



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN PRELIMINAR  
DE PUZOLANAS MINERALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN  
PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR:

**OMAR EDUARDO GODÍNEZ JOLÓN**

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN PRELIMINAR DE PUZOLANAS MINERALES,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 17 marzo de 2007.

**Omar Eduardo Godínez Jolón**

Guatemala, 06 de noviembre de 2 009

Ingeniero  
Sydney Alexander Samuels Milson  
Director de la Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería

Señor Director:

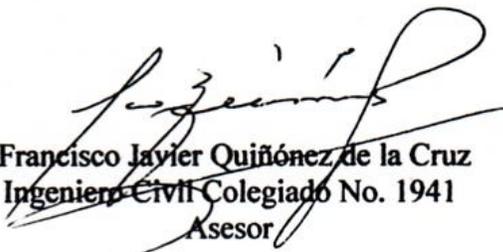
Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **“Propuesta de metodología para la clasificación preliminar de puzolanas minerales”**, realizado por el estudiante universitario **Omar Eduardo Godínez Jolón**, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante **Godínez Jolón**, cumple con los objetivos para los cuales fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

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

Atentamente,

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**



Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
Ingeniero Civil Colegiado No. 1941  
Asesor

Cc archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 20 de noviembre de 2 009

Ing. Sydney Alexander Samuels Milson  
Director de la Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Samuels Milson:

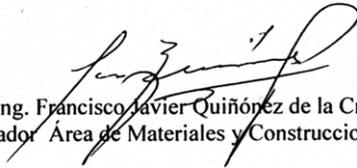
Me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado "Propuesta de metodología para la clasificación preliminar de puzolanas minerales", elaborado por el estudiante universitario Omar Eduardo Godínez Jolón, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo desarrollado por el estudiante Godínez Jolón, satisface los requisitos exigidos, por lo cual recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted la atención a la presente.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

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



FACULTAD DE INGENIERIA  
AREA DE MATERIALES Y  
CONSTRUCCIONES CIVILES  
USAC

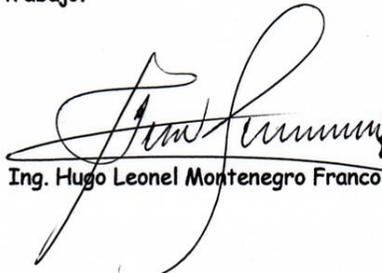
Cc archivo



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



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación del estudiante Omar Eduardo Godínez Jolón, titulado PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN PRELIMINAR DE PUZOLANAS MINERALES, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, junio de 2010

/bbdeb.

Más de 130 <sup>Años</sup> de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos  
de Guatemala

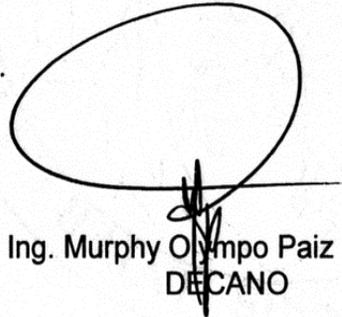


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.215.2010

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: **PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN PRELIMINAR DE PUZOLANAS MINERALES**, presentado por el estudiante universitario **Omar Eduardo Godínez Jolón**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
DECANO

Guatemala, junio de 2010



/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- MI PADRE** Eduardo Arturo Godínez, que en paz descansa.
- MI MADRE** María Ana Jolón Obando, por sus esfuerzos para darme el estudio y por brindarme cariño incondicional.
- MI HERMANOS** Eduardo Arturo, Rolan Romel e Ivet Yasmin Godínez Jolón, por brindarme su apoyo en todo momento.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

Ing. Francisco Javier Quiñónez de La Cruz, por apoyarme y brindarme sus sabios conocimientos para elaborar mi trabajo de graduación.

Al Centro de Investigaciones de Ingeniería CII, por brindarme apoyo en mi trabajo de graduación.

Ing. Axel Roely Sical Raxcaco, por sus consejos brindados a lo largo de toda mi carrera.

La Universidad de San Carlos de Guatemala.

La Facultad de Ingeniería, por ser una fuente de conocimiento e inspiración.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	V
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	IX
<b>GLOSARIO</b>	XI
<b>RESUMEN</b>	XV
<b>OBJETIVOS</b>	XVII
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XIX
<b>1. LAS PUZOLANAS</b>	1
1.1 Definición y clasificación de las puzolanas	1
1.1.1 Puzolanas naturales	3
1.1.2 Puzolanas artificiales	4
1.1.3 Descripción detallada de las puzolanas	4
1.1.3.1 Descripción puzolanas naturales	4
1.1.3.1.1 Rocas volcánicas (tobas y rocas de origen ígneo)	4
1.1.3.1.1.1 Ácidas	5
1.1.3.1.1.2 Intermedias	5
1.1.3.1.1.3 Básicas	6
1.1.3.1.1.4 Alcalinas	6
1.1.3.1.2 Materiales naturales con actividad puzolánica (materials opalinos)	6
1.1.3.1.2.1 Rocas sedimentarias	6
1.1.3.1.2.2 Esquito	7
1.1.3.2 Descripción puzolanas artificiales	7

1.1.3.2.1 Materiales naturales con activación externa (arcillas y pizarras calcinadas)	7
1.1.3.2.1.1 Caolinita	8
1.1.3.2.1.2 Illita	8
1.1.3.2.2 Subproductos industriales (vidrio industrial)	8
1.2 Actividad puzolánica	12
1.2.1 Teoría de cambio de base	13
1.2.2 Teoría de combinación directa	14
1.3 Verificación de las puzolanas	15
1.3.1 Valuación química	17
1.3.2 Valuación mecánica	17
1.4 Usos de las puzolanas	19
1.5 Ventajas y Desventajas de las puzolanas	20

<b>2. ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE LA CLASIFICACIÓN DE CAMPO Y DE LABORATORIO</b>	<b>23</b>
2.1 Clasificación de campo	23
2.1.1 Muestreo	23
2.2 Clasificación de laboratorio	23
2.2.1 Ensayos físicos	23
2.2.1.1 Granulometría	23
2.2.1.2 Peso específico	23
2.2.1.3 Peso unitario volumétrico	24
2.2.1.4 Fineza	24
2.2.2 Ensayos mineralógicos	25
2.2.3 Ensayos químicos	25
2.2.4 Ensayos mecánicos	25
2.2.4.1 Resistencia a la compresión	25

<b>3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PUZOLANAS</b>	27
<b>4. DESARROLLO DE LA FASE EXPERIMENTAL</b>	31
4.1 Clasificación de campo y resultados	31
4.1.1 Muestreo	31
4.1.2 Tratamiento preliminar de las muestras	34
4.1.2.1 Granulometría	35
4.2 Clasificación de laboratorio y resultados	59
4.2.1 Ensayos físicos	59
4.2.1.3 Peso unitario volumétrico	59
4.2.1.4 Fineza	60
4.2.2 Ensayos mineralógicos	60
4.2.3 Ensayos químicos	61
4.2.4 Ensayos mecánicos	62
4.2.4.1 Resistencia a la compresión	62
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	67
5.1 Análisis de resultados de laboratorio	68
5.2 Comparación de resultados con metodología propuesta	70
<b>CONCLUSIONES</b>	71
<b>RECOMENDACIONES</b>	73
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	75
<b>ANEXOS</b>	77



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Cuadro sinóptico descripción detallada de las puzolanas	11
2	Metodología propuesta de caracterización de puzolana	29
3	Cargas axiales de cubos	106
4	Resistencia a la compresión a 7 días	106
5	Resistencia a la compresión a 28 días	107
6	Resistencia a la compresión a 7 y 28 días	107
7	Esfuerzo vs. edad	108
8	Resistencia a la compresión a 7 días con desviación estándar	108
9	Resistencia a la compresión a 28 días con desviación estándar	109
10	Apisonamiento y secado al sol de material	112
11	Equipo en ensayo mineralógico	112
12	Molino de bolas	113
13	Bolas de arcilla	113
14	Vista interior de molino de bolas	114
15	Tamizado de material despues de molienda	114
16	Horno para el secado de muestras	115
17	Proporción de cal en peso	115
18	Mezcla de 34% de cal y 66% de material	116
19	Proporción en peso de puzolana	116
20	Proporción en peso de arena	117
21	Cantidad de adición de agua destilada	117
22	Máquina mezcladora	118
23	Equipo de ensayo de flow	118

24	Lectura de flow	119
25	Fraguado inicial en moldes	119
26	Desencofrado de cubos	120
27	Fraguado de cubos en saturación con cal	120
28	Cubos a ensayar a compresión	121
29	Lectura de temperatura ambiente en fraguado	121
30	Máquina universal para ensayo a compresión	122
31	Cubo en ensayo a compresión	122
32	Falla de reloj de arena	123

