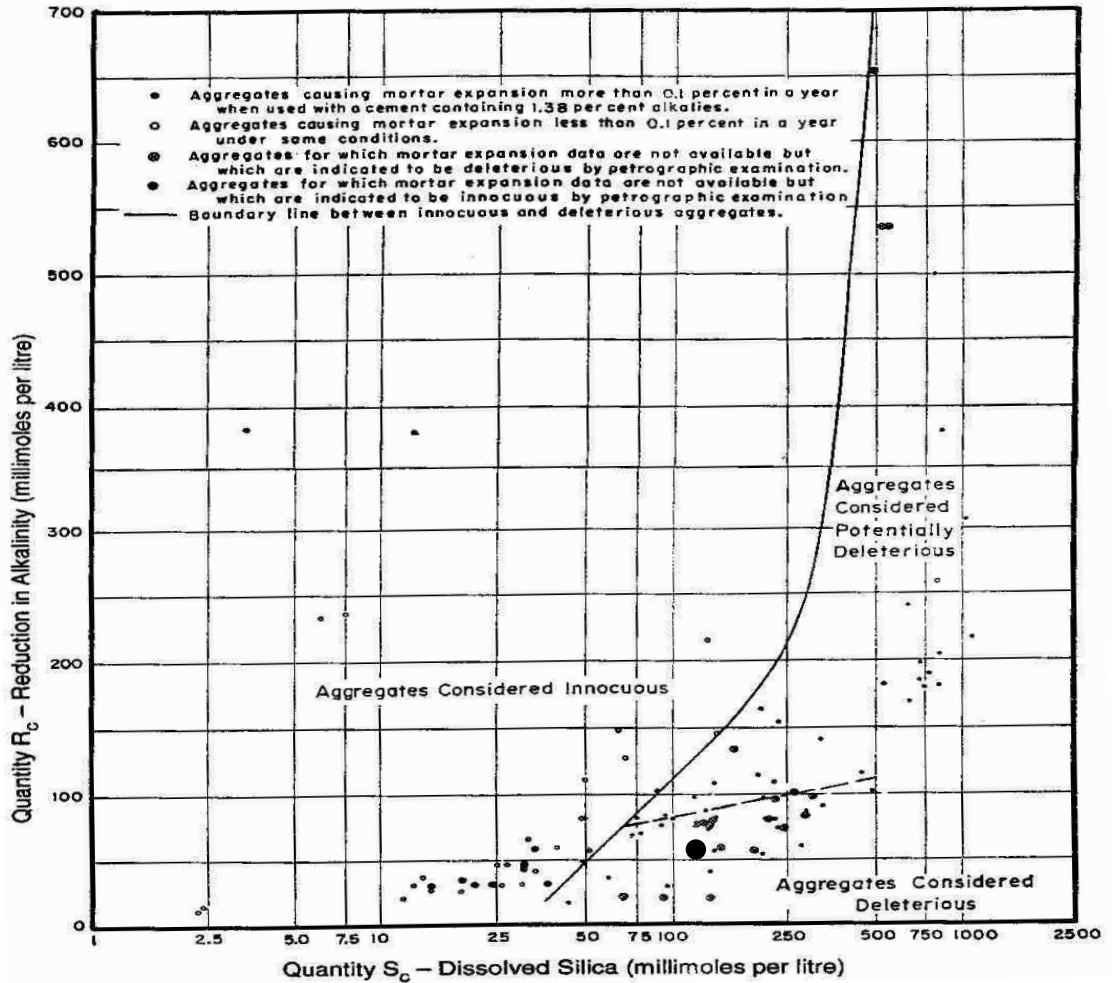
A continuación se presentan los ensayos químicos, estos fueron realizados en fecha 28 de mayo de 2010 por el Laboratorio Químico del Centro Tecnológico del Cemento, de Cementos Progreso.

Tabla XVII. **Ensayos químicos de la arena volcánica sin ningún proceso**

ENSAYO	RESULTADO	ENSAYO	RESULTADO
SiO ₂ , %	49,10	SO ₃ , %	0,00
Fe ₂ O ₃ , %	14,30	P ₂ O ₅ , %	0,00
Al ₂ O ₃ , %	18,48	TiO ₂ , %	0,00
CaO, %	8,85	Cr ₂ O ₃ , %	0,00
MgO, %	3,65	MnO, %	0,00
K ₂ O, %	0,82	LOI (950 °C) %	0,00
Na ₂ O, %	2,79	Total, %	97,99

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Figura 43. Gráfica de ensayo de reactividad potencial de la arena volcánica sin ningún proceso



Muestra	Reducción Alcalina (mmol/L)	Sílice Disuelta (mmol/L)	Resultado
Arena sin lavar	32,6 ± 2,01	110,0 ± 4,06	DELETÉREO

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos. Norma ASTM C-289.

Seguidamente se presentan los resultados de los ensayos físicos y químicos de la arena volcánica ajustada a Norma ASTM C-778 en sus diferentes tratamientos, dichos ensayos se realizaron en el Centro de Investigaciones de Ingeniería y en el Centro Tecnológico del Cemento, de Cementos Progreso.

Tabla XVIII. **Ensayos físicos de la arena volcánica con proceso sin lavar**

ENSAYO	NORMA	RESULTADO
Peso específico	ASTM C-188	2,67 ± 0,01
Peso unitario suelto	ASTM C-29	1160,00 ± 8,11 kg/m ³
Peso unitario compactado	ASTM C-29	1263.83 ± 0,71 kg/m ³
Porcentaje de vacíos	ASTM C-29	52,66 %
Porcentaje de absorción	ASTM C-128	31,73 %
Contenido de materia orgánica	ASTM C-40	2,00
Porcentaje retenido en tamiz # 6.35	-----	0,00 %
Porcentaje que pasa tamiz # 200	ASTM C-117	1,17 %
Módulo de finura	ASTM C-125	2,05

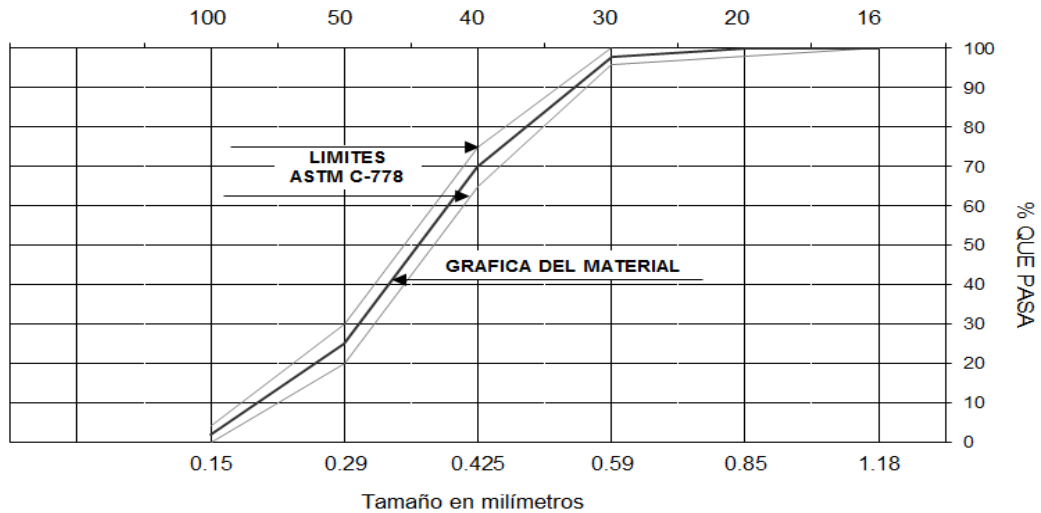
Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Tabla XIX. **Ensayos químicos de la arena volcánica con proceso sin lavar**

ENSAYO	RESULTADO	ENSAYO	RESULTADO
SiO ₂ , %	50,12	SO ₃ , %	0,00
Fe ₂ O ₃ , %	12,55	P ₂ O ₅ , %	0,00
Al ₂ O ₃ , %	17,45	TiO ₂ , %	1,24
CaO, %	8,88	Cr ₂ O ₃ , %	0,10
MgO, %	4,40	MnO, %	0,21
K ₂ O, %	0,89	LOI (950 °C) %	0,22
Na ₂ O, %	3,05	Total, %	99,11

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

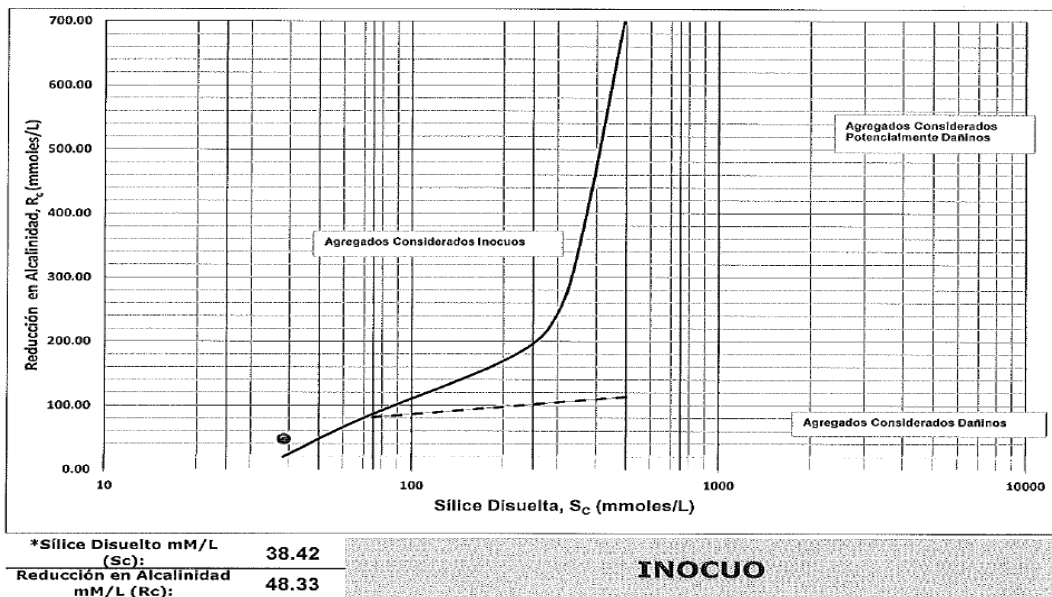
Figura 44. Granulometría de la arena volcánica con proceso sin lavar



Tamiz No.	1.18	0.85	0.59	0.425	0.29	0.15	Fondo
% Que pasa	100.00	100.00	98.00	70.00	25.00	2.00	0.00

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos. Norma ASTM C-778.

Figura 45. Gráfica de ensayo de reactividad potencial de la arena volcánica con proceso sin lavar



Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos. Norma ASTM C-289.

Tabla XX. **Ensayos físicos de la arena volcánica con proceso lavada manualmente**

ENSAYO	NORMA	RESULTADO
Peso específico	ASTM C-188	2,67 ± 0,01
Peso unitario suelto	ASTM C-29	1172,30 ± 3,39 kg/m ³
Peso unitario compactado	ASTM C-29	1269,89 ± 2,91 kg/m ³
Porcentaje de vacíos	ASTM C-29	52,44 %
Porcentaje de absorción	ASTM C-128	31,57 %
Contenido de materia orgánica	ASTM C-40	1,00
Porcentaje retenido en tamiz # 6.35	-----	0,00 %
Porcentaje que pasa tamiz # 200	ASTM C-117	0,33 %
Módulo de finura	ASTM C-125	2,05

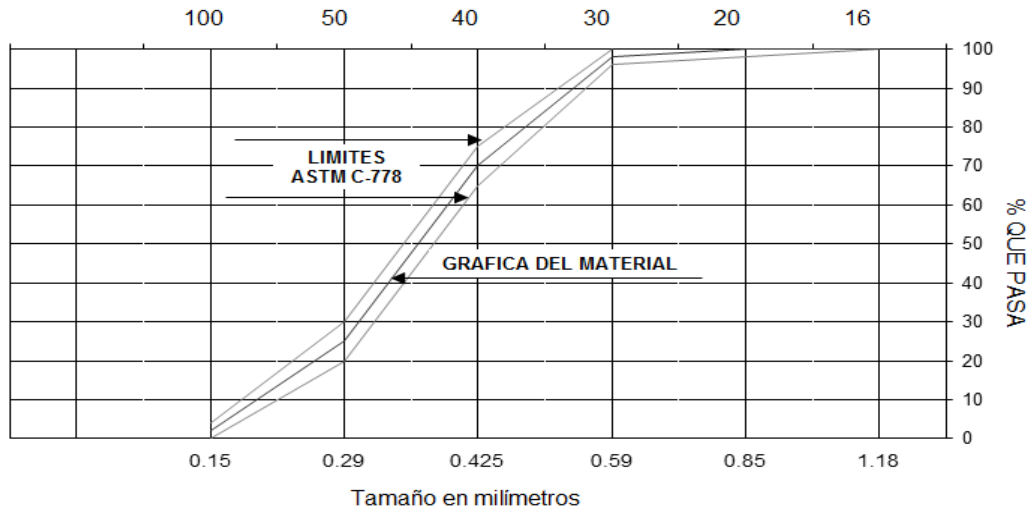
Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Tabla XXI. **Ensayos químicos de la arena volcánica con proceso lavada manualmente**

ENSAYO	RESULTADO	ENSAYO	RESULTADO
SiO ₂ , %	50,60	SO ₃ , %	0,00
Fe ₂ O ₃ , %	12,22	P ₂ O ₅ , %	0,00
Al ₂ O ₃ , %	17,52	TiO ₂ , %	1,25
CaO, %	8,93	Cr ₂ O ₃ , %	0,10
MgO, %	4,31	MnO, %	0,20
K ₂ O, %	0,89	LOI (950 °C) %	0,00
Na ₂ O, %	3,26	Total, %	99,28

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

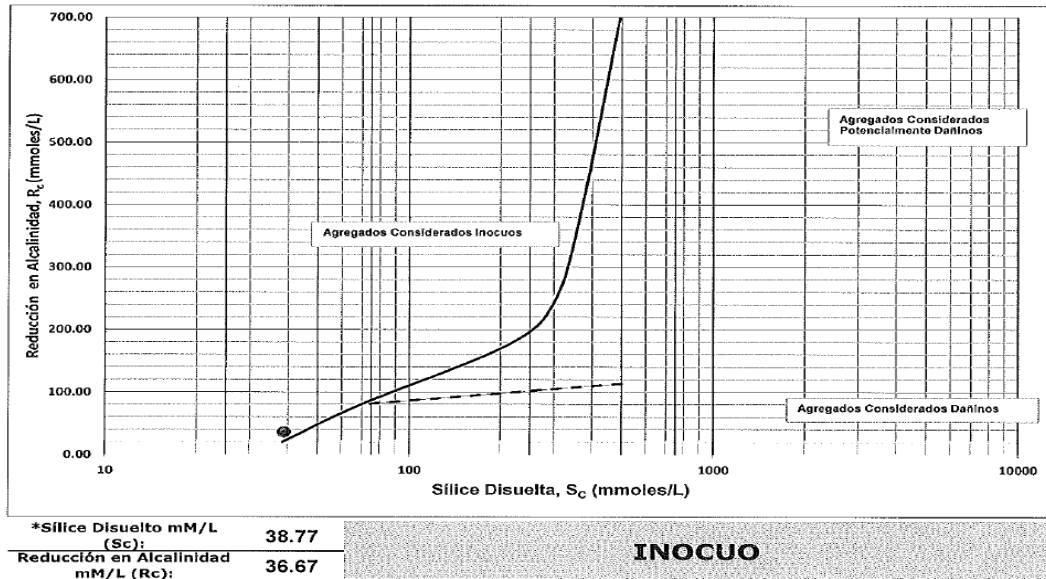
Figura 46. Granulometría de la arena volcánica con proceso lavada manualmente



Tamiz No.	1.18	0.85	0.59	0.425	0.29	0.15	Fondo
% Que pasa	100.00	100.00	98.00	70.00	25.00	2.00	0.00

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos. Norma ASTM C-778.