## TABLAS

I	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 1	35
II	Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 1	36
III	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 1	37
IV	Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 2	38
V	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 3	39
VI	Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 3	40
VII	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 4	41
VIII	Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 4	42
IX	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 5	43
X	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 6	44
XI	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 7	45
XII	Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 7	46
XIII	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 8	47
XIV	Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 8	48
XV	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 9	49

XVI	Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 9	50
XVII	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 10	51
XVIII	Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 10	52
XIX	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 11	53
XX	Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 11	54
XXI	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 12	55
XXII	Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 12	56
XXIII	Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 13	57
XXIV	Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 13	58
XXV	Secado y molienda de muestras	59
XXVI	Peso unitario volumétrico	59
XXVII	Fineza de posibles puzolanas	60
XXVIII	Composición mineralógica	61
XXIX	Resultados de ensayo químico	62
XXX	Proporción para mezcla de mortero	63
XXXI	Cargas axiales y resistencias de cubos a 7 días	63
XXXII	Cargas axiales y resistencias de cubos a 28 días	64
XXXIII	Caracterización mineralógica y química	67
XXXIV	Ensayos físicos	67
XXXV	Ensayo mecánico a compresión	68



## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Tanto por ciento
A	Área de contacto o área de cubo
A/C	Relación de agua cemento
Al	Aluminio
Cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos
F'c	resistencia a la compresión con desviación estándar
f'c	Resistencia a la compresión
Fe	Hierro
Gr	Gramos
Kg	Kilogramo
Lb	Libra
M <sup>3</sup>	Metro cubico
Mg	Magnesio
P	Carga axial
P	Peso de muestra
Pd	Carga axial con desviación estándar
Pmaxima	Carga máxima
Pminima	Carga mínima
Pp	Carga de falla
PU	Peso unitario
pul <sup>2</sup>	Pulgada cuadrada
Si	Silicio
T	Tiempo
V	Volumen de muestra o producto
$\sigma$	Desviación estándar



## GLOSARIO

<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>Abrasión</b>	Acción y efecto de roer o desgastar por fricción.
<b>Arena</b>	Partícula que posee un tamaño dentro del rango 2-0.75 mm, según las normas ASTM.
<b>Caracterización</b>	Determinar los atributos peculiares de alguien o de algo, de modo que claramente se distinga de los demás.
<b>Cemento</b>	Mezcla formada de arcilla y materiales calcáreos, sometida a cocción y muy finamente molida, que mezclada a su vez con agua se solidifica y endurece.
<b>CESEM</b>	Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas.
<b>CETEC</b>	Centro Tecnológico.
<b>CII</b>	Centro de Investigaciones de Ingeniería
<b>Ensayo</b>	Análisis de laboratorio sobre algo este puede ser

físico, químico, mineralógico y otros.

<b>Insoluble</b>	Que no puede disolverse ni dividirse.
<b>Masa</b>	Magnitud física que expresa la cantidad de materia que contiene un cuerpo.
<b>Micrómetro</b>	Magnitud de medida de longitud que equivale a una millonésima parte del metro.
<b>Molienda</b>	Acción de moler o triturar una roca o suelo.
<b>Mortero</b>	Conglomerado de mezcla compuesto por cemento, arena y agua.
<b>Resistencia</b>	Esfuerzo que se define como unidad de fuerza por área.
<b>Soluble</b>	Que se puede disolver y/o desunir partes de algunos cuerpos o estructuras por medio de un líquido.
<b>Tamiz</b>	Cedazo muy tupido que puede ser de diferentes medidas regido por las normas ASTM, para separar partículas de diferentes tamaños.
<b>Tara</b>	Instrumento de laboratorio cuya función es recolectar muestra para medir peso o volumen.

**Teoría**                    Conocimiento especulativo considerado con  
independencia de toda aplicación.

**USAC**                    Universidad de San Carlos de Guatemala.

## RESUMEN

Este material impreso consta de cinco capítulos, en los cuales los dos primeros tratan sobre la definición de las puzolanas, su clasificación, composición, uso, ventajas, desventajas y los diversos ensayos que se le hacen (físicos, mineralógicos, químicos y mecánicos) regidos por las normas ASTM.

El tercer capítulo desarrolla y explica la metodología propuesta para la caracterización de puzolanas; el cuarto capítulo desarrolla la parte experimental en el cual se analizan trece muestras para después probar la veracidad de la metodología propuesta de acuerdo a los ensayos correspondientes; el quinto capítulo discute los resultados obtenidos sobre los ensayos, para finalmente descartar y clasificar las muestras como materiales con alta reactividad puzolánica y materiales con baja reactividad puzolánica.

Adicionalmente se presentan anexos en los cuales se detallan los resultados de los distintos ensayos, fotografías de las muestras y máquinas utilizadas en laboratorio.

# OBJETIVOS

## GENERAL

- Proponer una Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales, de acuerdo a los procedimientos y métodos de las Normas ASTM.

## ESPECÍFICOS:

1. Aplicar los estudios de trabajos de investigación realizados en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el tema de puzolanas y aglomerantes.
2. Caracterizar las muestras desde el punto de vista físico.
3. Caracterizar las muestras desde el punto de vista mineralógico.
4. Caracterizar las muestras desde el punto de vista químico.
5. Caracterizar las muestras desde el punto de vista mecánico.
6. Evaluar trece muestras obtenidas en el campo para determinar mediante la metodología propuesta, la veracidad de la misma.



# INTRODUCCIÓN

La búsqueda de sistemas constructivos en los cuales los costos de los materiales de construcción sean económicos, obliga a utilizar recursos naturales renovables o que se dispongan en gran cantidad; éste último es el caso de las puzolanas, las cuales se pueden encontrar en el suelo, y por lo general, en diversas partes, en cantidades rentablemente explotables.

Las puzolanas son materias primas abundantes, con las cuales pueden elaborarse cementos de mampostería, o bien pueden utilizarse como admixturas minerales en mezclas de cemento y/o concreto.

En este trabajo de graduación se propone una Metodología para establecer si las muestras son procedentes de una clasificación de campo, finamente divididas y mezcladas con Hidróxido de Calcio (Cal Hidratada), reaccionan como una puzolana, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes y, siendo así, si cumplen con los parámetros establecidos por las Normas ASTM en sus características físicas, químicas y mineralógicas, así como en sus propiedades mecánicas.

La Metodología propuesta incluye una clasificación de campo, un análisis mineralógico, un análisis químico y ensayos para determinar sus características mecánicas.

# 1. LAS PUZOLANAS

## 1.1 Definición y clasificación de las puzolanas

En la actualidad las puzolanas se definen como materiales silíceos y aluminosos, que en sí poseen poco o ningún valor cementante, pero que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos cementantes de baja solubilidad.

Las puzolanas son, generalmente, materiales que carecen de propiedades cementicias y de actividad hidráulica por sí solos, contienen constituyentes que se combinan con cal a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, dando lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como aglomerantes hidráulicos; significa esto entonces, que las puzolanas dan propiedades cementantes a un aglomerante no hidráulico como la cal.

Son entonces, materiales reactivos frente a la cal en las condiciones normales de fabricación ordinaria de aglomerados (morteros y concretos). No se consideran como puzolanas los materiales inertes que, en condiciones de estado físico de división (elevada finura, gran superficie específica), o de reacción (tratamientos hidrotérmicos con vapor de agua a presiones y temperaturas elevadas), pueden dar lugar a compuestos hidráulicos. Un ejemplo de esto es el cuarzo, que finamente molido y mezclado con cal forma silicatos cálcicos hidratados por tratamiento de autoclave.

Las puzolanas constituyen uno de los dos componentes de un sistema en el que, por interacción química se producen compuestos hidráulicos poco solubles, que dan lugar a un fraguado y al consiguiente endurecimiento; siendo el otro componente de este sistema, la cal (hidróxido de calcio) o bien un material que pueda cederla. Por lo tanto, la cal se comporta como una sustancia reactiva con la puzolana. Por otra parte, la reactividad de las puzolanas se atribuye, fundamentalmente en algunos casos a la sílice activa que se encuentra en ellas, que forma compuestos mineralógicos silícicos.

Las puzolanas pueden ser utilizadas en combinación con hidróxido de calcio o bien con cemento Pórtland. Cuando se mezclan con hidróxido de calcio, mejoran las propiedades de los morteros que utilizan como base la cal. De forma alternativa, pueden ser mezclados con cemento Pórtland para mejorar la durabilidad del concreto y su trabajabilidad, y reduce su costo considerablemente.

Originalmente, la denominación de las puzolanas se refería a los materiales naturales de origen volcánico que reaccionan con la cal, ahora se le aplica genéricamente a todos aquellos materiales que manifiestan un comportamiento similar, independientemente de su origen y composición. Por lo tanto, una clasificación de las puzolanas debe basarse en principio, en la identificación de su procedencia, sin aludir su calidad, ya que resulta común encontrar diversas calidades entre puzolanas de un mismo origen.

Según su origen, las puzolanas suelen dividirse en dos grandes grupos: el de las puzolanas naturales y el de las puzolanas artificiales. Las puzolanas naturales, cuando son de origen mineral, son generalmente cenizas volcánicas procedentes de erupciones explosivas que han pasado por un rápido

enfriamiento (vidrio volcánico o un vidrio parcialmente zeolitizado); y cuando son de origen orgánico son rocas sedimentarias lacustres o marinas, abundantes en ópalo y formadas por la acumulación de esqueletos y caparazones silícicos de animales y plantas microscópicas. Las puzolanas artificiales por su parte, se obtienen a partir de la calcinación de rocas arcillosas o esquistosas o de subproductos industriales, que involucran altas temperaturas.

### **1.1.1 Puzolanas naturales**

Las puzolanas naturales son aquellos materiales que se han formado naturalmente por fenómenos como la actividad volcánica o la sedimentación de esqueletos de animales y plantas microscópicas; es por esto que las puzolanas naturales pueden ser de origen mineral u origen orgánico.

Los materiales clasificados como puzolanas naturales de origen mineral, son productos de transformación de polvo y cenizas volcánicas que como materiales piroclásticos procedentes de erupciones explosivas, ricos en vidrio y en estado especial de reactividad, son capaces de sufrir acciones endógenas (acciones producidas por energía proveniente del interior de la tierra) como la zeolitización, que es, el desarrollo de zeolitas, un proceso extenso y no asociado con depósitos minerales; y la cementación consistente en que los minerales de contenido metalífero son arrastrados por soluciones acuosas y re depositados posteriormente; o sufrir acciones exógenas (acciones producidas por la formación de rocas en la superficie de la tierra) como la argilización que es el proceso de transformación de minerales y rocas no arcillosos en arcillosos. De estas acciones, las endógenas son favorables y las exógenas desfavorables. Por la acción atmosférica se convierten en rocas volcánicas,

más o menos consolidadas y compactas, cristalinas, líticas o vítreas, según su naturaleza.

### **1.1.2 Puzolanas artificiales**

Son materiales que deben su condición a un tratamiento térmico adecuado; dentro de esta clasificación se distinguen dos grupos: el formado por materiales naturales silicatados de naturaleza arcillosa y por esquistos, que adquieren el carácter puzolánico por procesos térmicos, y el otro grupo, formado por subproductos de operaciones industriales que, por su naturaleza y por las transformaciones que sufren en estas, adquieren propiedades puzolánicas.

### **1.1.3 Descripción detallada de las puzolanas**

#### **1.1.3.1 Descripción puzolanas naturales**

##### **1.1.3.1.1 Rocas volcánicas (tobas y rocas de origen ígneo)**

Las rocas volcánicas, son rocas provenientes del magma fluido (lava) solidificadas, al menos en parte, en la superficie de la litosfera. Este grupo comprende a las puzolanas tradicionales, por lo general consisten de tobas provenientes del depósito de cenizas volcánicas y ocurren como rocas porosas, consolidadas o fragmentadas. Las puzolanas de origen volcánico parecen desarrollar su acción por su composición química, abundante en dióxido de silicio y trióxido de aluminio.

La formación de las rocas volcánicas, ocurre cuando en la erupción volcánica, una parte del magma es lanzado con fuerza por el cráter y la disminución brusca de temperatura origina una consolidación del mineral en forma de brillo de vidrio (forma vítrea) y una rápida pérdida de gas produce un alto contenido de poros. La acción de agentes atmosféricos produce en éstas, la eliminación de una parte de los álcalis más solubles con un aumento posible de la reacción de sus componentes ácidos.

Las puzolanas de ésta clasificación, pueden ser:

#### **1.1.3.1.1.1 Ácidas**

Rocas ricas en sílice libre o combinada en forma de feldespatos alcalinos y moscovita. Normalmente tiene el mismo significado que rocas leucócratas, compuestas fundamentalmente por minerales de color claro. Una de estas rocas es la Riolita que es una roca de grano fino a vítrea, de composición mineralógica similar a un granito. Los miembros más vitresos del grupo se denominan obsidianas.

#### **1.1.3.1.1.2 Intermedias**

Son rocas magmáticas de composición intermedia entre las rocas ácidas (granitos por ejemplo) y la de las rocas básicas (basaltos por ejemplo); es el caso de las dioritas en la categoría de rocas granudas y las andesitas para las rocas volcánicas.

#### **1.1.3.1.1.3 Básicas**

Son rocas magmáticas pobres en sílice ( $\text{SiO}_2$ ) [45 a 52% en peso], con ausencia de cristales de cuarzo y rica en magnesio (Mg), hierro (Fe) y calcio (Ca) [de 20 a 35%].

#### **1.1.3.1.1.4 Alcalinas**

Son rocas eruptivas que contienen una cantidad considerable de álcalis.

#### **1.1.3.1.2 Materiales naturales con actividad puzolánica (materiales opalinos)**

Son rocas o tierras raras en las cuales el sílice contiene ópalo, esto puede darse por la precipitación del sílice en solución o por depósitos de esqueletos de microorganismos que contienen sílice, estos últimos mejor conocidos como diatomeas, las cuales pueden ser buenas puzolanas naturales.

En esta clasificación, podemos encontrar:

#### **1.1.3.1.2.1 Rocas sedimentarias**

Resultan de la consolidación de sedimentos sueltos que se han acumulado en capas, o roca de tipo química formada por precipitación, o una roca orgánica consistente principalmente de restos de plantas y animales. Dentro de esta podemos mencionar a la roca pizarras opalinas.

### **1.1.3.1.2.2. Esquisto**

Es roca metamórfica caracterizada por la disposición paralela de la mayoría de sus minerales constituyentes. Los minerales más corrientes que dan lugar a la estructura laminar son las micas.

### **1.1.3.2 Descripción Puzolanas artificiales**

#### **1.1.3.2.1 Materiales naturales con activación externa (arcillas y pizarras calcinadas)**

Las propiedades puzolánicas de los materiales pueden presentar distintos efectos cuando estos son sometidos a tratamiento calorífico; como por ejemplo, la calcinación puede mejorar o reducir la calidad de algunas puzolanas.

Las arcillas son depósitos sedimentarios, por lo general de silicatos, aluminatos silico-aluminatos hidratados con un contenido de agua variable. Las arcillas son minerales o rocas compuestas esencialmente de minerales, pertenecientes al grupo de filosilicatos hidratados que se presentan en cristales muy pequeños (algunos en láminas hexagonales o a veces en fibras). Su estructura es identificable por análisis de rayos x (difracción) y se caracteriza por la superposición de hojas compuestas de capas tetraédricas y de capas octaédricas.

Una pizarra es Roca metamórfica arcillosa de bajo grado, que ha desarrollado una marcada pizarrosidad, pero que no ha sufrido casi recristalización, por lo que la roca es todavía de grano fino.

#### **1.1.3.2.1.1 Caolinita**

Es un mineral de arcilla, común de color blanco o grisáceo, formado por alteración hidrotermal (y en cierta medida por meteorización química) de feldespatos y otros minerales aluminosilicatados por el proceso denominado caolinización. El proceso afecta negativamente a la utilidad de las rocas para áridos para hormigón o carreteras.

#### **1.1.3.2.1.2 Illita**

Es un término amplio, que describe uno de los grupos más corrientes de minerales de la arcilla, formados por la alteración de micas, feldespatos, etc. en condiciones alcalinas.

#### **1.1.3.2.2 Subproductos industriales (vidrio industrial)**

Algunos productos de origen de procesos industriales, poseen características para reaccionar con la cal, y por lo tanto se pueden considerar como puzolanas artificiales. En este grupo de puzolanas sobresalen la ceniza volante (Fly Ash) y las escorias granuladas de alto horno.

Las puzolanas también incluyen a la ceniza volante y al humo de sílice. El aditivo mineral más ampliamente utilizado en el concreto, la ceniza volante, es un residuo finamente dividido (polvo que se asemeja al cemento) que resulta de la combustión del carbón mineral pulverizado en las plantas generadoras de electricidad. Con la ignición en el horno, la mayor parte de la materia volátil y de carbono existentes en el carbón mineral se calcina. Durante la combustión, las

impurezas del carbón mineral (como la arcilla, el feldespato, cuarzo y la pizarra) se funden en suspensión, y son retiradas de la cámara de combustión por el gas de escape. Mientras transcurre el proceso, el material fundido se enfría y se solidifica formando partículas esféricas llamadas cenizas volantes.

Algunas escorias granuladas de alto horno molidas y también algunas cenizas volantes, exhiben propiedades tanto puzolánicas como cementantes. Las cenizas volantes ASTM C 618 Clase C con un contenido de óxido de calcio de aproximadamente 15 a 30% en peso son las predominantes dentro de esta clasificación. Al exponerse al agua, muchas de estas cenizas se hidratan y endurecen en menos de 45 minutos.