Figura 47. Gráfica de ensayo de reactividad potencial de la arena volcánica con proceso lavada manualmente



Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos. Norma ASTM C-289.

Tabla XXII. **Ensayos físicos de la arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo**

ENSAYO	NORMA	RESULTADO
Peso específico	ASTM C-188	2,67 ± 0,01
Peso unitario suelto	ASTM C-29	1164,18 ± 4,09 kg/m ³
Peso unitario compactado	ASTM C-29	1268,29 ± 2,38 kg/m ³
Porcentaje de vacíos	ASTM C-29	52,50 %
Porcentaje de absorción	ASTM C-128	31,46 %
Contenido de materia orgánica	ASTM C-40	1,00
Porcentaje retenido en tamiz # 6.35	-----	0,00 %
Porcentaje que pasa tamiz # 200	ASTM C-117	0,23 %
Módulo de finura	ASTM C-125	2,05

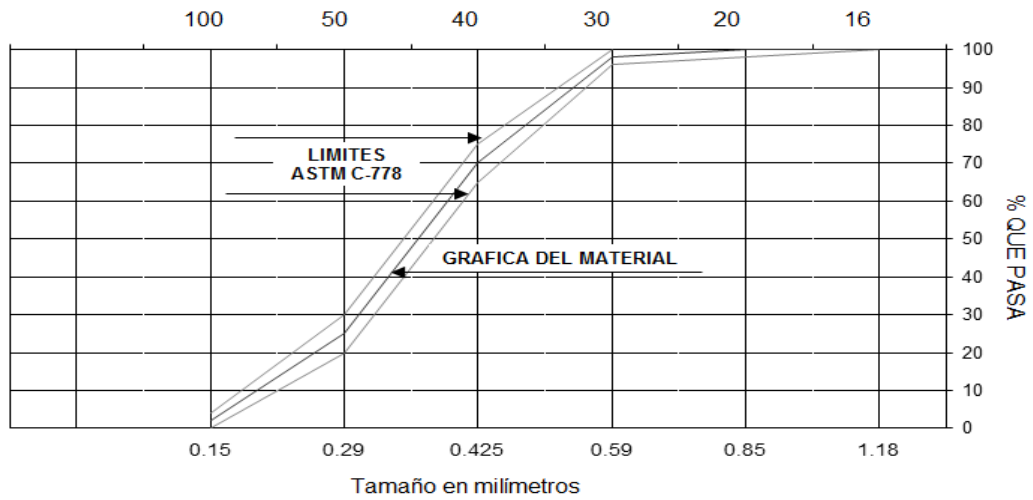
Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Tabla XXIII. **Ensayos químicos de la arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo**

ENSAYO	RESULTADO	ENSAYO	RESULTADO
SiO ₂ , %	51,15	SO ₃ , %	0,00
Fe ₂ O ₃ , %	12,23	P ₂ O ₅ , %	0,00
Al ₂ O ₃ , %	17,54	TiO ₂ , %	1,23
CaO, %	8,77	Cr ₂ O ₃ , %	0,10
MgO, %	4,02	MnO, %	0,21
K ₂ O, %	0,89	LOI (950 °C) %	0,00
Na ₂ O, %	3,21	Total, %	99,35

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

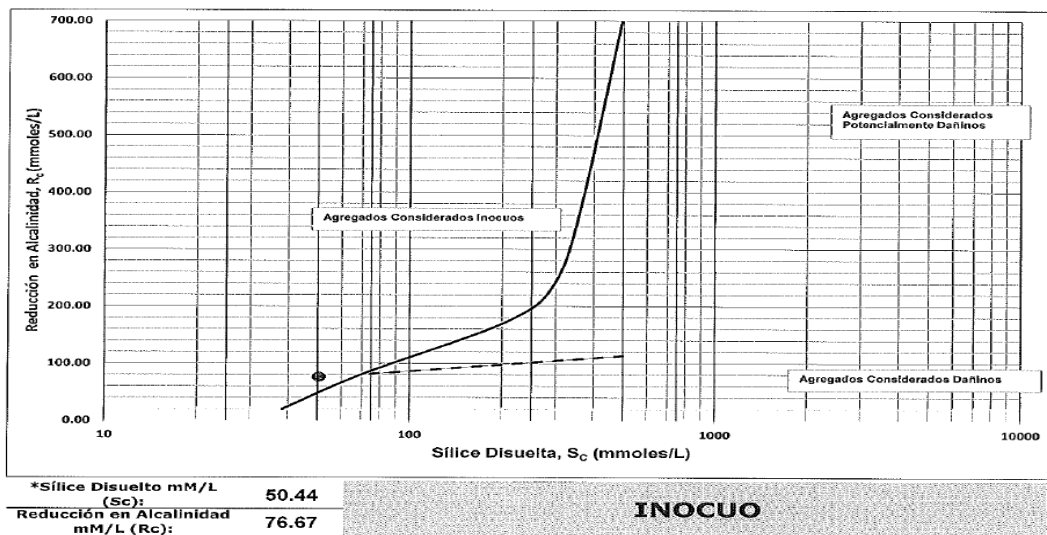
Figura 48. Granulometría de la arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo



Tamiz No.	1.18	0.85	0.59	0.425	0.29	0.15	Fondo
% Que pasa	100.00	100.00	98.00	70.00	25.00	2.00	0.00

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos. Norma ASTM C-778.

Figura 49. Gráfica de ensayo de reactividad potencial de la arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo



Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos. Norma ASTM C-289.

7.2. Ensayos físicos y químicos de la arena estándar Norma ASTM C-778

Así mismo dado a que no se conocen las características físicas, mecánicas y químicas de la arena estándar, se procedió a realizar los ensayos descritos en la Norma ASTM C-778 y ASTM C-33, dichos ensayos se realizaron en el Centro de Investigaciones de Ingeniería y en el Centro Tecnológico del Cemento, de Cementos Progreso.

Tabla XXIV. Ensayos físicos de la arena estándar Norma ASTM C-778

ENSAYO	NORMA	RESULTADO
Peso específico	ASTM C-128	2,68 ± 0,01
Peso unitario suelto	ASTM C-29	1615,87 ± 6,16 kg/m ³
Peso unitario compactado	ASTM C-29	1707,99 ± 2,72 kg/m ³
Porcentaje de vacíos	ASTM C-29	36,34 %
Porcentaje de absorción	ASTM C-128	18,67 %
Contenido de materia orgánica	ASTM C-40	1,00
Porcentaje retenido en tamiz # 6.35	-----	0,00 %
Porcentaje que pasa tamiz # 200	ASTM C-117	0,10 %
Módulo de finura	ASTM C-125	2,09

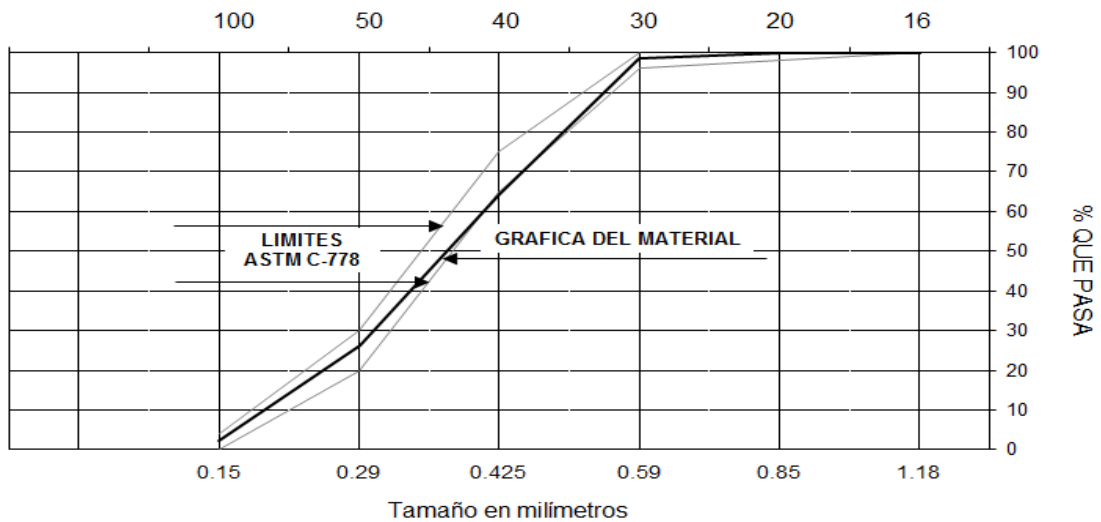
Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Tabla XXV. **Ensayos químicos de la arena estándar Norma ASTM C-778**

ENSAYO	RESULTADO	ENSAYO	RESULTADO
SiO ₂ , %	95,96	SO ₃ , %	0,00
Fe ₂ O ₃ , %	0,89	P ₂ O ₅ , %	0,00
Al ₂ O ₃ , %	0,06	TiO ₂ , %	0,03
CaO, %	1,15	Cr ₂ O ₃ , %	0,19
MgO, %	0,00	MnO, %	0,01
K ₂ O, %	0,04	LOI (950 °C) %	0,79
Na ₂ O, %	0,00	Total, %	99,12

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

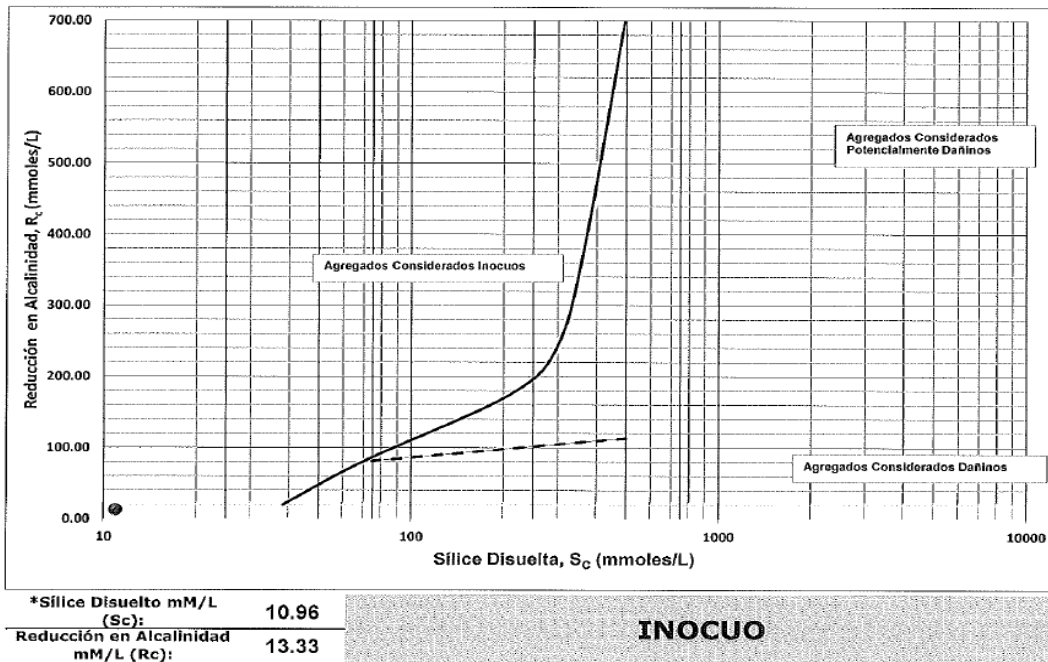
Figura 50. **Granulometría de la arena estándar Norma ASTM C-778**



Tamiz No.	1.18	0.85	0.59	0.425	0.29	0.15	Fondo
% Que pasa	100.00	99.90	98.54	64.29	26.41	2.33	0.00

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos. Norma ASTM C-778.

Figura 51. **Gráfica de ensayo de reactividad potencial de la arena estándar Norma ASTM C-778**



Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos. Norma ASTM C-289.

7.3. **Ensayos químicos al cemento Portland puzolánico Norma ASTM C-1157**

Al cemento, únicamente se le realizaron ensayos químicos y mecánicos, ya que sus características físicas no fueron evaluadas, sino se utilizaron las que ya se conocen por el fabricante, dichos ensayos se realizaron en el Centro de Investigaciones de Ingeniería y en el Centro Tecnológico del Cemento, de Cementos Progreso.

Tabla XXVI. **Ensayos químicos realizados al cemento**

ENSAYO	RESULTADO	ENSAYO	RESULTADO
SiO ₂ , %	33,03	SO ₃ , %	2,39
Fe ₂ O ₃ , %	2,68	P ₂ O ₅ , %	NA
Al ₂ O ₃ , %	7,45	TiO ₂ , %	NA
CaO, %	43,77	Cr ₂ O ₃ , %	NA
MgO, %	2,80	MnO, %	NA
K ₂ O, %	1,30	LOI (950 °C) %	5,10
Na ₂ O, %	1,25	Total, %	99,77

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

7.4. Ensayos mecánicos al cemento Portland puzolánico Norma ASTM C-1157

Dentro de las especificaciones por desempeño del cemento, descritas en la Norma ASTM C-1157, son de valiosa importancia los ensayos mecánicos, por lo que en el presente trabajo se procedió a evaluar la compresión, la tensión y reactividad álcali-agregado por medio de la barra de mortero.