La práctica de utilizar ceniza volante y escoria granulada de alto horno molida en las mezclas de concreto de cemento Pórtland, ha ido aumentando en los últimos años en los Estados Unidos. Una de las principales razones de este incremento es el interés en la conservación de la energía así como la reducción en el costo del concreto que se obtiene al emplear cenizas o escorias para reemplazar parcialmente al cemento.

La ceniza volante consiste principalmente de silicatos vítreos que contienen sílice, alumina, hierro, y calcio. Otros componentes menores son el magnesio, el azufre, el sodio, el potasio, y el carbono. También se encuentra presente una pequeña cantidad de compuestos cristalinos. La densidad de la ceniza volante generalmente se encuentra dentro del rango de 2.2 a 2.8 y su color es gris o beige.

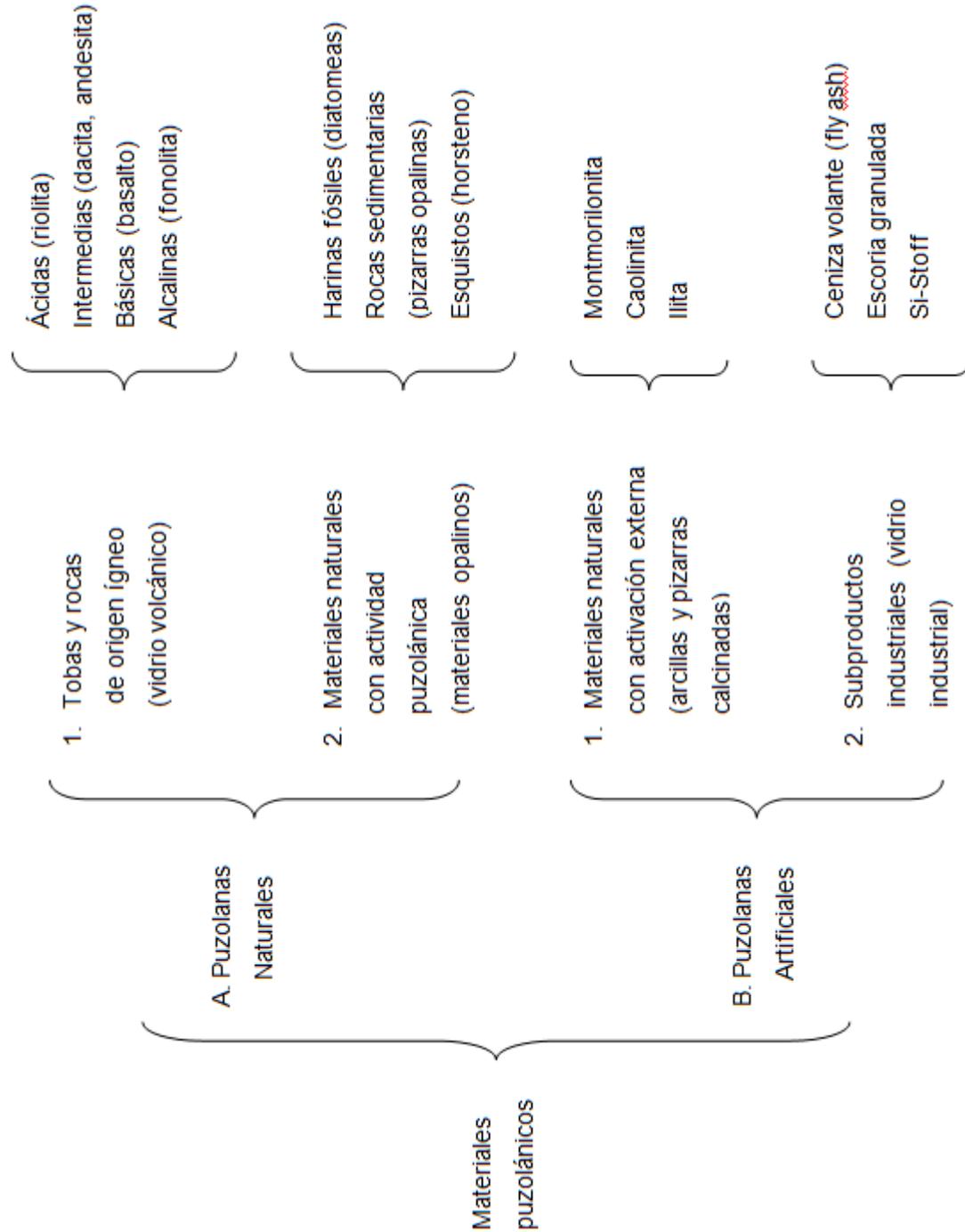
El humo de sílice, al que también se le conoce como micro sílice o humo de sílice condensado, es otro material que se emplea como aditivo

puzolánico. Este producto en forma de polvo de color gris claro a oscuro o en ocasiones gris azulado verdoso, es resultado de la reducción de cuarzo muy puro con carbón mineral en un horno de arco eléctrico durante la manufactura del silicio o de aleaciones de ferro silicio. El humo de sílice asciende como vapor oxidado de los hornos a 2,000'C. Se enfría, se condensa y se recolecta en enormes bolsas de tela. Entonces se le procesa para retirarle las impurezas y para controlar su tamaño de partícula.

El humo de sílice condensado esencialmente consiste en dióxido de sílice (más de 90 %) en forma no cristalina. Puesto que es un material susceptible de ser conducido por el aire como la ceniza volante, tiene forma esférica. Es extremadamente fino, con partículas con diámetros menores de una micra y con un diámetro promedio de aproximadamente 0.1 micra, casi 100 veces menor que las partículas promedio de cemento.

A continuación se presenta el resumen de la descripción detallada de las puzolanas ver figura 1.

Figura 1 Cuadro sinóptico descripción detallada de las puzolanas



Fuente: Munduate Cristian, Determinación de características cementantes y de uso para mezclas puzolanas-cal-arena de río.

## 1.2 Actividad puzolánica

La actividad puzolánica de un material radica fundamentalmente, cualquiera que sea su composición, en su aptitud para fijar en fase acuosa una mayor o menor cantidad de cal en un tiempo más o menos largo, a temperatura ambiente dada.

En general se acepta que esta actividad deriva de una composición química abundante en compuestos ácidos, sílice y sesquióxidos y, consecuentemente, pobre en compuestos básicos, cal y magnesia.

También se reconoce que en una puzolana los compuestos silíceos son los más activos para reaccionar con la cal, y que la sílice amorfa reacciona mucho más rápidamente que la sílice cristalina, si bien no se ha encontrado una división claramente definida entre la sílice puzolánica y la no-puzolánica.

Examinando la composición química de los materiales con actividad puzolánica, se comprueba que su principal componente es el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), aunque solo contienen un 45%, exhiben un comportamiento puzolanico satisfactorio. Le siguen en importancia la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) pero también se presentan en cantidades muy variables de una puzolana a otra. En fin, los álcalis, óxidos de sodio y de potasio, que en ocasiones son vistos con algún recelo, se encuentran en cantidades hasta del 10% en puzolanas de buena calidad.

De lo anterior, muchos investigadores han concluido que la composición química de una puzolana no da un criterio adecuado suficiente para juzgar su

calidad y que siempre es necesario acudir al estudio experimental para obtener un juicio mas completo.

Para explicar el mecanismo según el cual una puzolana reacciona con el hidróxido de calcio, se ha desarrollado dos hipótesis principales que, por general, atribuyen dicha actividad a fenómenos de carácter químico que ocurren entre la cal y los elementos componentes de puzolana y son:

- La teoría del cambio de base
- La teoría de la combinación directa

### **1.2.1 Teoría de cambio de base**

En esta teoría se ha intentado identificar en la actividad puzolánica un origen ceolítico; esto es, de intercambio entre los álcalis contenidos en el material puzolánico y la cal adicionada o puesta en libertad durante la hidrólisis del cemento. La ceolitas son aluminio-silicatos hidratados insolubles que tiene la propiedad de cambiar algunos de sus compuestos básicos por otros, cuando se los sumerge en soluciones salinas.

Algunos investigadores, al estudiar sistemáticamente la hipótesis de la naturaleza ceolítica, observaron que, al tratar el tras del Rhin con una solución de nitrato de calcio, el calcio desplazaba a los álcalis presentes en el trass, pero al medir la cal fijada se estableció que la cal absorbida era mayor que los álcalis desplazados por lo que la diferencia se consideró como cal fijada químicamente por el tras.

Cuando ese estudio se hizo extensivo a otras puzolanas, se observó que mientras que el tras manifiesta un comportamiento netamente ceolítico, otras

puzolanas presentan este fenómeno en forma limitada o del todo ausente. De allí se concluyó que el fenómeno ceolítico tiene cierta importancia en la absorción de cal, pero no es suficiente para explicar las propiedades hidráulicas de un material puzolánico.

### **1.2.2 Teoría de combinación directa**

Esta teoría que ha tenido mayor aceptación, admite que se producen reacciones directas entre la sílice y la alúmina activas de una puzolana por una parte, y el hidróxido de calcio presente por la otra, dando como resultado la formación de hidrosilicatos e hidroaluminatos de calcio.

Esta reacción provoca la solubilización progresiva de la sílice y de la alúmina, por parte de la cal. De este modo, la determinación de esta solubilización progresiva fue escogido por algunos investigadores para determinar la actividad hidráulica de los materiales puzolánicos, pero sus resultados prácticos no fueron del todo satisfactorios, debido, principalmente, a lo heterogéneo de los materiales puzolánicos.

De modo general, la hipótesis de la combinación directa fue admitida como resultado de algunas constataciones por medios termo-químicos, reontgenográficos y micrográficos. No obstante, aun se debaten algunas opiniones en desacuerdo principalmente en lo que se refiere al origen de la resistencia al ataque químico de los cementos puzolánicos.

Tratando de ajustar las diversas tendencias, podría decirse que la acción de los materiales puzolánicos en el proceso de endurecimiento es compleja y que tal vez comprende el efecto sucesivo de fenómenos de carácter físico y

químico; una acción puramente física que provoca la densificación y compactación del aglutinante; una acción físico-química representada por la absorción del hidrato de calcio por parte de la superficie de las partículas de puzolana y un acción netamente química evidenciada por la formación de compuestos, a través de la reacción cal-puzolana.

Los efectos físicos se hallan íntimamente ligados al peso específico relativo, la forma de las partículas, la porosidad y la finura, mientras que la acción química depende fundamentalmente de la composición de material.

Resulta, pues, admisible que la relación entre estos factores, que en conjunto representan la actividad puzolánica, sea susceptible de variar dentro de límites muy amplios. Ello, unido a las cambiantes condiciones de uso y de ambiente, conduce a la necesidad del estudio experimental como fuente definitiva de calificación para cualquier material puzolánico en particular.

### **1.3 Verificación de las puzolanas**

La reacción entre una puzolana y el hidróxido de calcio, es un fenómeno que puede ser influenciado en alto grado por la finura del material y la temperatura y humedad circundantes. En vista de ello, en cualquier proceso de investigación rutinaria de calidad debe ser indispensable ejercer el control de estas condiciones variables.

Sobre la base de constancia en la superficie específica, granulometría, humedad y temperatura, el poder de una puzolana puede examinarse a la luz de tres características principales:

- a) Su CAPACIDAD o sea la cantidad total de cal que es apta para fijar, independientemente del tiempo necesario para ello.
- b) Su REACTIVIDAD o rapidez de fijación de cal, que es una relación entre el tiempo transcurrido y la cantidad de cal fijada.
- c) Su CALIDAD demostrada por la resistencia mecánica del producto endurecido al cabo de un tiempo considerado suficiente.

Como la reacción entre cal y puzolana por lo general es lenta y de larga duración, la determinación de la capacidad total de fijación de cal, resulta un elemento de juicio impreciso en condiciones normales. Por ello, para fines de utilidad práctica, es común acudir solamente a dos tipos de ensayos:

- a) Ensayos para valuar la aptitud de una puzolana para reaccionar con la cal, y la velocidad de esta reacción.
- b) Ensayos tendientes a establecer la capacidad aglutinante de los productos de la reacción cal-puzolana.

Los ensayos del primer tipo, consisten en la determinación química de la cal combinada con al puzolana, las observaciones microscópicas y petrográficas, el análisis químico, el examen espectro gráfico, los métodos de difracción con rayos X y el análisis térmico diferencial.

Para los segundos, se acude a la determinación de las resistencias mecánicas en morteros cal-puzolana o cemento-puzolana.

### **1.3.1 Valuación química**

En general se admite que los ensayos del primer grupo, por dar resultados más inmediatos, pueden servir para una clasificación preliminar, cuando son debidamente conducidos e interpretados. De ellos, tal vez el más significativo sea el de la valuación química por solubilidad.

El método se funda en que, durante la combinación de la cal y la puzolana, los anhídridos ácidos (sílice y alúmina) pasan del estado insoluble al soluble mediante los silicatos y aluminatos.

Aunque existen diversas modalidades de experimentación, casi todas coinciden en determinar los porcentajes de  $\text{SiO}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , solubles en ácido clorhídrico diluido y frío con densidad 1.12 (método florentino) ya sea para puzolanas mantenidas en suspensión saturada con agua de cal, o bien para puzolanas combinadas con cal en una pasta de consistencia normal.

### **1.3.2 Valuación mecánica**

Aunque la determinación de la solubilidad tiene un alto valor indicativo que puede permitir la emisión de un juicio preliminar acerca de la calidad de una puzolana invariablemente se acude a los ensayos de resistencia mecánica como prueba definitivamente de calificación.

Normalmente los ensayos de tipo general se conducen sobre morteros ya sea con cal o con cemento en este aspecto podemos hacer referencia como ensayos típicos de resistencia mecánica a las pruebas de índice de actividad puzolánica con cal hidratada y con cemento portland usadas en los

laboratorios de Bureau of Reclamación, en Denver, Colorado y normalizadas por la ASTM.

En ambos casos se elabora mortero empleando una arena de calidad y de granulometría invariable. En la prueba con cal, el mortero consta, en peso, de una parte de cal hidratada de agua necesaria para dar al mortero una consistencia convenida. Con este mortero se fabrican especímenes que son conservados durante las primeras 24 horas a 23 grados centígrados y los siguientes 6 días a 55 grados centígrados. Al cumplir los 7 días se ensayan a ruptura por compresión, debiendo alcanzar un mínimo de 42.5 Kg/cm<sup>2</sup> para considerar que el material posee actividad puzolánica suficiente de acuerdo con la ASTM.

El ensayo con cemento portland se aplica en forma menos general, y se recomienda para calificar el comportamiento de una puzolana con un cemento en particular. El ensayo consiste en la elaboración de especímenes provenientes de morteros comparativos con proporción en peso de una parte de cementante, 2.75 partes de arena normal y el agua necesaria para dar la consistencia establecida. El primer mortero (tipo solo contiene cemento y a su resistencia después de permanecer de un día a 23 grados centígrados y 27 días a 38 grados centígrados se le da un valor 100% en el segundo mortero (prueba) se sustituye un 35 % del volumen absoluto del cemento por un volumen igual de puzolana y su resistencia, después de un curado idéntico, se estima como porcentaje de la resistencia del mortero tipo. La norma establece que una buena puzolana debe dar un índice de actividad puzolánica con Cemento Pórtland mayor del 75%.

Este ensayo permite juzgar también el requerimiento de agua de la puzolana en tales condiciones de prueba el compararse las cantidades de agua

que fueron necesarias empleadas para impartir la misma fluidez en ambos morteros.

#### **1.4 Usos de las puzolanas**

De acuerdo con la propiedad fundamental de las puzolanas de reaccionar con el hidróxido de calcio para formar compuestos resistentes, pueden decirse que en sus aplicaciones se persigue principalmente explotar esa característica combinando la puzolana con la cal hidratada o con el cemento portland en el primer caso la realización es directa entre ambos materiales combinados expresamente y en el segundo con la reacción ocurre entre la puzolana y la cal liberada durante la hidrólisis del cemento.

Como consecuencia de esta aplicación, son tres los usos característicos que es común darle a los materiales puzolánicos:

- En la preparación de morteros combinando la puzolana con cal
- En la elaboración de cementos puzolánicos ya sea moliendo conjuntamente la puzolana con el clinker o bien mezclando cemento y puzolana molidos y separadamente
- En la fabricación de morteros o concretos con cemento portland empujando la puzolana con un material adicionado a la revoltura en el momento de la mezcla.

Los morteros cal puzolana han tenido sus mayores aplicaciones en Europa, en donde inclusive existen normas de calidad que los verifican. En particular, es Italia donde su empleo se haya mas difundido.

La elaboración de cementos puzolánicos es una costumbre en muchos países de Europa, Asia y América. En cada uno de ellos hay especificaciones oficiales con requerimientos que pueden referirse al clinker y a la puzolana o al producto terminado.

En el tercer termino, la adición de puzolana finalmente dividida al concreto de cemento portland, es una práctica relativamente reciente que surgió de la necesidad de impartir en esos concretos ciertas características deseables por el uso de lo que podríamos llamar un cemento portland puzolana hecho en la obra.

A la utilización de este último método se le ha señalado como inconveniente por la incertidumbre en el logro de una mezcla íntima y homogénea entre el cemento y la puzolana presentes en cada revoltura de concreto. Es de suponerse que un mezclado defectuoso de la puzolana debe manifestarse en fuertes variaciones de las resistencias del concreto principalmente en las edades tempranas, sin embargo, en algunas obras ejecutadas por este procedimiento las resistencias del concreto han sido razonables uniformes, en las diferentes edades de pruebas.