7.4.1. Determinación de la resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico (usando cubos de 2 pulgadas de arista) Norma ASTM C-109

A continuación se presentan los resultados de la resistencia a compresión de la arena estándar, así como de la arena volcánica ajustada a Norma ASTM C-778 en sus diferentes tratamientos, estos ensayos se realizaron por parte de la Sección de Agregados, Concreto y Morteros, del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla XXVII. **Ensayo de la resistencia a la compresión de cubos de cemento y arena estándar**

Edad en días	Área [cm ²]	Carga [kg]	Esfuerzo [PSI]
3	25,982	3946,67	2160,33 ± 92,92
7	25,662	5213,33	2889,73 ± 68,52
14	25,922	6873,33	3771,39 ± 181,81
28	25,735	8080,00	4465,71 ± 12,15
42	25,837	8853,33	4873,57 ± 91,34
56	26,344	9480,00	5118,57 ± 46,39
70	26,208	9833,33	5336,94 ± 61,26
84	25,342	9813,33	5508,02 ± 50,50
91	26,084	10236,67	5581,87 ± 38,00

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Tabla XXVIII. **Ensayo de la resistencia a la compresión de cubos de cemento y arena volcánica con proceso sin lavar**

Edad en días	Área [cm ²]	Carga [kg]	Esfuerzo [PSI]
3	25,819	1200,00	661,23 ± 45,21
7	25,775	1793,33	989,79 ± 61,09
14	25,911	2238,33	1228,82 ± 82,39
28	25,539	2826,67	1574,17 ± 11,94
42	25,928	2943,33	1614,73 ± 28,47
56	25,841	3100,00	1706,26 ± 2,97
70	25,596	3350,00	1862,05 ± 46,36
84	25,956	3920,00	2148,19 ± 20,64
91	25,775	4040,00	2229,33 ± 15,17

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Tabla XXIX. **Ensayo de la resistencia a la compresión de cubos de cemento y arena volcánica con proceso y lavada manualmente**

Edad en días	Área [cm ²]	Carga [kg]	Esfuerzo [PSI]
3	25,183	1325,00	748,27 ± 31,43
7	25,874	1905,00	1047,16 ± 26,39
15	25,908	2411,67	1324,01 ± 2,47
28	25,826	3240,00	1784,20 ± 110,40
42	25,907	3533,33	1939,83 ± 27,84
56	25,284	3666,67	2062,60 ± 29,33
70	25,738	4120,00	2276,81 ± 12,98
84	25,608	4450,00	2471,61 ± 6,60
91	25,629	4580,00	2542,07 ± 53,64

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Tabla XXX. **Ensayo de la resistencia a la compresión de cubos de arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo**

Edad en días	Área [cm ²]	Carga [kg]	Esfuerzo [PSI]
3	25,151	1195,00	675,79 ± 2,25
7	25,937	1845,00	1011,79 ± 7,66
14	25,806	2343,33	1291,55 ± 2,28
28	25,767	2905,00	1603,56 ± 4,34
42	25,906	3266,67	1793,51 ± 3,83
56	25,324	3353,33	1883,35 ± 9,75
70	25,830	3878,33	2135,56 ± 13,80
85	25,617	4105,00	2279,19 ± 5,90
91	25,652	4363,33	2419,32 ± 1,70

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

7.4.2. Determinación de la resistencia a tensión de morteros de cemento hidráulico Norma ASTM C-190

A continuación se presentan los resultados de la resistencia a tensión de la arena estándar, así como de la arena volcánica ajustada a Norma ASTM C-778 en sus diferentes tratamientos, estos ensayos se realizaron por parte de la Sección de Agregados, Concreto y Morteros, del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla XXXI. Ensayo de la resistencia a la tensión de briquetas de cemento y arena estándar

Edad en días	Área [cm ²]	Carga [kg]	Esfuerzo [PSI]
3	6,484	217,50	216,40 ± 3,53
7	6,684	325,00	313,71 ± 0,54
14	6,662	387,50	375,25 ± 3,92
28	6,887	465,00	435,81 ± 9,34
42	6,720	505,00	484,83 ± 2,74
56	6,730	535,00	512,92 ± 12,65
70	6,688	547,50	528,14 ± 2,68
84	6,433	547,50	549,24 ± 10,99
91	6,566	560,00	550,23 ± 4,57

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Tabla XXXII. **Ensayo de la resistencia a la tensión de briquetas de cemento y arena volcánica con proceso sin lavar**

Edad en días	Área [cm ²]	Carga [kg]	Esfuerzo [PSI]
3	6,619	117,50	114,53 ± 3,67
7	6,441	162,50	162,78 ± 4,44
14	6,474	197,50	196,82 ± 2,32
28	6,614	245,00	239,01 ± 7,76
42	6,473	297,50	296,52 ± 4,60
56	6,493	317,50	315,45 ± 2,55
70	6,441	332,50	333,04 ± 4,66
84	6,306	340,00	347,84 ± 1,46
91	6,464	355,00	354,30 ± 4,11

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Tabla XXXIII. **Ensayo de la resistencia a la tensión de briquetas de cemento y arena volcánica con proceso y lavada manualmente**

Edad en días	Área [cm ²]	Carga [kg]	Esfuerzo [PSI]
3	6,294	117,50	120,43 ± 2,44
7	6,664	177,50	171,84 ± 0,63
14	6,648	212,50	206,23 ± 4,83
28	6,592	267,50	261,81 ± 4,18
42	6,643	340,00	330,20 ± 2,70
56	6,458	347,50	347,16 ± 2,09
70	6,436	372,50	373,42 ± 2,72
84	6,419	390,00	391,99 ± 2,68
91	6,387	402,50	406,60 ± 4,50

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Tabla XXXIV. **Ensayo de la resistencia a la tensión de briquetas de cemento y arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo**

Edad en días	Área [cm ²]	Carga [kg]	Esfuerzo [PSI]
3	6,604	120,00	117,24 ± 0,03
7	6,451	165,00	165,01 ± 0,46
14	6,455	202,50	202,4 ± 3,15
28	6,598	257,50	251,77 ± 3,10
42	6,483	317,50	315,94 ± 3,08
56	6,469	337,50	336,58 ± 4,09
70	6,445	355,00	355,34 ± 5,59
84	6,371	372,50	377,26 ± 6,32
91	6,410	392,50	395,08 ± 2,50

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

7.4.3. Determinación de la reactividad alcalina potencial de las combinaciones cemento y agregados (método de la barra de mortero) Norma ASTM C-227

A continuación se presentan los resultados del ensayo de expansión o contracción de barras de mortero, de la arena estándar, así como de la arena volcánica ajustada a Norma ASTM C-778 en sus diferentes tratamientos, estos ensayos se realizaron por parte de la Sección de Agregados, Concreto y Morteros, del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla XXXV. **Ensayo de reactividad alcalina potencial de las combinaciones cemento y agregados, por medio de la barra de mortero**

Edad en días	Cemento + arena estándar	Cemento + arena volcánica con proceso sin lavar	Cemento + arena volcánica con proceso y lavada manualmente	Cemento + arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo
3	0,0042 ± 0,00028 %	0,0102 ± 0,00028 %	0,0060 ± 0,00000 %	0,0068 ± 0,00000 %
7	0,0038 ± 0,00028 %	0,0098 ± 0,00028 %	0,0050 ± 0,00028 %	0,0058 ± 0,00003 %
14	0,0066 ± 0,00028 %	0,0118 ± 0,00028 %	0,0080 ± 0,00057 %	0,0102 ± 0,00001 %
28	0,0064 ± 0,00000 %	0,0134 ± 0,00028 %	0,0078 ± 0,00028 %	0,0090 ± 0,00003 %
42	-0,0058 ± 0,00028 %	-0,0484 ± 0,00057 %	-0,0460 ± 0,00000 %	-0,0466 ± 0,00008 %
56	-0,0126 ± 0,00014 %	-0,0670 ± 0,00028 %	-0,0596 ± 0,00000 %	-0,0614 ± 0,00003 %
90	-0,0202 ± 0,00028 %	-0,0702 ± 0,00028 %	-0,0662 ± 0,00028 %	-0,0682 ± 0,00003 %
120	-0,0254 ± 0,00028 %	-0,0798 ± 0,00028 %	-0,0710 ± 0,00028 %	-0,0764 ± 0,00006 %
150	-0,0302 ± 0,00028 %	-0,0894 ± 0,00028 %	-0,0740 ± 0,00113 %	-0,0850 ± 0,00003 %
180	-0,0346 ± 0,00085 %	-0,1136 ± 0,00057 %	-0,0884 ± 0,00057 %	-0,0902 ± 0,00003 %

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

Debe mencionarse que el ensayo de reactividad alcalina potencial de las combinaciones cemento-agregados, utilizando la barra de mortero el valor de expansión o contracción a los 14 días fue inferior al 0,02 por ciento, por lo que los agregados se considerarían no reactivos. Sin embargo al continuar el estudio de la expansión a los 56 días su expansión o contracción fue lenta, por lo que se realizó hasta los 180 días observando un aumento más notable en su expansión o contracción, lo que permite interpretar que el agregado es reactivo a largo plazo y que el ensayo mediante Norma ASTM C-227 se queda corto y no se adecua para este tipo de materiales ya que solo se evalúa hasta los 56 días.

7.5. Comparación de resultados obtenidos en laboratorio y Norma ASTM C-1157

A continuación se comparan los resultados obtenidos en el laboratorio y los requisitos de la tabla I, dentro de la Norma ASTM C-1157; especificaciones por desempeño del cemento *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*.

Tabla XXXVI. Comparación de resultados obtenidos en laboratorio y Norma ASTM C-1157

Ensayo		Norma	Valor patrón para Cemento UGC	Cemento + arena estándar	Cemento + arena volcánica con proceso sin lavar	Cemento + arena volcánica con proceso y lavada manualmente	Cemento + arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo
Resistencia a compresión mínima en PSI	1 día	ASTM C-109	---	---	---	---	---
	3 días		1890,00	2160,33	661,23	748,27	675,79
	7 días		2900,00	2889,73	989,79	1047,16	1011,79
	28 días		4060,00	4465,71	1574,17	1784,20	1603,56
	91 días		---	5581,87	2229,33	2542,07	2419,32
Expansión barra mortero	14 días, % máximo	ASTM C-227	0,0200	0,0066	0,0118	0,0080	0,0102
	56 días, % máximo		0,0600	-0,0126	-0,0670	-0,0596	-0,0614

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

CONCLUSIONES

1. Si se pudo realizar el estudio, el cual fue llevado a cabo con efectividad según diseño propuesto al inicio de este trabajo de investigación.
2. La arena volcánica expulsada por el volcán de Pacaya en fecha 27 de mayo de 2010, no cumple con las especificaciones descritas en la Norma ASTM C-33, siendo estas granulometría, peso unitario suelto, peso unitario compactado, porcentaje de vacíos y porcentaje de absorción.
3. Los resultados obtenidos al realizarse la determinación de reactividad potencial según Norma ASTM C-289, establece un cambio de deletéreo a inocuo con la realización del lavado intensivo al material volcánico.
4. Los resultados obtenidos en el ensayo de compresión de cubos de mortero Norma ASTM C-109 y de expansión de la barra de mortero Norma ASTM C-227, no cumplen con los requisitos establecidos en las especificaciones por desempeño del cemento según Norma ASTM C-1157.
5. La arena volcánica expulsada por el volcán de Pacaya en fecha 27 de mayo de 2010, posee alto porcentaje de absorción de agua en relación a la proporción agua/cemento de una arena estándar consecuentemente reduciendo la resistencia del mortero.

6. La evolución en la cinética de la reacción álcali-sílice de las arenas volcánicas expulsadas por el volcán de Pacaya en fecha 27 de mayo de 2010, es deletéreo debido a que la expansión negativa medida en las barras de mortero supera los límites establecidos en la Norma ASTM C-227 a partir de los 56 días.

7. El estudio realizado de las arenas volcánicas expulsadas por el volcán de Pacaya en fecha 27 de mayo de 2010, permite demostrar el carácter deletéreo de la reactividad álcali-sílice, tanto en evaluaciones de la barra de mortero en expansión y contracción, así como en cubos de mortero a compresión.

8. Se observa un amplio aumento en el valor porcentual al ampliar a 90 y 180 días el ensayo de reactividad alcalina potencial para las combinaciones cemento-agregados utilizando la barra de mortero, evidenciándose un incremento representativo en la reacción deletérea del material.

RECOMENDACIONES

1. No utilizar la arena volcánica expulsada por el volcán de Pacaya en fecha 27 de mayo de 2010, para uso en la construcción y elaboración de mezclas de morteros y concretos.
2. Realizar estudios para mitigar la inevitable expansión en los morteros o concretos elaborados con arenas volcánicas, utilizando un cemento bajo en álcalis.
3. Realizar estudios utilizando algunas puzolanas naturales, cenizas volantes, escoria granulada de alto horno y humo de sílice, en combinación con el cemento y agregados potencialmente deletéreos.
4. Realizar estudios utilizando aditivos químicos a base de hidróxido de litio, que disminuye considerablemente el contenido de álcalis, cuando se utilizan materiales potencialmente deletéreos.
5. Realizar estudios para caracterizar los materiales pétreos de los ríos que se ubican dentro de las cuencas hidrográficas para los volcanes más activos como volcán de Pacaya, de Fuego y Santiaguito.
6. Al realizar ensayos de reactividad alcalina potencial para las combinaciones cemento-agregados (método de la barra de mortero) Norma ASTM C-227, al ensayar las edades 14 y 56 días, ampliar el período de estudio a 90 y 180 días inclusive.

7. Caracterizar física, química y mecánicamente los agregados pétreos de los bancos de materiales que se encuentran en los alrededores del volcán de Pacaya, para su uso en la construcción.

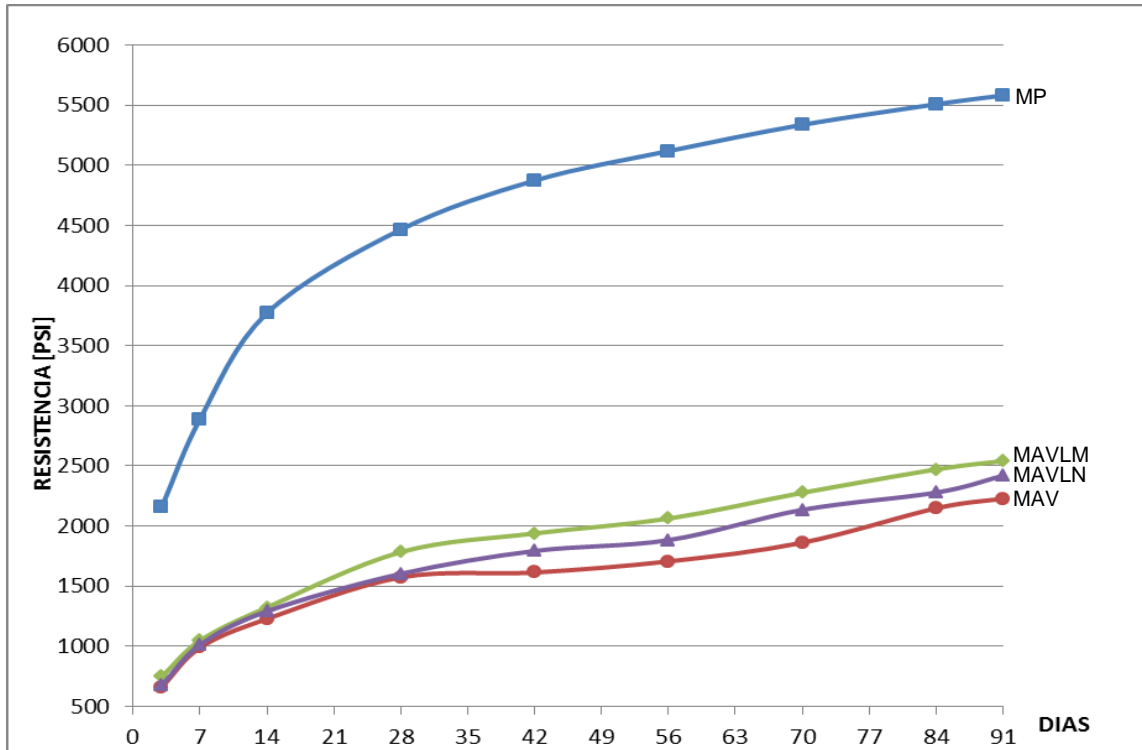
BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Materials. *Annual Book of ASTM Standards*. EEUU: ASTM, 1990. 804 p. Vol. 04.02.
2. Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería USAC. *Arancel*. Guatemala: Estudiantil Fénix, 2006. 41 p.
3. Departamento de Investigación y Servicios Geológicos. *Los volcanes*. Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, 2010. 12 p.
4. Instituto de Ingeniería UNAM, Comisión Federal de Electricidad. *Manual de Tecnología del Concreto*. México: Limusa/Grupo Noriega editores, 1994. 382 p. Vol. 3
5. KUMAR MEHTA, P.; J.M. MONTEIRO, Paulo. *Concreto: estructura, propiedades y materiales*. México: Prentice-Hall, 1998. p. 390. ISBN 968-464-083-8.
6. KOSMATKA, Steven H. et. Al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. Skokie, Illinois, EE.UU: Portland Cement Association, 2004. 468 p.
7. SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. *Tecnología del concreto y del mortero*. 5a. ed. Santa Fe de Bogotá, Colombia: Bhandar, 2001. 349 p.