### **1.5 Ventajas y desventajas de las puzolanas**

Las considerables ventajas que pueden obtenerse con el empleo de las puzolanas en los cementos puzolánicos están sistemáticamente expuesto a

continuación y que puede resumirse así, por un orden cronológico de acción en las características en los aglomerantes (morteros y concretos), tanto frescos como fraguados y endurecidos.

- En general (no siempre, por cuestión de disponibilidades y costo del transporte de la puzolana), una economía en el costo del aglomerante.
- Una mejor trabajabilidad, una menor tendencia a la segregación y a una menor tendencia a la exudación a igualdad de consistencia del concreto.
- Un mejor calor de hidratación, fraguado y una consiguiente menor tendencia a la fisuración de origen térmico
- Una mayor resistencia a la tensión
- Mayores resistencias, en general, a largo plazo
- Un valor mayor de la relación tensión o compresión, sobre todo a corto plazo
- Una mayor impermeabilidad y, en consecuencia, una menor tendencia al deslavado de la cal por agua muy pura o acidas (de bajo PH).
- Una mayor durabilidad, en general y en particular frente a ataques por sulfatos

- Una prevención del peligro de los efectos de la reacción expansiva y álcalis

Las desventajas de la puzolana son las siguientes:

- Una mayor cantidad de agua de amasado necesario para una consistencia dada.
- Una menor resistencia en la compresión sobre todo a edades cortas.
- Una retracción de secado algo mayor, en el caso que la puzolana sea eminentemente vítrea.
- Una expansión de humectación mayor en los morteros sumergidos.
- Una menor resistencia a la erosión y a la intemperie.
- Una mayor sensibilidad y menor resistencia a las heladas.

Fuente: Los conceptos de este capítulo fueron tomados del trabajo de graduación, DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CEMENTANTES Y DE USO PARA MEZCLAS PUZOLANAS-CAL-ARENA DE RIO. Autor Munduate García, Cristian Lorena, Ingeniero Civil 1987.

## **2. ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE LA CLASIFICACIÓN DE CAMPO Y DE LABORATORIO**

### **2.1 Clasificación de campo**

#### **2.1.1 Muestreo**

Este consta de un conjunto de porciones extraídas de bancos de suelos o rocas que al final actúan como la representación del total. Luego dichas muestras o porciones se analizan en laboratorio.

### **2.2 Clasificación de laboratorio**

#### **2.2.1 Ensayos físicos**

##### **2.2.1.1 Granulometría**

Este consta de un análisis utilizado para obtener la distribución del tamaño de partículas en una masa de suelo con la finalidad de poder clasificarlo. El método del tamizado mecánico se usa en suelos granulares que poseen poco o nada del material fino (limos y arcillas).

##### **2.2.1.2 Peso específico**

Este cubre la determinación de la densidad de cemento, su particular utilidad es la designación y control de una mezcla de concreto. La densidad de

un cemento es definido como la masa por unidad de volumen de los sólidos y se expresa en gramos por centímetro cúbicos. Este ensayo se rige por la norma ASTM C-188.

### **2.2.1.3 Peso unitario volumétrico**

Este no es más que la relación de su peso y el volumen ocupado en el espacio del producto y la misma se obtiene con la siguiente expresión.

$$PU = \frac{P}{V} \quad (1.2)$$

Donde:

PU = Peso unitario volumétrico en Kg/m<sup>3</sup>

P = peso del producto en Kg

V= volumen del producto en m<sup>3</sup>

### **2.2.1.4 Fineza**

Este ensayo cubre la determinación de la fineza de los cementos por medio del tamiz 325 (45 micrómetros). La fineza 325, es la separación mecánica del tamaño de partículas de un material, mediante la utilización del tamiz 325 (45 micrones). Los resultados se presentan como la diferencia entre la cantidad inicial y la cantidad que queda retenida en el tamiz por un factor de calibración. Se expresa en porcentajes, este ensayo se rige por la norma ASTM C-430. Se exige a los materiales puzolánicos, tener una fineza que pase el tamiz 325 no menor del 71%.

## **2.2.2 Ensayos mineralógicos**

Este es realizado con la finalidad de obtener los distintos minerales que puede tener una muestra en caso de las puzolanas se puede encontrar distintos minerales, por ejemplo, ceniza volcánica, cuarzo, vidrio volcánico, roca basáltica y otros. Para este estudio el mismo fue realizado en el laboratorio del Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas CESEM.

## **2.2.3 Ensayos químicos**

Este ensayo se efectúa con el objeto de saber en que porcentaje se encuentran los compuestos que conforman la puzolana. El ensayo determina las cantidades de alúmina, sílice, óxido férrico, óxido cálcico y óxido de magnesio. Para este estudio el mismo fue realizado en el laboratorio del Ministerio de Energía y Minas CESEM.

## **2.2.4 Ensayos Mecánicos**

### **2.2.4.1 Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión se determina usando cubos de 2 pulgadas de arista, son usualmente tomadas como unidad de medida para la resistencia del mortero, este ensayo está regulado por la Norma ASTM C-109.

Los especímenes de ensayo son hechos en moldes no absorbentes, la prueba se realiza en la una maquina llamada universal de ensayos, poniendo

los cubos sobre la mesa de esta, la cual posee una de sus placas articulada para tener una distribución uniforme de la carga sobre la cara del cubo. Por último el valor de la resistencia a la compresión se obtiene al dividir la carga que provocó la falla del cubo dentro del promedio de las áreas de las caras que estuvieron en contacto con las placas.

$$f'c = \frac{Pp}{A} \quad (1.3)$$

Donde:

$f'c$  = resistencia a la compresión en Kg/cm<sup>2</sup>

$Pp$  = Carga de falla en Kg

$A$  = Área de contacto en cm<sup>2</sup>

Fuente: Los conceptos de este capítulo fueron tomados de los trabajos de graduación ESTUDIO DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON TIERRA DE DIATOMEAS Y CAL HIDRATADA PARA USO EN CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS ECONÓMICAS. Autor: Aguilar Moran, Héctor Hugo. Ingeniero civil, 1980 y CARACTERIZACIÓN FÍSICA, MECÁNICA Y QUÍMICA DEL CEMENTO PUZOLÁNICO. Autor: Zeceña Girón, Carlos Efraín. Ingeniero Civil, 1989.

### **3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PUZOLANAS**

La propuesta para la caracterización de las puzolanas consta de los siguientes pasos.

Primero se extraen muestras de cualquier banco de suelos o rocas, después se le hace un análisis preliminar que consta de granulometría (con el fin de saber los diversos tamaños de sus partículas que tengan las muestras en su sitio de origen) antes de este paso se secan al sol las muestras que estén húmedas, después se procede a molienda de la muestra y secado de las mismas.

Seguidamente se hacen tres caracterizaciones que son mineralógico, químico y físico.

La caracterización mineralógica consta de un ensayo de laboratorio para determinar su composición de minerales, teniendo en cuenta que con los resultados se podrán descartar algunas muestras que no cumplan como material no puzolánico.