8. SORIANO, J., Reactividad potencial de las rocas andesíticas de cabo de Gata (SE de España). En: *Estudios Geológicos*, 2010. vol. 66, núm. 1. Enero-junio p.83-90. ISSN: 0367-0449.

APÉNDICES

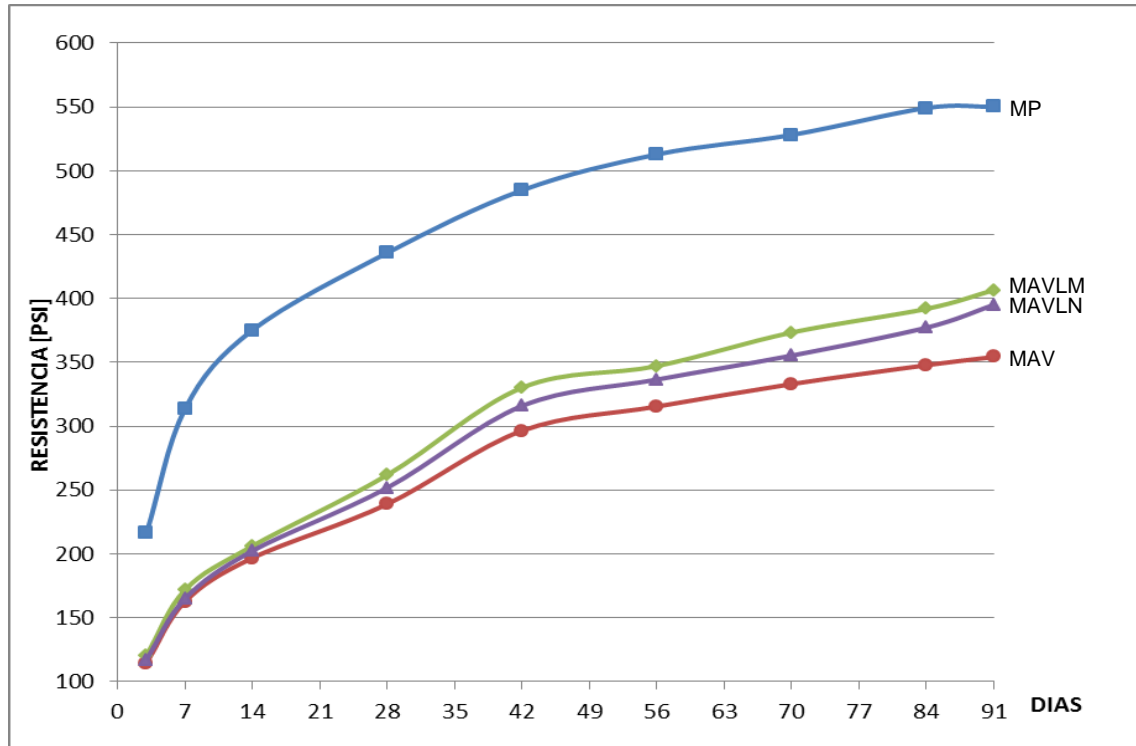
1. **Gráfica de la resistencia a la compresión de las 4 diferentes mezclas de mortero**



	Cemento + arena estándar (MP)	Cemento + arena volcánica sin lavar (MAV)	Cemento + arena volcánica lavada manualmente (MAVLM)	Cemento + arena volcánica lavada naturalmente (MAVLN)
Edad en días	Esfuerzo [PSI]	Esfuerzo [PSI]	Esfuerzo [PSI]	Esfuerzo [PSI]
3	2160,33	661,23	748,27	675,79
7	2889,73	989,79	1047,16	1011,79
14	3771,39	122,82	1324,01	1291,55
28	4465,71	1574,17	1784,20	1603,56
42	4873,57	1614,73	1939,83	1793,51
56	5118,57	1706,26	2062,60	1883,35
70	5336,94	1862,05	2276,81	2135,56
84	5508,02	2148,19	2471,61	2279,19
91	5581,87	2229,33	2542,07	2419,32

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

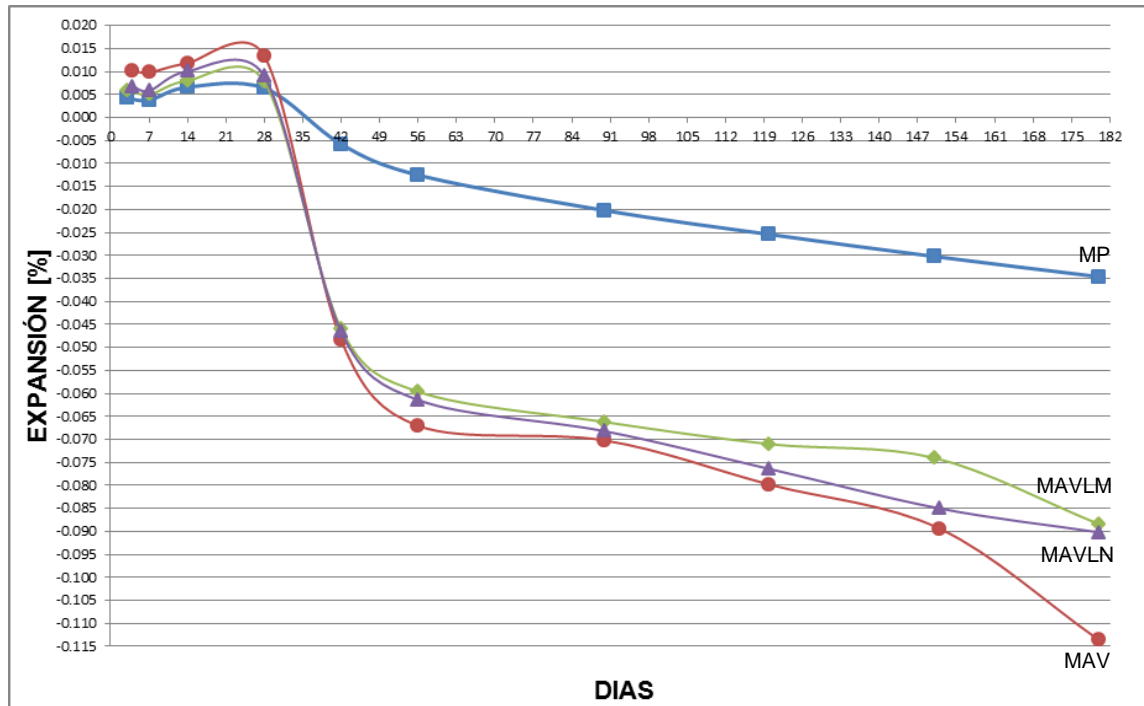
2. **Gráfica de la resistencia a la tensión de las 4 diferentes mezclas de mortero**



	Cemento + arena estándar (MP)	Cemento + arena volcánica sin lavar (MAV)	Cemento + arena volcánica lavada manualmente (MAVLM)	Cemento + arena volcánica lavada al intemperismo (MAVLN)
Edad en días	Esfuerzo [PSI]	Esfuerzo [PSI]	Esfuerzo [PSI]	Esfuerzo [PSI]
3	216,40	114,53	120,43	117,24
7	313,71	162,78	171,84	165,01
14	375,25	196,82	206,23	202,40
28	435,81	239,01	261,81	251,77
42	484,83	296,52	330,20	315,94
56	512,92	315,45	347,16	336,58
70	528,14	333,04	373,42	355,34
84	549,24	347,84	391,99	377,26
91	550,23	354,30	406,60	395,08

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

3. Gráfica de expansión de barras de las 4 diferentes mezclas de mortero



	Cemento + arena estándar (MP)	Cemento + arena volcánica sin lavar (MAV)	Cemento + arena volcánica lavada manualmente (MAVLM)	Cemento + arena volcánica lavada al intemperismo (MAVLN)
Edad en días	Expansión [%]	Expansión [%]	Expansión [%]	Expansión [%]
3	0,0042	0,0102	0,0060	0,0068
7	0,0038	0,0098	0,0050	0,0058
14	0,0066	0,0118	0,0080	0,0102
28	0,0064	0,0134	0,0078	0,0090
42	-0,0058	-0,0484	-0,0460	-0,0466
56	-0,0126	-0,0670	-0,0596	-0,0614
90	-0,0202	-0,0702	-0,0662	-0,0682
120	-0,0254	-0,0798	-0,0710	-0,0764
150	-0,0302	-0,0894	-0,0740	-0,0850
180	-0,0346	-0,1136	-0,0884	-0,0902

Fuente: elaboración propia, según resultados de ensayos.

ANEXOS

1. Informe del análisis químico del cemento UGC

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 celec@cempro.com		OT	19080
			FECHA	2012-07-26
			PÁGINA	1 DE 5
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO	Procedencia	PROYECTO: TESIS EDUARDO ENRIQUE MACHUCA GIL	
Dirección	15 AV. 18-01 FINCA LA PEDRERA ZONA 6	Muestra	CEMENTO UGC	
Contacto	ING. RODOLFO AGUILAR	Analista(s)	MARCOS GOMEZ	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2012-07-04	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS QUÍMICO

MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X*

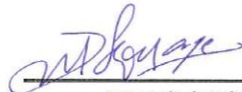
COMPOSICIÓN QUÍMICA **	
SiO _{2r} , %	33.03
Fe ₂ O _{3r} , %	2.68
Al ₂ O _{3r} , %	7.45
CaO, %	43.77
MgO, %	2.80
K ₂ O, %	1.30
Na ₂ O, %	1.25
SO _{3r} , %	2.39
P ₂ O _{5r} , %	NA
TiO _{2r} , %	NA
Cr ₂ O _{3r} , %	NA
MnO, %	NA
LOI (950 °C), %	5.10
Total, %	99.77

* El ensayo se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso.

** Expresada como porcentaje en masa (w/w).

*** Determinado Gravimétricamente. ASTM C 114


 Analista


 Ing. Mario de León.
 Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

SGL-CT-QC-IE-19/REV 0

2. Informe del análisis químico de la arena estándar

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@compro.com		OT	19080
			FECHA	2012-07-26
			PÁGINA	2 DE 5
			ÁREA DE LAB.	QC
Cilente	CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO	Procedencia	PROYECTO: TESIS EDUARDO ENRIQUE MACHUCA GIL	
Dirección	15 AV. 18-01 FINCA LA PEDRERA ZONA 6	Muestra	ARENA ESTANDAR 000	
Contacto	ING. RODOLFO AGUILAR	Analista(s)	MARCOS GOMEZ	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2012-09-17	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS QUÍMICO

MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X*


COMPOSICIÓN QUÍMICA **	
SiO ₂ , %	95.96
Fe ₂ O ₃ , %	0.89
Al ₂ O ₃ , %	0.06
CaO, %	1.15
MgO, %	0.00
K ₂ O, %	0.04
Na ₂ O, %	0.00
SO ₃ , %	0.00
P ₂ O ₅ , %	0.00
TiO ₂ , %	0.03
Cr ₂ O ₃ , %	0.19
MnO, %	0.01
LOI (950 °C), %	0.79
Total, %	99.12

* El ensayo se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso.

** Expresada como porcentaje en masa (w/w).

*** Determinado Gravimétricamente. ASTM C 114


 Analista


 Ing. Mario de León.
 Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

SGL-CT-QC-IE-19/REV 0

3. Informe del análisis químico de la arena volcánica con proceso sin lavar

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	19080
			FECHA	2012-07-26
			PÁGINA	3 DE 5
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO	Procedencia	PROYECTO: TESIS EDUARDO ENRIQUE MACHUCA GIL	
Dirección	15 AV. 18-01 FINCA LA PEDRERA ZONA 6	Muestra	ARENA 100	
Contacto	ING. RODOLFO AGUILAR	Analista(s)	MARCOS GOMEZ	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2012-09-17	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS QUÍMICO

MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X*


COMPOSICIÓN QUÍMICA **	
SiO ₂ , %	50.12
Fe ₂ O ₃ , %	12.55
Al ₂ O ₃ , %	17.45
CaO, %	8.88
MgO, %	4.40
K ₂ O, %	0.89
Na ₂ O, %	3.05
SO ₃ , %	0.00
P ₂ O ₅ , %	0.00
TiO ₂ , %	1.24
Cr ₂ O ₃ , %	0.10
MnO, %	0.21
LOI (950 °C), %	0.22
Total, %	99.11

* El ensayo se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad de Cements Progreso.

** Expresada como porcentaje en masa (w/w).

*** Determinado Gravimétricamente. ASTM C 114


Analista


Ing. Mario de León.
Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

SGL-CT-QC-IE-19/REV 0

4. Informe del análisis químico de la arena volcánica con proceso y lavada manualmente

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	19080
			FECHA	2012-07-26
			PÁGINA	4 DE 5
			ÁREA DE LAB.	QC
Cilente	CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO	Procedencia	PROYECTO: TESIS EDUARDO ENRIQUE MACHUCA GIL	
Dirección	15 AV. 18-01 FINCA LA PEDRERA ZONA 6	Muestra	ARENA 200	
Contacto	ING. RODOLFO AGUILAR	Analista(s)	MARCOS GOMEZ	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2012-09-17	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS QUÍMICO

MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X*

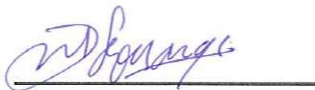
COMPOSICIÓN QUÍMICA **	
SiO ₂ , %	50.60
Fe ₂ O ₃ , %	12.22
Al ₂ O ₃ , %	17.52
CaO, %	8.93
MgO, %	4.31
K ₂ O, %	0.89
Na ₂ O, %	3.26
SO ₃ , %	0.00
P ₂ O ₅ , %	0.00
TiO ₂ , %	1.25
Cr ₂ O ₃ , %	0.10
MnO, %	0.20
LOI (950 °C), %	0.00
Total, %	99.28

* El ensayo se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso.