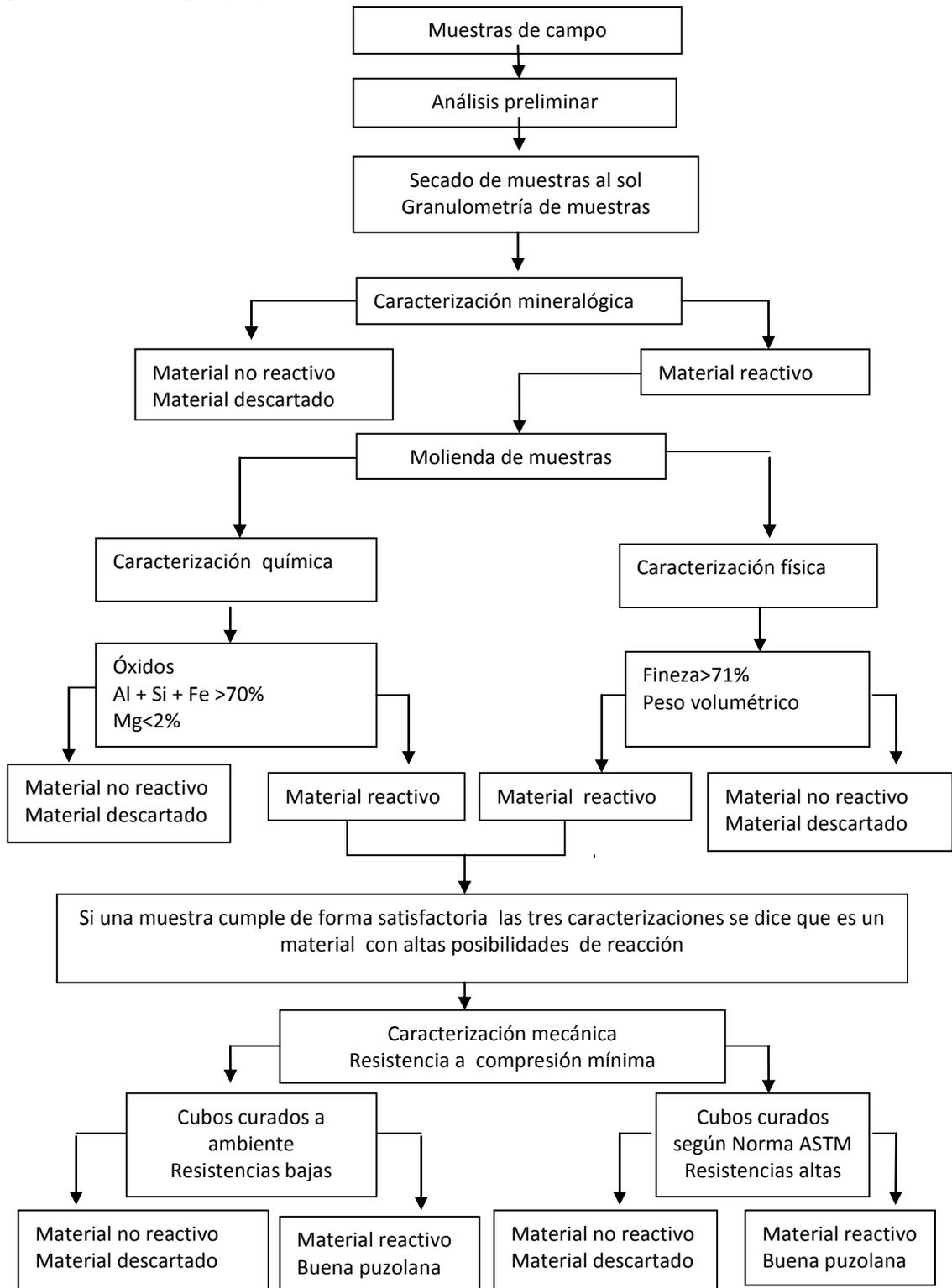
La caracterización química consta de un ensayo de laboratorio para determinar el % de óxidos en peso (aluminio, hierro, magnesio y silicio), con esto se logra descartar algunas muestras que no cumplan con lo siguiente; la sumatoria de sus óxidos no incluyendo el magnesio debe ser mayor al 70% y además el porcentaje de magnesio no deberá ser superior a 2%, puesto que al

mezclar una posible puzolana con alto % de magnesio con cal este no tiene una buena reacción química.

La caracterización física consta de una serie de ensayos para determinar el peso volumétrico y la fineza de la posible puzolana, con esto se descartaran algunas muestras que no tengan una fineza mayor a 71%.

La caracterización mecánica consta de la evaluación de resistencia a compresión. Para la resistencia a la compresión se hacen morteros que están compuestos de cemento (creado a partir de las muestras combinas con cal), arena de rio lavada y agua destilada. Después se harán cubos (especímenes) para ensayarlos a compresión, con esto se descartan algunas muestras que no cumplan con la resistencia mínima. Como resumen de la metodología propuesta se puede ver la figura 2.

**Figura 2 Metodología propuesta de caracterización de puzolana**



## **4. DESARROLLO DE LA FASE EXPERIMENTAL**

### **4.1 Clasificación de campo y resultados**

#### **4.1.1 Muestreo**

Se obtuvieron trece muestras provenientes de El Salvador las mismas se detallan a continuación.

##### **Muestra 1**

Procedencia: Las Granadinas, caserío El Bebedero, del municipio de San Julián, en el Departamento de Sonsonate

Localización de punto de muestro: Yacimiento del lugar

Color: café

Estructura: Compacta

##### **Muestra 2**

Procedencia: Municipio de Armenia, en el Km 40 de la carretera que va de San Salvador a Sonsonate

Localización de punto de muestreo: Yacimiento del lugar

Color: Beige

Estructura: Granular fina

### Muestra 3

Procedencia: Finca las Lajas, entrada a Cerro Verde, Km 45 carretera a San Julián

Localización de punto de muestreo: A 3 km de la sede de la cooperativa Las Lajas

Color: Rojizo

Estructura: Granular Compacta

### Muestra 4

Procedencia: Finca Las Lajas, entrada a Cerro Verde, Km 45

Localización de punto de muestreo: A 3 km de la sede de la cooperativa Las Lajas

Color: Negro

Estructura: Granular compacta

### Muestra 5

Procedencia: Finca Las Lajas, entrada a Cerro Verde, Km 45

Localización de punto de muestreo: A 2 km de la sede de Las Lajas hacia la Chacarita

Color: Blanco

Estructura: Granular fina

### Muestra 6

Procedencia: Candelaria, departamento de Cuscatlán

Localización de punto de muestreo: Yacimiento a 100 metros de la casa de Don Juan Alvarado

Color: Beige

Estructura: Granular

#### Muestra 7

Procedencia: Lago de Illopango, cerca de Candelaria, en el departamento de Cuscatlán

Localización de punto de muestreo: Yacimiento en el desagüe del lago

Color: Gris

Estructura: Granular

#### Muestra 8

Procedencia: Lago de Illopango, cerca de Candelaria, en el departamento de Cuscatlán

Localización de punto de muestreo: Yacimiento en el desagüe del lago

Color: Amarillo

Estructura: Compacta

#### Muestra 9

Procedencia: Santa Clara a Calderitas y San Esteban

Localización de punto de muestreo: Yacimiento del cerro de la Molina

Color: Negro

Estructura: Granular terrosa

#### Muestra 10

Procedencia: Camino a Santa Clara

Localización de punto de muestreo: A aproximadamente 3 km de Apastepeque

Color: Café rojizo

Estructura: Granular terrosa

#### Muestra 11

Procedencia: Río Quezalapa, a 5 km de Cinqueras, entre los Municipios de Cinqueras y Suchitoto

Localización de punto de muestreo: Sedimentación a orillas del río

Color: Gris

Estructura: Granular

#### Muestra 12

Procedencia: Río Quezalapa, a 5 km de Cinqueras, entre los Municipios de Cinqueras y Suchitoto

Localización de punto de muestreo: Yacimiento en Cantón San Nicolás

Color: Gris claro

Estructura: Compacta a terrosa

#### Muestra 13

Procedencia: Caserío Carrasco, entre Tejutepeque y Cinqueras, a 4 km de Tejutepeque

Localización de punto de muestreo: Yacimiento en cercanías al barranco el Burro

Color: Beige

Estructura: Compacta a terrosa

### **4.1.2 Tratamiento preliminar de las muestras**

Después de haber extraído las muestras se procedió a colocar las muestras en recipientes adecuados para que conservaran su humedad y condiciones de sitio, luego se procedió a secar las muestras al sol para poder

realizar después el ensayo de granulometría, con en fin de saber el tamaño de las partículas naturales, los resultados se detallan en la tablas I al XXIV.

#### 4.1.2.1 Granulometría

##### Muestra 1

Muestra representativa

Ensayo No.1

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

**Tabla I Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 1**

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"	830	660	170	17%	83%
3/8"	1370	550	820	82%	1%
No. 8	470	460	10	1%	0
No. 30	360	360	0	0	0
Fondo	360	360	0	0	0

Descripción del suelo: Escoria volcánica de color café oscuro, con un alto porcentaje de grava de alta densidad y poco porcentaje de finos.

Observaciones: Se pudo observar que dentro de las partículas gruesas, hay rocas de distintas densidades y que el porcentaje de finos es muy bajo.

Nota: Como se puede observar anteriormente hay porcentajes de finos muy bajos así que se procedió a triturar manualmente la muestra para después.

hacer otro ensayo de granulometría el cual se presenta a continuación.

Muestra representativa

Ensayo No. 2

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla II Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 1

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"	1260	660	600	60%	40%
3/8"	910	550	360	36%	4%
No. 8	460	460	0	0	4%
No. 30	380	360	20	2%	2%
Fondo	380	360	20	2%	0

Descripción del suelo: Escoria volcánica de color café oscuro, con un alto porcentaje de Grava de alta densidad y poco porcentaje de finos.

Observaciones: Se pudo observar que dentro de las partículas gruesas, hay rocas de distintas densidades y que el porcentaje de finos es muy bajo.

## Muestra 2

Muestra representativa

Ensayo No. 1

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla III Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 1

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	570	550	20	2%	98%
No. 8	630	460	170	17%	81%
No. 30	520	360	160	16%	65%
Fondo	1010	360	650	65%	0

Descripción del suelo: Ceniza volcánica de color beige claro, con un alto porcentaje de arena y finos.

Observaciones: Se hace notar el alto grado de absorción que posee este material y su gran porcentaje de arena y finos.

Nota: Como se puede observar anteriormente hay alto porcentaje de arena y finos, se procedió a triturar manualmente la muestra para hacer otro ensayo de granulometría, el cual se presenta a continuación.