** Expresada como porcentaje en masa (w/w).

*** Determinado Gravimétricamente, ASTM C 114


 Analista



 Ing. Mario de León.
 Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

SGL-CT-QC-IE-19/REV 0

5. Informe del análisis químico de la arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@compro.com		OT	19080
			FECHA	2012-07-26
			PÁGINA	5 DE 5
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO	Procedencia	PROYECTO: TESIS EDUARDO ENRIQUE MACHUCA GIL	
Dirección	15 AV. 18-01 FINCA LA PEDRERA ZONA 6	Muestra	ARENA 300	
Contacto	ING. RODOLFO AGUILAR	Analista(s)	MARCOS GOMEZ	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2012-09-17	


INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS QUÍMICO

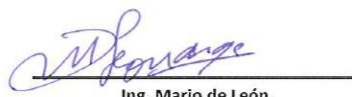
*MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

COMPOSICIÓN QUÍMICA **	
SiO ₂ , %	51.15
Fe ₂ O ₃ , %	12.23
Al ₂ O ₃ , %	17.54
CaO, %	8.77
MgO, %	4.02
K ₂ O, %	0.89
Na ₂ O, %	3.21
SO ₃ , %	0.00
P ₂ O ₅ , %	0.00
TiO ₂ , %	1.23
Cr ₂ O ₃ , %	0.10
MnO, %	0.21
LOI (950 °C), %	0.00
Total, %	99.35

* El ensayo se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso.
 ** Expresada como porcentaje en masa (w/w).
 *** Determinado Gravimétricamente. ASTM C 114



Analista



Ing. Mario de León.
Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

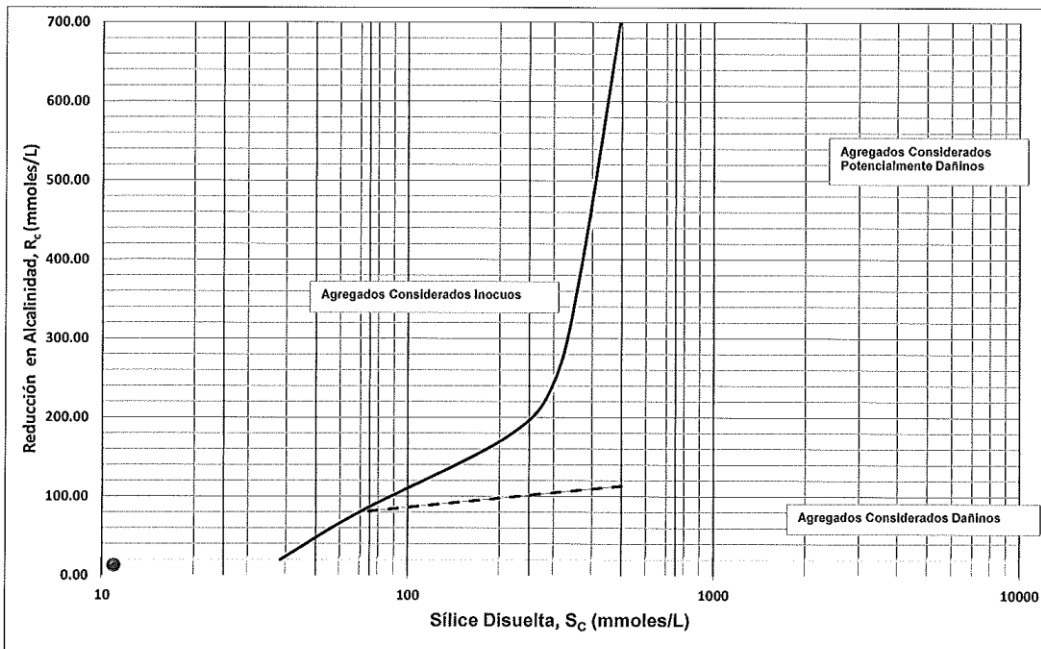
SGL-CT-QC-IE-19/REV 0

6. Informe del ensayo de la reactividad potencial de la arena estándar
Norma ASTM C-778

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	19080
			FECHA	2012-07-26
			PÁGINA	1 DE 4
			ÁREA DE LAB.	QC
Cilente	CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO	Procedencia	PROYECTO	
Dirección	15 AV. 18-01 Z. 6 PLANTA LA PEDRERA	Muestra	ARENA ESTANDAR 000	
Contacto	RODOLFO AGUILAR	Analista(s)	MARCOS GÓMEZ	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2012-07-31 / 2012-08-01	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

REACTIVIDAD POTENCIAL ALCALI SÍLICE DE LOS AGREGADOS
MÉTODO QUÍMICO ASTM C 289



*Silice Disuelto mM/L (Sc):	10.96	INOCUO
Reducción en Alcalinidad mM/L (Rc):	13.33	

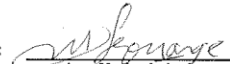
*Determinado mediante Espectrofotometría UV - VIS.

Observaciones: Muestra trabajada como la presento el cliente

ANALISTA:



AUTORIZADO POR:


 Ing. Mario de León
 Jefe de Laboratorio

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

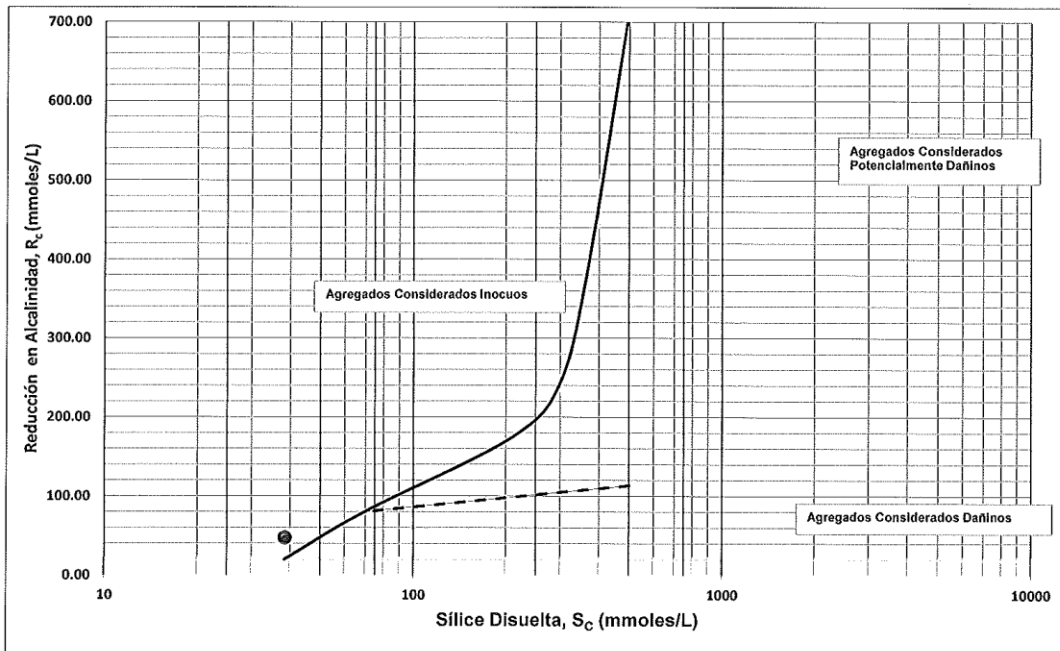
SGL-CT-QC-IE-03/REV 03

7. Informe del ensayo de la reactividad potencial de la arena volcánica con proceso sin lavar

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cotec@cempro.com		OT	19080
			FECHA	2012-07-26
			PÁGINA	2 DE 4
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO	Procedencia	PROYECTO	
Dirección	15 AV. 18-01 Z. 6 PLANTA LA PEDRERA	Muestra	ARENA 100	
Contacto	RODOLFO AGUILAR	Analista(s)	MARCOS GÓMEZ	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2012-08-01 / 2012-08-02	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

REACTIVIDAD POTENCIAL ÁLCALI SÍLICE DE LOS AGREGADOS
MÉTODO QUÍMICO ASTM C 289



*Silice Disuelto mM/L (Sc): **38.42**
 Reducción en Alcalinidad mM/L (Rc): **48.33**


INOCUO

*Determinado mediante Espectrofotometría UV - VIS.
 Observaciones: Muestra trabajada como la presento el cliente

ANALISTA:



AUTORIZADO POR:


 Ing. Mario de León
 Jefe de Laboratorio

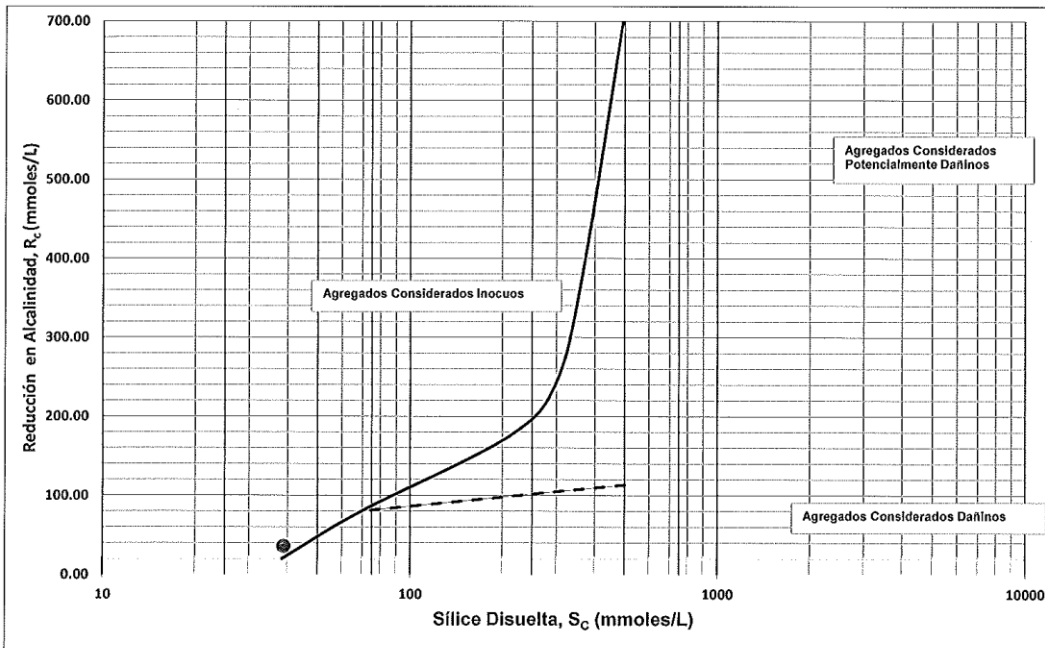
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

SGL-CT-QC-IE-03/REV 03

8. Informe del ensayo de la reactividad potencial de la arena volcánica con proceso y lavada manualmente

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	19080
			FECHA	2012-07-26
			PÁGINA	3 DE 4
			ÁREA DE LAB.	QC
Cilente	CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO	Procedencia	PROYECTO	
Dirección	15 AV. 18-01 Z. 6 PLANTA LA PEDRERA	Muestra	ARENA 200	
Contacto	RODOLFO AGUILAR	Analista(s)	MARCOS GÓMEZ	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2012-08-01 / 2012-08-02	


INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO
REACTIVIDAD POTENCIAL ÁLCALI SÍLICE DE LOS AGREGADOS
MÉTODO QUÍMICO ASTM C 289



*Silice Disuelto mM/L (Sc):	38.77	INOCUO
Reducción en Alcalinidad mM/L (Rc):	36.67	

*Determinado mediante Espectrofotometría UV - VIS.
 Observaciones: Muestra trabajada como la presento el cliente

ANALISTA: 

AUTORIZADO POR: 
 Ing. Mario de León
 Jefe de Laboratorio

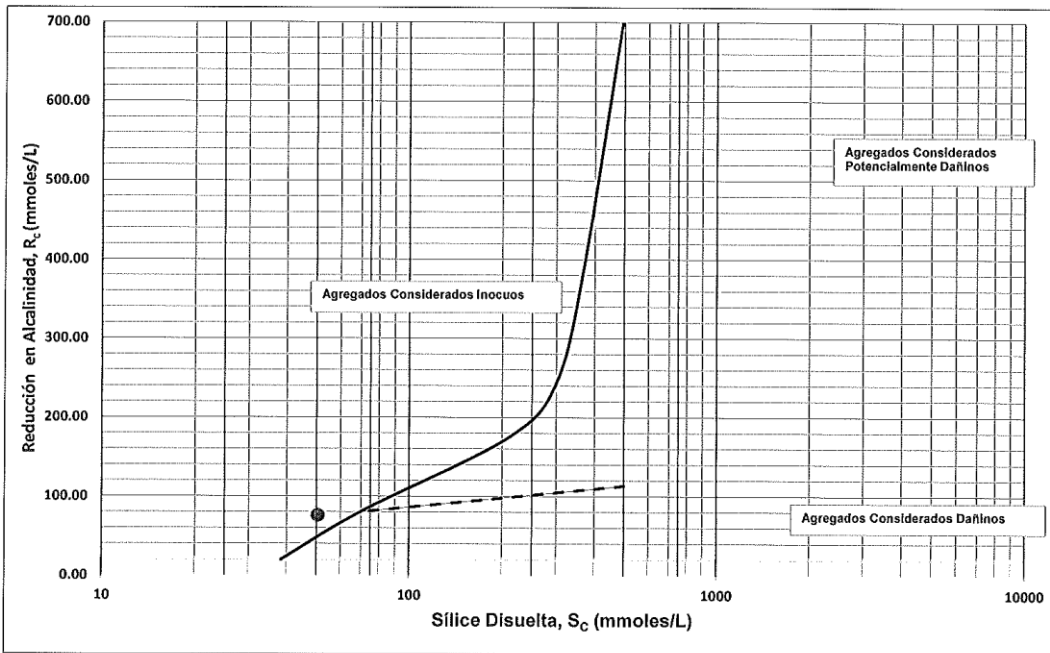
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

9. Informe del ensayo de la reactividad potencial de la arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	19080
			FECHA	2012-07-26
			PÁGINA	4 DE 4
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO	Procedencia	PROYECTO	
Dirección	15 AV. 18-01 Z. 6 PLANTA LA PEDRERA	Muestra	ARENA 300	
Contacto	RODOLFO AGUILAR	Analista(s)	MARCOS GÓMEZ	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2012-08-07 / 2012-08-08	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

REACTIVIDAD POTENCIAL ÁLCALI SÍLICE DE LOS AGREGADOS
MÉTODO QUÍMICO ASTM C 289

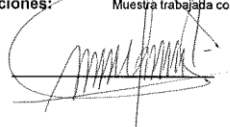


*Silice Disuelto mM/L (Sc): **50.44**
 Reducción en Alcalinidad mM/L (Rc): **76.67**

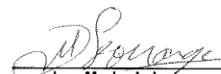
INOCUO

*Determinado mediante Espectrofotometría UV - VIS.
 Observaciones: Muestra trabajada como la presento el cliente

ANALISTA:



AUTORIZADO POR:


 Ing. Mario de León
 Jefe de Laboratorio

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

SGL-CT-QC-IE-03/REV 03

10. Informe del análisis químico-mineralógico de la arena volcánica

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES
DE ENERGÍA Y MINAS
- CESEM -
Tel.: 24 18 91 39

Guatemala, 16 de abril de 2013.

Señor
Eduardo Enrique Machuca Gil
Estudiante de Ingeniería Civil
Camé: 2001 13256
Facultad de Ingeniería/USAC

Señor Machuca:

Por este medio me es grato saludarle y desearle éxito en las actividades que realiza. Al mismo tiempo me permito presentarle el Informe de Análisis Químico-Mineralógico, de la muestra de ceniza volcánica proveniente del Volcán de Pacaya, para ser anexado a su trabajo de tesis "EVALUACIÓN Y ESTUDIO DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO, MECÁNICAS Y QUÍMICAS DERIVADAS DE LA INTERACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO CON EL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO NORMA ASTM C-1157, UTILIZANDO COMO AGREGADO LA ARENA PROCEDENTE DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN DE PACAYA DE FECHA 27 DE MAYO 2010".

Presentación: MATERIAL GRANULAR.
Color: OBSCURO (NEGRO).
Estructura: VESICULAR-ESCORIACEA (microscópica).
Composición Química: ES UNA ROCA BÁSICA (FERROMAGNESIANA): SiO₂ entre 45% y 52% (como indicador). Para su clasificación se tomaron en cuenta también los contenidos de Aluminio, Hierro, Magnesio, Calcio, Sodio, Potasio y Titanio.
Composición Mineralógica: FRAGMENTO VOLCÁNICO, compuesto principalmente por piroxeno y olivinos.
Nombre: PIROCLASTOS BASÁLTICOS ESCORIACEOS.


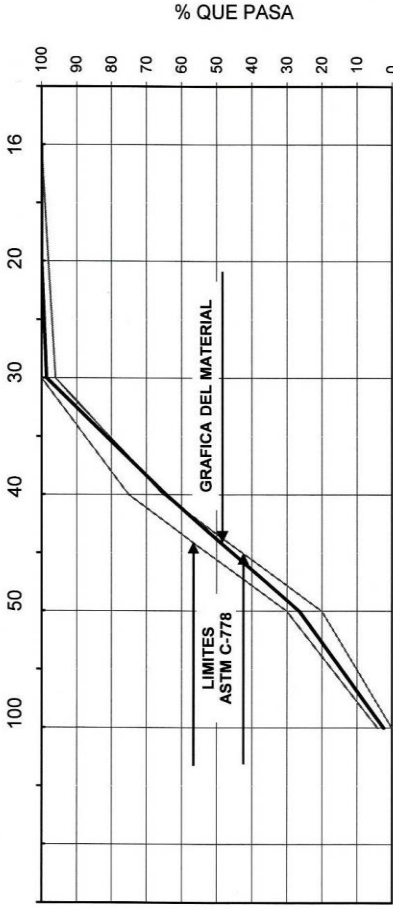
Atentamente,

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"


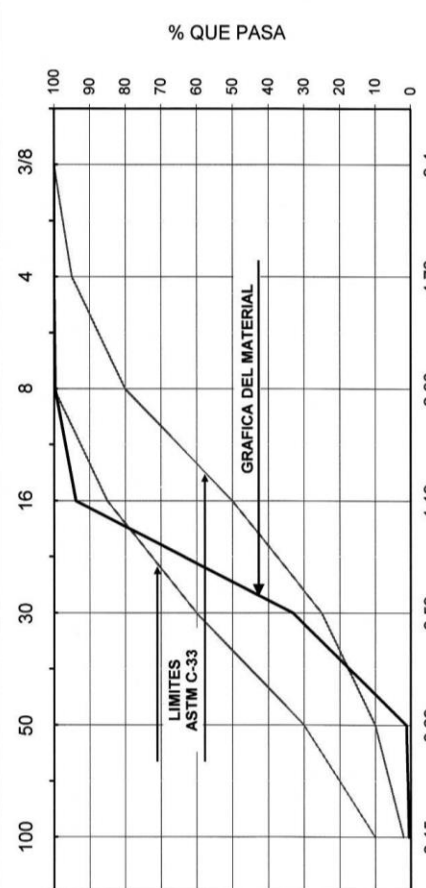
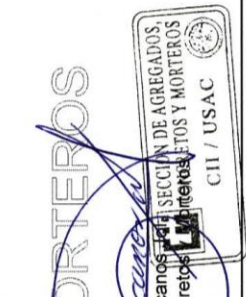
Ing. Julio Roberto Luna Aroche
DIRECTOR
CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ENERGÍA Y MINAS -CESEM-




11. Informe del ensayo del análisis completo de la arena estándar

 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA	AGREGADO FINO PARA CONCRETO	INTERESADO: Eduardo Enrique Machuca Gil carné No. 2001-13256	INFORME No. S.C. - 318 1/4	PROYECTO: Tesis "Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland Puzolánico Norma ASTM C-1157, utilizando como agregado la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya de fecha 27 de mayo de 2010"	MUESTRA: Arena Estándar ASTM C-778	O.T. No. 27829	LAB.: Agregados, Concretos y Morteros																															
CARACTERISTICAS FISICAS: <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Peso Especifico</td><td style="text-align: right;">2.68</td></tr> <tr><td>Peso Unitario (kg/m³)</td><td style="text-align: right;">1707.99</td></tr> <tr><td>Peso Unitario Suelto (kg/m³)</td><td style="text-align: right;">1615.87</td></tr> <tr><td>Porcentaje de Vacios</td><td style="text-align: right;">36.34</td></tr> <tr><td>Porcentaje de Absorción</td><td style="text-align: right;">18.67</td></tr> <tr><td>Contenido de Materia Orgánica</td><td style="text-align: right;">1</td></tr> <tr><td>% Retenido en Tamiz 6.35</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>% que pasa Tamiz 200</td><td style="text-align: right;">0.10</td></tr> <tr><td>Modulo de Finura</td><td style="text-align: right;">2.09</td></tr> </table>		Peso Especifico	2.68	Peso Unitario (kg/m ³)	1707.99	Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1615.87	Porcentaje de Vacios	36.34	Porcentaje de Absorción	18.67	Contenido de Materia Orgánica	1	% Retenido en Tamiz 6.35	0	% que pasa Tamiz 200	0.10	Modulo de Finura	2.09			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Tamiz No.</td> <td>1.18</td> <td>0.85</td> <td>0.59</td> <td>0.425</td> <td>0.29</td> <td>0.15</td> <td>Fondo</td> </tr> <tr> <td>% Que pasa</td> <td>100.00</td> <td>99.90</td> <td>98.54</td> <td>64.29</td> <td>26.41</td> <td>2.33</td> <td>0.00</td> </tr> </table>	Tamiz No.	1.18	0.85	0.59	0.425	0.29	0.15	Fondo	% Que pasa	100.00	99.90	98.54	64.29	26.41	2.33	0.00
Peso Especifico	2.68																																					
Peso Unitario (kg/m ³)	1707.99																																					
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1615.87																																					
Porcentaje de Vacios	36.34																																					
Porcentaje de Absorción	18.67																																					
Contenido de Materia Orgánica	1																																					
% Retenido en Tamiz 6.35	0																																					
% que pasa Tamiz 200	0.10																																					
Modulo de Finura	2.09																																					
Tamiz No.	1.18	0.85	0.59	0.425	0.29	0.15	Fondo																															
% Que pasa	100.00	99.90	98.54	64.29	26.41	2.33	0.00																															
OBSERVACIONES: a) Muestra proporcionada por el interesado. b) Contenido de materia orgánica máximo permisible No. 3.		Tamaño en milímetros		Inga. Dilma Yañet-Mejicanos Jefa Sección Agregados, Concretos y Morteros																																		
Vo.Bo. Inga. Telma Maricela Caño Morales Directora CII/USAC		Inga. Dilma Yañet-Mejicanos Jefa Sección Agregados, Concretos y Morteros		Inga. Dilma Yañet-Mejicanos Jefa Sección Agregados, Concretos y Morteros																																		

12. Informe del ensayo del análisis completo de la arena volcánica como cayo

 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA	AGREGADO FINO PARA CONCRETO	INFORME No. S.C. - 317	PROYECTO: Tesis "Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland Puzolánico Norma ASTM C-1157, utilizando como agregado la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya de fecha 27 de mayo de 2010"																				
INTERESADO: Eduardo Enrique Machuca Gil carné No. 2001-13256	MUESTRA: Arena Volcanica	FECHA: 23/04/2013	LAB.: Concretos																				
CARACTERISTICAS FISICAS:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Peso Especifico</td><td style="text-align: right;">2.40</td></tr> <tr><td>Peso Unitario (kg/m³)</td><td style="text-align: right;">944.42</td></tr> <tr><td>Peso Unitario Suelto (kg/m³)</td><td style="text-align: right;">912.18</td></tr> <tr><td>Porcentaje de Vacíos</td><td style="text-align: right;">60.71</td></tr> <tr><td>Porcentaje de Absorción</td><td style="text-align: right;">47.50</td></tr> <tr><td>Porcentaje de Humedad</td><td style="text-align: right;">2.76</td></tr> <tr><td>Contenido de Materia Orgánica</td><td style="text-align: right;">1</td></tr> <tr><td>% Retenido en Tamiz 6.35</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>% que pasa Tamiz 200</td><td style="text-align: right;">0.96</td></tr> <tr><td>Modulo de Finura</td><td style="text-align: right;">2.72</td></tr> </table>	Peso Especifico	2.40	Peso Unitario (kg/m ³)	944.42	Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	912.18	Porcentaje de Vacíos	60.71	Porcentaje de Absorción	47.50	Porcentaje de Humedad	2.76	Contenido de Materia Orgánica	1	% Retenido en Tamiz 6.35	0	% que pasa Tamiz 200	0.96	Modulo de Finura	2.72		
Peso Especifico	2.40																						
Peso Unitario (kg/m ³)	944.42																						
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	912.18																						
Porcentaje de Vacíos	60.71																						
Porcentaje de Absorción	47.50																						
Porcentaje de Humedad	2.76																						
Contenido de Materia Orgánica	1																						
% Retenido en Tamiz 6.35	0																						
% que pasa Tamiz 200	0.96																						
Modulo de Finura	2.72																						
OBSERVACIONES:	a) Muestra recolectada el 28/05/2010 b) Contenido de materia orgánica máximo permisible No. 3 c) Procedencia: arena del Volcán de Pacaya recolectada en las instalaciones de la USAC																						
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Tamiz No.</td> <td style="text-align: right;">9.40</td> <td style="text-align: right;">4.76</td> <td style="text-align: right;">2.38</td> <td style="text-align: right;">1.19</td> <td style="text-align: right;">0.59</td> <td style="text-align: right;">0.29</td> <td style="text-align: right;">0.15</td> </tr> <tr> <td>% Que pasa</td> <td style="text-align: right;">100.00</td> <td style="text-align: right;">100.00</td> <td style="text-align: right;">99.72</td> <td style="text-align: right;">93.86</td> <td style="text-align: right;">33.12</td> <td style="text-align: right;">1.18</td> <td style="text-align: right;">0.40</td> </tr> </table>	Tamiz No.	9.40	4.76	2.38	1.19	0.59	0.29	0.15	% Que pasa	100.00	100.00	99.72	93.86	33.12	1.18	0.40	Vo.Bo. Inga. Teima Marcela Cano Morales: IOM Directora CII/USAC				
Tamiz No.	9.40	4.76	2.38	1.19	0.59	0.29	0.15																
% Que pasa	100.00	100.00	99.72	93.86	33.12	1.18	0.40																
																							

14. Informe del ensayo del análisis completo de la arena volcánica con proceso y lavada manualmente

 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA	AGREGADO FINO PARA CONCRETO	INFORME No. S.C. - 318 3/4	PROYECTO: Tesis "Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland Puzolánico Norma ASTM C-1157, utilizando como agregado la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya de fecha 27 de mayo de 2010"	LAB.: Agregados, Concretos y Morteros
INTERESADO: Eduardo Enrique Machuca Gil, carné No. 2001-13256	MUESTRA: Arena volcánica con proceso y lavada manualmente	FECHA: 24/04/2013	O.T. No. 27829	
CARACTERISTICAS FISICAS:				
Peso Especifico	2.67			
Peso Unitario (kg/m ³)	1269.86			
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1172.30			
Porcentaje de Vacios	52.44			
Porcentaje de Absorción	31.57			
Contenido de Materia Orgánica	1			
% Retenido en Tamiz 6.35	0			
% que pasa Tamiz 200	0.33			
Modulo de Finura	2.05			

100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.15	0.29	0.43	0.59	0.85	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
Tamaño en milímetros										

Tamiz No.	1.18	0.85	0.59	0.425	0.29	0.15	Fondo
% Que pasa	100.00	100.00	98.00	70.00	25.00	2.00	0.00

OBSERVACIONES:

a) Muestra proporcionada por el interesado.

b) Contenido de materia orgánica máximo permisible No. 3.

c) Procedencia: arena del Volcán de Pacaya recolectada en las instalaciones de la USAC

Vo.Bo.


Inga. Teima Marcela Cano Morales
Directora CII/USAC

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


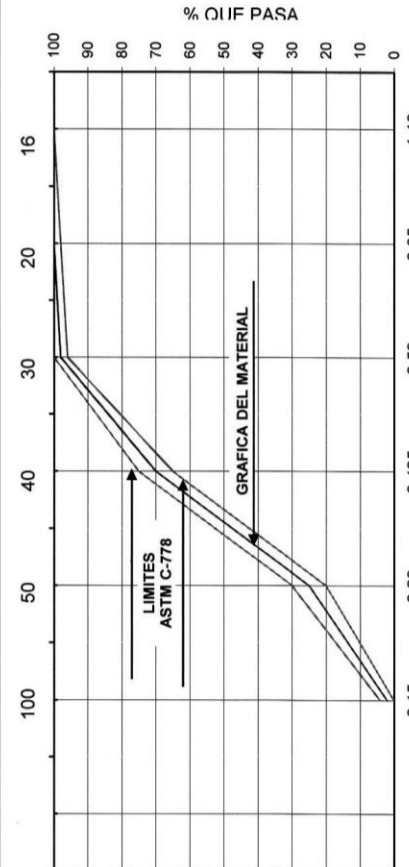
SECCION AGREGADOS, CONCRETOS Y MORTEROS

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

DIRECCION



15. Informe del ensayo del análisis completo de la arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo

 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA	<p>AGREGADO FINO PARA CONCRETO</p> <p>INTERESADO: Eduardo Enrique Machuca Gil, carné No. 2001-13256</p> <p>INFORME No. S.C. - 318 4/4</p> <p>PROYECTO: Tesis "Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland Puzolánico Norma ASTM C-1157, utilizando como agregado la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya de fecha 27 de mayo de 2010"</p> <p>MUESTRA: Arena volcánica con proceso y lavada al intemperismo</p> <p>FECHA: 24/04/2013 O.T. No. 27829 LAB.: Agregados, Concretos y Morteros</p>																																
<p>CARACTERISTICAS FISICAS:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Peso Especifico</td><td style="text-align: right;">2.67</td></tr> <tr><td>Peso Unitario (kg/m³)</td><td style="text-align: right;">1268.29</td></tr> <tr><td>Peso Unitario Suelto (kg/m³)</td><td style="text-align: right;">1164.18</td></tr> <tr><td>Porcentaje de Vacios</td><td style="text-align: right;">52.50</td></tr> <tr><td>Porcentaje de Absorción</td><td style="text-align: right;">31.46</td></tr> <tr><td>Contenido de Materia Orgánica</td><td style="text-align: right;">1</td></tr> <tr><td>% Retenido en Tamiz 6.35</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>% que pasa Tamiz 200</td><td style="text-align: right;">0.23</td></tr> <tr><td>Modulo de Finura</td><td style="text-align: right;">2.05</td></tr> </table>	Peso Especifico	2.67	Peso Unitario (kg/m ³)	1268.29	Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1164.18	Porcentaje de Vacios	52.50	Porcentaje de Absorción	31.46	Contenido de Materia Orgánica	1	% Retenido en Tamiz 6.35	0	% que pasa Tamiz 200	0.23	Modulo de Finura	2.05	 <p style="text-align: center;">Tamaño en milímetros</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Tamiz No.</td> <td>1.18</td> <td>0.85</td> <td>0.59</td> <td>0.425</td> <td>0.29</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>% Que pasa</td> <td>100.00</td> <td>100.00</td> <td>98.00</td> <td>70.00</td> <td>0.29</td> <td>0.00</td> </tr> </table>	Tamiz No.	1.18	0.85	0.59	0.425	0.29	0.15	% Que pasa	100.00	100.00	98.00	70.00	0.29	0.00
Peso Especifico	2.67																																
Peso Unitario (kg/m ³)	1268.29																																
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1164.18																																
Porcentaje de Vacios	52.50																																
Porcentaje de Absorción	31.46																																
Contenido de Materia Orgánica	1																																
% Retenido en Tamiz 6.35	0																																
% que pasa Tamiz 200	0.23																																
Modulo de Finura	2.05																																
Tamiz No.	1.18	0.85	0.59	0.425	0.29	0.15																											
% Que pasa	100.00	100.00	98.00	70.00	0.29	0.00																											
<p>OBSERVACIONES:</p> <p>a) Muestra proporcionada por el interesado.</p> <p>b) Contenido de materia orgánica máximo permisible No. 3.</p> <p>c) Procedencia: arena del Volcan de Pacaya recolectada en las instalaciones de la USAC</p>	<p style="text-align: center;">SECCION AGREGADOS, CONCRETOS Y MORTEROS</p> <p style="text-align: center;">Vo.Bo.</p> <p style="text-align: center;">Inga. Telma Maricela Cano Morales, Directora CII/USAC</p> <p style="text-align: center;">Inga. Dilia Yanet Mejicanos, Jefa Sección Agregados, Concretos y Morteros CII/USAC</p>																																

16. Informe del ensayo de resistencia a compresión y tensión (cemento + arena estándar)



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



RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y TENSIÓN
NORMA ASTM C-109 Y ASTM C-190

INFORME No. S.C. - 311

O.T. No. 27816

HOJA 1/2

INTERESADO: Eduardo Enrique Machuca Gil, carné No. 2001-13256

PROYECTO: Tesis "Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland Puzolánico Norma ASTM C-1157, utilizando como agregado la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya de fecha 27 de mayo de 2010"

FECHA: 23 de abril de 2,013

RESISTENCIA A LA COMPRESION

No. CUBO	FECHA DE HECHURA	EDAD en días	Peso [g]	Área [cm ²]	Carga [kg]	RESISTENCIA kg/cm ²	RESISTENCIA lb/plg ²
1	04/07/2011	3	282.00	25.944	3,920	151.10	2149.09
2	04/07/2011	3	279.60	25.928	3,780	145.79	2073.54
3	04/07/2011	3	285.50	26.074	4,140	158.78	2258.36
4	04/07/2011	7	279.04	25.400	5,220	205.52	2923.08
5	04/07/2011	7	279.01	25.779	5,320	206.37	2935.18
6	04/07/2011	7	283.41	25.806	5,100	197.63	2810.92
7	04/07/2011	14	281.74	25.908	6,980	269.42	3831.99
8	04/07/2011	14	279.85	25.918	6,500	250.79	3567.02
9	04/07/2011	14	282.89	25.939	7,140	275.27	3915.16
10	04/07/2011	28	280.68	25.756	8,080	313.72	4462.08
11	04/07/2011	28	284.48	25.784	8,120	314.93	4479.27
12	04/07/2011	28	283.89	25.664	8,040	313.28	4455.80
13	04/07/2011	42	284.10	25.756	9,000	349.44	4970.13
14	04/07/2011	42	281.30	25.604	8,620	336.67	4788.54
15	04/07/2011	42	282.60	26.153	8,940	341.84	4862.02
16	04/07/2011	56	282.24	26.081	9,480	363.48	5169.81
17	04/07/2011	56	281.35	26.489	9,460	357.12	5079.45
18	04/07/2011	56	284.85	26.461	9,500	359.02	5106.45
19	04/07/2011	70	283.40	26.010	9,800	376.78	5358.99
20	04/07/2011	70	281.40	26.153	9,900	378.54	5384.11
21	04/07/2011	70	285.40	26.461	9,800	370.36	5267.71
22	04/07/2011	84	282.60	25.527	9,860	386.25	5493.77
23	04/07/2011	84	283.40	25.500	9,800	384.31	5466.17
24	04/07/2011	84	281.00	25.000	9,780	391.20	5564.12
25	04/07/2011	91	281.90	26.090	10,160	389.42	5538.77
26	04/07/2011	91	282.50	26.010	10,260	394.46	5610.54
27	04/07/2011	91	287.20	26.152	10,290	393.46	5596.30



HOJA 2/2

RESISTENCIA A LA TENSION

No. BRIQUETA	FECHA DE FUNDICIÓN	EDAD en días	Área [cm ²]	Carga [lb]	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo PSI
1	04/07/2011	3	6.484	220	15.39	218.90
2	04/07/2011	3	6.485	215	15.04	213.91
3	04/07/2011	7	6.692	325	22.03	313.32
4	04/07/2011	7	6.676	325	22.08	314.09
5	04/07/2011	14	6.656	390	26.58	378.02
6	04/07/2011	14	6.668	385	26.19	372.48
7	04/07/2011	28	7.065	470	30.18	429.20
8	04/07/2011	28	6.708	460	31.10	442.41
9	04/07/2011	42	6.680	500	33.95	482.89
10	04/07/2011	42	6.760	510	34.22	486.76
11	04/07/2011	56	6.785	530	35.43	503.97
12	04/07/2011	56	6.676	540	36.69	521.87
13	04/07/2011	70	6.682	545	37.00	526.24
14	04/07/2011	70	6.695	550	37.27	530.03
15	04/07/2011	84	6.553	550	38.07	541.47
16	04/07/2011	84	6.313	545	39.16	557.01
17	04/07/2011	91	6.528	560	38.91	553.46
18	04/07/2011	91	6.605	560	38.46	547.00

OBSERVACIONES:

- La mezcla corresponde a: **CEMENTO + ARENA ESTANDAR.**
- Muestras ensayadas en maquina universal BALDWIN LIMA HAMILTON con capacidad de 60,000 kg.
- Dial utilizado para lectura de cargas: 12,000 kg.
- Proporcion de diseño de mezcla: **1 : 2.75 : 0.512 para un flujo de 110 ± 5**

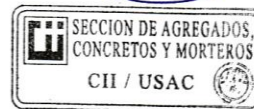
ATENTAMENTE,

Vo.Bo.

Inga. Telma Marcela Cano Morales
Directora CII/USAC



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



EM6

17. Informe del ensayo de resistencia a compresión y tensión (cemento + arena volcánica con proceso y sin lavar)



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



RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y TENSION
NORMA ASTM C-109 Y ASTM C-190
INFORME No. S.C. - 312

O.T. No. 27822

HOJA 1/2

INTERESADO: Eduardo Enrique Machuca Gil, carné No. 2001-13256
PROYECTO: Tesis "Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland Puzolánico Norma ASTM C-1157, utilizando como agregado la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya de fecha 27 de mayo de 2010"
FECHA: 23 de abril de 2,013

RESISTENCIA A LA COMPRESION

No. CUBO	FECHA DE HECHURA	EDAD en días	Peso [g]	Área [cm ²]	Carga [kg]	RESISTENCIA kg/cm ²	RESISTENCIA lb/plg ²
1	11/07/2011	3	236.50	25.897	1,125	43.44	617.87
2	11/07/2011	3	235.80	25.611	1,275	49.78	708.07
3	11/07/2011	3	234.50	25.949	1,200	46.24	657.75
4	11/07/2011	7	236.80	25.786	1,680	65.15	926.67
5	11/07/2011	7	237.12	25.500	1,880	73.73	1048.61
6	11/07/2011	7	237.30	26.040	1,820	69.89	994.09
7	11/07/2011	14	237.20	25.999	2,075	79.81	1135.17
8	11/07/2011	14	238.00	25.908	2,350	90.71	1290.12
9	11/07/2011	14	238.30	25.826	2,290	88.67	1261.16
10	11/07/2011	28	240.40	25.857	2,875	111.19	1581.46
11	11/07/2011	28	236.50	25.340	2,780	109.71	1560.40
12	11/07/2011	28	238.90	25.420	2,825	111.13	1580.67
13	11/07/2011	42	237.20	25.623	2,950	115.13	1637.51
14	11/07/2011	42	242.60	26.101	2,980	114.17	1623.86
15	11/07/2011	42	238.60	26.060	2,900	111.28	1582.81
16	11/07/2011	56	221.24	25.957	3,120	120.20	1709.61
17	11/07/2011	56	238.61	25.710	3,080	119.80	1703.93
18	11/07/2011	56	240.30	25.857	3,100	119.89	1705.25
19	11/07/2011	70	237.00	25.074	3,360	134.00	1905.96
20	11/07/2011	70	241.20	25.959	3,310	127.51	1813.58
21	11/07/2011	70	240.90	25.755	3,380	131.24	1866.61
22	11/07/2011	84	243.00	26.214	3,920	149.54	2126.91
23	11/07/2011	84	241.40	25.847	3,940	152.44	2168.14
24	11/07/2011	84	240.00	25.806	3,900	151.13	2149.52
25	11/07/2011	91	242.40	25.846	4,080	157.86	2245.27
26	11/07/2011	91	242.50	25.795	4,040	156.62	2227.65
27	11/07/2011	91	238.80	25.684	4,000	155.74	2215.07



HOJA 2/2

RESISTENCIA A LA TENSION

No. BRIQUETA	FECHA DE FUNDICIÓN	EDAD en días	Área [cm ²]	Carga [lb]	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo PSI
1	01/08/2011	3	6.628	115	7.87	111.94
2	01/08/2011	3	6.610	120	8.23	117.12
3	01/08/2011	7	6.466	160	11.22	159.64
4	01/08/2011	7	6.416	165	11.67	165.93
5	01/08/2011	15	6.502	200	13.95	198.46
6	01/08/2011	15	6.446	195	13.72	195.18
7	01/08/2011	28	6.631	240	16.42	233.52
8	01/08/2011	28	6.597	250	17.19	244.50
9	01/08/2011	42	6.457	300	21.08	299.77
10	01/08/2011	42	6.490	295	20.62	293.27
11	01/08/2011	56	6.507	320	22.31	317.25
12	01/08/2011	56	6.479	315	22.05	313.64
13	01/08/2011	70	6.457	330	23.18	329.75
14	01/08/2011	70	6.426	335	23.65	336.33
15	01/08/2011	84	6.325	340	24.38	346.81
16	01/08/2011	84	6.288	340	24.53	348.87
17	01/08/2011	91	6.502	360	25.11	357.20
18	01/08/2011	91	6.426	350	24.71	351.39

OBSERVACIONES:

- La mezcla corresponde a: **CEMENTO + ARENA VOLCÁNICA CON PROCESO Y SIN LAVAR.**
- Muestras ensayadas en maquina universal BALDWIN LIMA HAMILTON con capacidad de 60,000 kg.
- Dial utilizado para lectura de cargas: 12,000 kg.
- Proporcion de diseño de mezcla: **1 : 2.75 : 0.788 para un flujo de 110 ± 5**

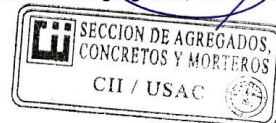
ATENTAMENTE,

Vo.Bo.

Inga. Telma Matricula Caño Morales
Directora CII/USAC



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



EM6

18. Informe del ensayo de resistencia a compresión y tensión (cemento + arena volcánica con proceso y lavada manualmente)



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



**RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y TENSION
NORMA ASTM C-109 Y ASTM C-190**

INFORME No. S.C. - 313

O.T. No. 27823

HOJA 1/2

INTERESADO: Eduardo Enrique Machuca Gil, carné No. 2001-13256

PROYECTO: Tesis "Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland Puzolánico Norma ASTM C-1157, utilizando como agregado la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya de fecha 27 de mayo de 2010"

FECHA: 23 de abril de 2,013

RESISTENCIA A LA COMPRESION

No. CUBO	FECHA DE HECHURA	EDAD en días	Peso [g]	Área [cm ²]	Carga [kg]	RESISTENCIA kg/cm ²	RESISTENCIA lb/plg ²
1	01/08/2011	3	235.60	25.250	1,280	50.69	721.02
2	01/08/2011	3	238.90	25.351	1,395	55.03	782.66
3	01/08/2011	3	236.00	24.948	1,300	52.11	741.15
4	01/08/2011	7	243.60	25.786	1,945	75.43	1072.83
5	01/08/2011	7	241.20	25.724	1,845	71.72	1020.11
6	01/08/2011	7	243.20	26.112	1,925	73.72	1048.55
7	01/08/2011	15	243.90	26.214	2,435	92.89	1321.18
8	01/08/2011	15	244.00	25.654	2,390	93.16	1325.07
9	01/08/2011	15	245.00	25.855	2,410	93.21	1325.76
10	01/08/2011	28	244.00	25.867	3,360	129.89	1847.50
11	01/08/2011	28	245.20	25.756	3,000	116.48	1656.72
12	01/08/2011	28	243.20	25.855	3,360	129.95	1848.37
13	01/08/2011	42	246.10	25.857	3,480	134.59	1914.23
14	01/08/2011	42	246.30	26.010	3,540	136.10	1935.80
15	01/08/2011	42	245.40	25.854	3,580	138.47	1969.47
16	01/08/2011	56	242.00	25.477	3,660	143.66	2043.31
17	01/08/2011	56	241.20	25.375	3,740	147.39	2096.35
18	01/08/2011	56	240.04	25.000	3,600	144.00	2048.14
19	01/08/2011	70	246.00	25.743	4,100	159.26	2265.25
20	01/08/2011	70	247.00	25.704	4,140	161.06	2290.85
21	01/08/2011	70	247.90	25.766	4,120	159.90	2274.32
22	01/08/2011	84	246.80	25.371	4,400	173.43	2466.72
23	01/08/2011	84	247.30	25.531	4,450	174.30	2479.12
24	01/08/2011	84	249.20	25.923	4,500	173.59	2469.00
25	01/08/2011	91	249.30	25.806	4,520	175.15	2491.24
26	01/08/2011	91	247.40	25.679	4,580	178.36	2536.84
27	01/08/2011	91	244.80	25.401	4,640	182.67	2598.13

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—

Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12

Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121

Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



HOJA 2/2

RESISTENCIA A LA TENSION

No. BRIQUETA	FECHA DE FUNDICIÓN	EDAD en días	Área [cm ²]	Carga [lb]	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo PSI
1	01/08/2011	3	6.250	115	8.35	118.71
2	01/08/2011	3	6.338	120	8.59	122.16
3	01/08/2011	7	6.775	180	12.05	171.40
4	01/08/2011	7	6.553	175	12.11	172.29
5	01/08/2011	15	6.680	210	14.26	202.81
6	01/08/2011	15	6.616	215	14.74	209.65
7	01/08/2011	28	6.605	265	18.20	258.85
8	01/08/2011	28	6.579	270	18.61	264.76
9	01/08/2011	42	6.605	340	23.35	332.11
10	01/08/2011	42	6.682	340	23.08	328.30
11	01/08/2011	56	6.477	350	24.51	348.64
12	01/08/2011	56	6.439	345	24.30	345.68
13	01/08/2011	70	6.446	375	26.39	375.34
14	01/08/2011	70	6.426	370	26.12	371.50
15	01/08/2011	84	6.450	390	27.43	390.10
16	01/08/2011	84	6.388	390	27.69	393.89
17	01/08/2011	91	6.298	400	28.81	409.78
18	01/08/2011	91	6.477	405	28.36	403.42

OBSERVACIONES:

- La mezcla corresponde a: CEMENTO + ARENA VOLCÁNICA CON PROCESO LAVADA MANUALMENTE.
- Muestras ensayadas en maquina universal BALDWIN LIMA HAMILTON con capacidad de 60,000 kg.
- Dial utilizado para lectura de cargas: 12,000 kg.
- Proporcion de diseño de mezcla: **1 : 2.75 : 0.768 para un flujo de 110 ± 5**

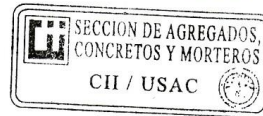
ATENTAMENTE,

Vo.Bo.

Inga. Telma Matricula Cano Morales
Directora CII/USAC



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



EM6

19. Informe del ensayo de resistencia a compresión y tensión (cemento + arena volcánica con proceso e intemperismo)



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



**RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y TENSIÓN
NORMA ASTM C-109 Y ASTM C-190**

INFORME No. S.C. - 314

O.T. No. 27824

HOJA 1/2

INTERESADO: Eduardo Enrique Machuca Gil, carné No. 2001-13256

PROYECTO: Tesis "Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland Puzolánico Norma ASTM C-1157, utilizando como agregado la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya de fecha 27 de mayo de 2010"

FECHA: 23 de abril de 2,013

RESISTENCIA A LA COMPRESION

No. CUBO	FECHA DE HECHURA	EDAD en días	Peso [g]	Área [cm ²]	Carga [kg]	RESISTENCIA kg/cm ²	RESISTENCIA lb/plg ²
1	09/08/2011	3	235.20	25.150	1,195	47.51	675.81
2	09/08/2011	3	238.20	25.341	1,200	47.35	673.52
3	09/08/2011	3	237.00	24.963	1,190	47.67	678.02
4	09/08/2011	7	243.10	25.786	1,835	71.16	1012.16
5	09/08/2011	7	241.00	25.816	1,850	71.66	1019.26
6	09/08/2011	7	244.10	26.209	1,850	70.59	1003.96
7	09/08/2011	14	242.70	26.138	2,370	90.67	1289.67
8	09/08/2011	14	244.50	25.452	2,310	90.76	1290.88
9	09/08/2011	14	245.10	25.829	2,350	90.98	1294.09
10	09/08/2011	28	244.20	25.837	2,920	113.02	1607.46
11	09/08/2011	28	245.10	25.710	2,900	112.80	1604.34
12	09/08/2011	28	243.60	25.753	2,895	112.41	1598.89
13	09/08/2011	42	246.60	25.827	3,260	126.23	1795.34
14	09/08/2011	42	246.20	26.133	3,300	126.28	1796.10
15	09/08/2011	42	245.60	25.758	3,240	125.79	1789.11
16	09/08/2011	56	242.20	25.558	3,400	133.03	1892.13
17	09/08/2011	56	241.60	25.365	3,340	131.68	1872.86
18	09/08/2011	56	241.00	25.050	3,320	132.53	1885.07
19	09/08/2011	70	246.00	25.845	3,880	150.13	2135.27
20	09/08/2011	70	247.10	25.840	3,855	149.19	2121.91
21	09/08/2011	70	247.40	25.806	3,900	151.13	2149.49
22	09/08/2011	85	246.40	25.346	4,050	159.79	2272.73
23	09/08/2011	85	248.30	25.571	4,100	160.34	2280.53
24	09/08/2011	85	249.00	25.933	4,165	160.60	2284.31
25	09/08/2011	91	249.40	25.887	4,400	169.97	2417.51
26	09/08/2011	91	247.70	25.688	4,370	170.12	2419.59
27	09/08/2011	91	245.00	25.381	4,320	170.21	2420.87



HOJA 2/2

RESISTENCIA A LA TENSION

No. BRIQUETA	FECHA DE FUNDICIÓN	EDAD en días	Área [cm ²]	Carga [lb]	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo PSI
1	09/08/2011	3	6.605	120	8.24	117.21
2	09/08/2011	3	6.602	120	8.24	117.26
3	09/08/2011	7	6.464	165	11.58	164.69
4	09/08/2011	7	6.438	165	11.62	165.34
5	09/08/2011	14	6.446	200	14.07	200.17
6	09/08/2011	14	6.464	205	14.39	204.62
7	09/08/2011	28	6.605	260	17.86	253.97
8	09/08/2011	28	6.592	255	17.55	249.58
9	09/08/2011	42	6.490	320	22.37	318.12
10	09/08/2011	42	6.477	315	22.06	313.76
11	09/08/2011	56	6.462	340	23.87	339.47
12	09/08/2011	56	6.477	335	23.46	333.69
13	09/08/2011	70	6.464	360	25.26	359.30
14	09/08/2011	70	6.426	350	24.71	351.39
15	09/08/2011	85	6.403	370	26.21	372.79
16	09/08/2011	85	6.338	375	26.84	381.73
17	09/08/2011	91	6.479	395	27.65	393.31
18	09/08/2011	91	6.340	390	27.90	396.85

OBSERVACIONES:

- La mezcla corresponde a: **CEMENTO + ARENAVOLCANICA CON PROCESO DE INTEMPERISMO.**
- Muestras ensayadas en maquina universal BALDWIN LIMA HAMILTON con capacidad de 60,000 kg.
- Dial utilizado para lectura de cargas: 12,000 kg.
- Proporcion de diseño de mezcla: **1 : 2.75 : 0.757 para un flujo de 110 ± 5**

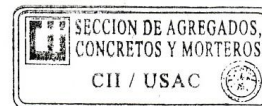
ATENTAMENTE,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



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



EM6

20. Informe del ensayo de reactividad álcali-agregado (cemento + arena estándar)



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



**ENSAYO DE REACTIVIDAD ÁLCALI-AGREGADO MÉTODO DE LA BARRA DE MORTERO
NORMA ASTM C-227**

INFORME No. S.C. - 315 O.T. No. 27826

HOJA 1/4

INTERESADO: Eduardo Enrique Machuca Gil, carné No. 2001-13256

PROYECTO: Tesis "Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland Puzolánico Norma ASTM C-1157, utilizando como agregado la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya de fecha 27 de mayo de 2010"

FECHA: 23 de abril de 2013

FECHA	LECTURA INICIAL (mm)	PROMEDIO DE LECTURA (mm)	FECHA	LECTURA FINAL (mm)	PROMEDIO DE LECTURA (mm)	EDAD (días)	EXPANSION (%)
06/03/2012	2.716	2.7120	07/03/2012	-----	-----	1	-----
	2.708			-----			
06/03/2012	2.716	2.7120	09/03/2012	2.726	2.7225	3	0.0042
	2.708			2.719			
06/03/2012	2.716	2.7120	13/03/2012	2.726	2.7215	7	0.0038
	2.708			2.717			
06/03/2012	2.716	2.7120	20/03/2012	2.732	2.7285	14	0.0066
	2.708			2.725			
06/03/2012	2.716	2.7120	03/04/2012	2.732	2.7280	28	0.0064
	2.708			2.724			
06/03/2012	2.716	2.7120	17/04/2012	2.701	2.6975	42	-0.0058
	2.708			2.694			
06/03/2012	2.716	2.7120	01/05/2012	2.684	2.6805	56	-0.0126
	2.708			2.677			
06/03/2012	2.716	2.7120	04/06/2012	2.666	2.6615	90	-0.0202
	2.708			2.657			
06/03/2012	2.716	2.7120	04/07/2012	2.652	2.6485	120	-0.0254
	2.708			2.645			
06/03/2012	2.716	2.7120	03/08/2012	2.641	2.6365	150	-0.0302
	2.708			2.632			
06/03/2012	2.716	2.7120	02/09/2012	2.628	2.6255	180	-0.0346
	2.708			2.623			

Observaciones:

- La mezcla corresponde a: CEMENTO + ARENA ESTANDAR.
- Proporción de diseño de mezcla: 1 : 2.25 : 0.515
- El valor limite según norma ASTM C-1157, para Cementos tipo GU es de 0.02 % de expansión a 14 días y 0.06 % de expansión a 56 días.

ATENTAMENTE,

Vo.Bo.



Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC





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



EMG

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: http://cii.usac.edu.gt

21. Informe del ensayo de reactividad álcali-agregado (cemento + arena volcánica con proceso y sin lavar)



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



ENSAYO DE REACTIVIDAD ÁLCALI-AGREGADO MÉTODO DE LA BARRA DE MORTERO
NORMA ASTM C-227

INFORME No. S.C. - 315
HOJA 2/4

O.T. No. 27826

INTERESADO: Eduardo Enrique Machuca Gil, carné No. 2001-13256

PROYECTO: Tesis "Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland Puzolánico Norma ASTM C-1157, utilizando como agregado la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya de fecha 27 de mayo de 2010"

FECHA: 23 de abril de 2013

FECHA	LECTURA INICIAL (mm)	PROMEDIO DE LECTURA (mm)	FECHA	LECTURA FINAL (mm)	PROMEDIO DE LECTURA (mm)	EDAD (días)	EXPANSION (%)
08/03/2012	3.872 4.068	3.9700	09/03/2012	----- -----	-----	1	-----
08/03/2012	3.872 4.068	3.9700	12/03/2012	3.898 4.093	3.9955	4	0.0102
08/03/2012	3.872 4.068	3.9700	15/03/2012	3.896 4.093	3.9945	7	0.0098
08/03/2012	3.872 4.068	3.9700	22/03/2012	3.901 4.098	3.9995	14	0.0118
08/03/2012	3.872 4.068	3.9700	05/04/2012	3.906 4.101	4.0035	28	0.0134
08/03/2012	3.872 4.068	3.9700	19/04/2012	3.750 3.948	3.8490	42	-0.0484
08/03/2012	3.872 4.068	3.9700	03/05/2012	3.704 3.901	3.8025	56	-0.0670
08/03/2012	3.872 4.068	3.9700	06/06/2012	3.696 3.893	3.7945	90	-0.0702
08/03/2012	3.872 4.068	3.9700	06/07/2012	3.672 3.869	3.7705	120	-0.0798
08/03/2012	3.872 4.068	3.9700	06/08/2012	3.648 3.845	3.7465	151	-0.0894
08/03/2012	3.872 4.068	3.9700	04/09/2012	3.587 3.785	3.6860	180	-0.1136

- Observaciones:
- La mezcla corresponde a: CEMENTO + ARENA VOLCÁNICA CON PROCESO.
 - Proporción de diseño de mezcla: 1 : 2.25 : 0.670
 - El valor limite según norma ASTM C-1157, para Cementos tipo GU es de 0.02 % de expansión a 14 días y 0.06 % de expansión a 56 días.

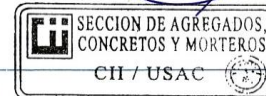
ATENTAMENTE,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



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



EMG

22. Informe del ensayo de reactividad álcali-agregado (cemento + arena volcánica con proceso y lavada manualmente)



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



ENSAYO DE REACTIVIDAD ÁLCALI-AGREGADO MÉTODO DE LA BARRA DE MORTERO
NORMA ASTM C-227

INFORME No. S.C. - 315

O.T. No. 27826

HOJA 3/4

INTERESADO: Eduardo Enrique Machuca Gil, carné No. 2001-13256

PROYECTO: Tesis "Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland Puzolánico Norma ASTM C-1157, utilizando como agregado la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya de fecha 27 de mayo de 2010"

FECHA: 23 de abril de 2013

FECHA	LECTURA INICIAL (mm)	PROMEDIO DE LECTURA (mm)	FECHA	LECTURA FINAL (mm)	PROMEDIO DE LECTURA (mm)	EDAD (días)	EXPANSION (%)
06/03/2012	3.652 3.916	3.7840	07/03/2012	----- -----	-----	1	-----
06/03/2012	3.652 3.916	3.7840	09/03/2012	3.667 3.931	3.7990	3	0.0060
06/03/2012	3.652 3.916	3.7840	13/03/2012	3.664 3.929	3.7965	7	0.0050
06/03/2012	3.652 3.916	3.7840	20/03/2012	3.671 3.937	3.8040	14	0.0080
06/03/2012	3.652 3.916	3.7840	03/04/2012	3.671 3.936	3.8035	28	0.0078
06/03/2012	3.652 3.916	3.7840	17/04/2012	3.537 3.801	3.6690	42	-0.0460
06/03/2012	3.652 3.916	3.7840	01/05/2012	3.503 3.767	3.6350	56	-0.0596
06/03/2012	3.652 3.916	3.7840	04/06/2012	3.487 3.750	3.6185	90	-0.0662
06/03/2012	3.652 3.916	3.7840	04/07/2012	3.475 3.738	3.6065	120	-0.0710
06/03/2012	3.652 3.916	3.7840	03/08/2012	3.465 3.733	3.5990	150	-0.0740
06/03/2012	3.652 3.916	3.7840	02/09/2012	3.432 3.694	3.5630	180	-0.0884

Observaciones: a) La mezcla corresponde a: CEMENTO + ARENA VOLCÁNICA CON PROCESO Y LAVADA MANUALMENTE.
b) Proporción de diseño de mezcla: 1 : 2.25 : 0.735
c) El valor límite según norma ASTM C-1157, para Cementos tipo GU es de 0.02 % de expansión a 14 días y 0.06 % de expansión a 56 días.

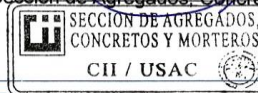
ATENTAMENTE,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



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



EMG

23. Informe del ensayo de reactividad álcali-agregado (cemento + arena volcánica con proceso e intemperismo)



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



ENSAYO DE REACTIVIDAD ÁLCALI-AGREGADO MÉTODO DE LA BARRA DE MORTERO
NORMA ASTM C-227

INFORME No. S.C. - 315

O.T. No. 27826

HOJA 4/4

INTERESADO: Eduardo Enrique Machuca Gil, carné No. 2001-13256

PROYECTO: Tesis "Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento Portland Puzolánico Norma ASTM C-1157, utilizando como agregado la arena procedente de la erupción del volcán de Pacaya de fecha 27 de mayo de 2010"

FECHA: 23 de abril de 2013

FECHA	LECTURA INICIAL (mm)	PROMEDIO DE LECTURA (mm)	FECHA	LECTURA FINAL (mm)	PROMEDIO DE LECTURA (mm)	EDAD (días)	EXPANSION (%)
08/03/2012	3.529	3.5125	09/03/2012	-----	-----	1	-----
	3.496			-----	-----		
08/03/2012	3.529	3.5125	12/03/2012	3.546	3.5295	4	0.0068
	3.496			3.513			
08/03/2012	3.529	3.5125	15/03/2012	3.544	3.5270	7	0.0058
	3.496			3.510			
08/03/2012	3.529	3.5125	22/03/2012	3.554	3.5380	14	0.0102
	3.496			3.522			
08/03/2012	3.529	3.5125	05/04/2012	3.551	3.5350	28	0.0090
	3.496			3.519			
08/03/2012	3.529	3.5125	19/04/2012	3.414	3.3960	42	-0.0466
	3.496			3.378			
08/03/2012	3.529	3.5125	03/05/2012	3.376	3.3590	56	-0.0614
	3.496			3.342			
08/03/2012	3.529	3.5125	06/06/2012	3.358	3.3420	90	-0.0682
	3.496			3.326			
08/03/2012	3.529	3.5125	06/07/2012	3.339	3.3215	120	-0.0764
	3.496			3.304			
08/03/2012	3.529	3.5125	06/08/2012	3.317	3.3000	151	-0.0850
	3.496			3.283			
08/03/2012	3.529	3.5125	04/09/2012	3.303	3.2870	180	-0.0902
	3.496			3.271			

Observaciones: a) La mezcla corresponde a: CEMENTO + ARENA VOLCÁNICA CON PROCESO Y LAVADA AL INTERPERISMO.
b) Proporción de diseño de mezcla: 1 : 2.25 : 0.719
c) El valor limite según norma ASTM C-1157, para Cementos tipo GU es de 0.02 % de expansión a 14 días y 0.06 % de expansión a 56 días.

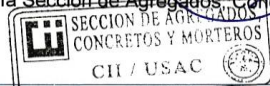
ATENTAMENTE,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



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



EMG

FACULTAD DE INGENIERIA —USA—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: http://cii.usac.edu.gt