Muestra representativa

Ensayo No.2

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla IV Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 2

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	590	550	40	4%	96%
No. 8	650	460	190	19%	77%
No. 30	530	360	170	17%	60%
Fondo	960	360	600	60%	0

Descripción del suelo: Ceniza volcánica de color beige claro, con un alto porcentaje de arena y finos.

Observaciones: Se hace notar el alto grado de absorción que posee este material y su gran porcentaje de arena y finos.

### Muestra 3

Muestra representativa

Ensayo No. 1

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla V Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 3

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	730	550	180	18%	82%
No. 8	720	460	260	26%	56%
No. 30	650	360	290	29%	27%
Fondo	630	360	270	27%	0

Descripción del suelo: Escoria de color rojo oscuro, de mediana densidad y mediano grado de absorción.

Observaciones: Sobresale el bajo porcentaje de partículas gruesas en relación con el resto de las mismas.

Nota: Como se puede observar anteriormente hay alto porcentaje de finos, se procedió a triturar manualmente la muestra para hacer otro ensayo de granulometría el cual se presenta a continuación.

Muestra representativa

Ensayo No. 2

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla VI Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 3

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	650	550	100	10%	90%
No. 8	680	460	220	22%	68%
No. 30	640	360	280	28%	40%
Fondo	760	360	400	40%	0

Descripción del suelo: Escoria de color rojo oscuro, de mediana densidad y mediano grado de absorción.

Observaciones: Sobresale el bajo porcentaje de partículas gruesas en relación con el resto de las mismas.

## Muestra 4

### Muestra representativa

#### Ensayo No.1

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla VII Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 4

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	340	550	340	34%	66%
No. 8	440	460	440	44%	22%
No. 30	140	360	140	14%	8%
Fondo	80	360	80	8%	0

Descripción del suelo: Escoria de color negro, de baja densidad, alto grado de absorción y bajo contenido de finos.

Observaciones: Sobresale el bajo porcentaje de partículas finas en relación con el resto de la muestra; también su alto grado de absorción.

Nota: Como se puede observar anteriormente hay bajo porcentaje de partículas finas, se procedió a triturar manualmente la muestra para hacer otro ensayo de granulometría el cual se presenta a continuación.

Muestra representativa

Ensayo No. 2

Peso bruto seco: 1210 gr

Tara: \_\_\_\_\_ gr

Peso neto seco: 1210 gr

Tabla VIII Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 4

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	470	550	470	38.84%	61.16%
No. 8	510	460	510	42.15%	19.01%
No. 30	150	360	150	12.40%	6.61%
Fondo	80	360	80	6.61%	0

Descripción del suelo: Escoria de color negro, de baja densidad, alto grado de absorción y bajo contenido de finos.

Observaciones: Sobresale el bajo porcentaje de partículas finas en relación con el resto de la muestra; también su alto grado de absorción.

## Muestra 5

### Muestra representativa

#### Ensayo No. 1

Peso bruto seco: 1250 gr

Tara: 260 gr

Peso neto seco: 990 gr

Tabla IX Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 5

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	570	550	20	2.02%	97.98%
No. 8	570	460	110	11.11%	86.87%
No. 30	490	360	130	13.13%	73.74%
Fondo	1110	380	730	73.74%	0

Descripción del suelo: Pómez de color blanco, mediano grado de absorción y alto contenido de finos.

Observaciones: Se hace notar la gran fineza del material y su aparente humedad, dado que la Muestra representativa se dejó en el horno a 110°C por 2 días, midiendo su peso a las 24 horas y notando que a las 48 horas, su peso había variado 10 gr, lo que representa tan sólo un 1% de humedad.

## Muestra 6

Muestra representativa

Ensayo No. 1

Peso bruto seco: 1140 gr

Tara: 150 gr

Peso neto seco: 990 gr

Tabla X Ensayo No. 1 de granulometría muestra 6

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"			70	7.07%	92.93%
3/8"	560	550	10	1.01%	91.92%
No. 8	570	460	110	11.11%	80.81%
No. 30	540	360	180	18.18%	62.63%
Fondo	1000	380	620	62.63%	0

Descripción del suelo: Ceniza de color beige, mediano grado de absorción, alto contenido de finos y pequeño pero significativo contenido de partículas gruesas.

Observaciones: Se hace notar la mediana fineza del material y su aparente humedad, dado que la Muestra representativa se dejó en el horno a 110°C por 2 días, midiendo su peso a las 24 horas y notando que a las 48 horas, su peso había variado 10 gr, lo que representa tan sólo un 1% de humedad; comportamiento similar al de la muestra No. 5.

## Muestra 7

### Muestra representativa

#### Ensayo No. 1

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XI Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 7

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	600	550	50	5%	95%
No. 8	620	460	160	16%	79%
No. 30	630	360	270	27%	52%
Fondo	880	360	520	52%	0

Descripción del suelo: Arena de río, con gran porcentaje de partículas finas y alta cantidad de fragmentos de rocas.

Observaciones: Se hace notar su mediano a alto grado de absorción.

Nota: Como se puede observar anteriormente hay alto porcentaje de partículas finas, se procedió a triturar manualmente la muestra para hacer otro ensayo de granulometría, el cual se presenta a continuación.

Muestra representativa

Ensayo No. 2

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XII Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 7

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	600	550	50	5%	95%
No. 8	580	460	120	12%	83%
No. 30	620	360	260	26%	57%
Fondo	930	360	570	57%	0

Descripción del suelo: Arena de río, con gran porcentaje de partículas finas y alta cantidad de fragmentos de rocas.

Observaciones: Se hace notar su mediano a alto grado de absorción.

## Muestra 8

Muestra representativa

Ensayo No. 1

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XIII Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 8

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"			110	11%	89%
3/8"	690	550	140	14%	75%
No. 8	740	460	280	28%	47%
No. 30	520	360	160	16%	31%
Fondo	670	360	310	31%	0

Descripción del suelo: Arena pomez consolidada de color amarillo, con un mediano contenido de partículas gruesas.

Observaciones: presenta un aparente alto grado de absorción y consolidación de material en forma de rocas.

Nota: Como se puede observar anteriormente hay mediano contenido de partículas gruesas, se procedió a triturar manualmente la muestra para hacer otro ensayo de granulometría el cual se presenta a continuación.

Muestra representativa

Ensayo No. 2

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XIV Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 8

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"			120	12%	88%
3/8"	680	550	130	13%	75%
No. 8	700	460	240	24%	51%
No. 30	520	360	160	16%	35%
Fondo	710	360	350	35%	0

Descripción del suelo: Arena pómez consolidada de color amarillo, con un mediano contenido de partículas gruesas.

Observaciones: presenta un aparente alto grado de absorción y consolidación de material en forma de rocas.

## Muestra 9

### Muestra representativa

#### Ensayo No. 1

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XV Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 9

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"			110	11%	89%
3/8"	660	550	110	11%	78%
No. 8	980	460	520	52%	26%
No. 30	560	360	200	20%	6%
Fondo	420	360	60	6%	0

Descripción del suelo: Escoria volcánica de color negro, con una distribución similar entre partículas finas y partículas gruesas y baja densidad.

Observaciones: Presenta un alto grado de absorción y alta porosidad en sus partículas; también presenta matices de color azul en sus rocas.

Nota: Como se puede observar anteriormente existe una distribución similar de partículas gruesas y finas, se procedió a triturar manualmente la muestra para hacer otro ensayo de granulometría el cual se presenta a continuación.

Muestra representativa

Ensayo No. 2

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XVI Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 9

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	740	550	190	19%	81%
No. 8	1000	460	540	54%	27%
No. 30	600	360	240	24%	3%
Fondo	390	360	30	3%	0

Descripción del suelo: Escoria volcánica de color negro, con una distribución similar entre partículas finas y partículas gruesas y baja densidad.

Observaciones: Presenta un alto grado de absorción y alta porosidad en sus partículas; también presenta matices de color azul en sus rocas

## Muestra 10

### Muestra representativa

#### Ensayo No. 1

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XVII Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 10

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	690	550	140	14%	86%
No. 8	960	460	500	50%	36%
No. 30	560	360	200	20%	16%
Fondo	520	360	160	16%	0

Descripción del suelo: Escoria volcánica de color rojo, mediana densidad en sus partículas y alto contenido de partículas gruesas

Observaciones: Se pudo observar que las partículas presentan un mediano grado de porosidad, pero un alto grado de absorción de agua

Nota: Como se puede observar anteriormente hay bajo porcentaje de partículas finas, se procedió a triturar manualmente la muestra para hacer otro ensayo de granulometría, el cual se presenta a continuación.

Muestra representativa

Ensayo No. 2

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XVIII Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 10

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	650	550	100	10%	90%
No. 8	970	460	510	51%	39%
No. 30	590	360	230	23%	16%
Fondo	520	360	160	16%	0

Descripción del suelo: Escoria volcánica de color rojo, mediana densidad en sus partículas y alto contenido de partículas gruesas.

Observaciones: Se pudo observar que las partículas presentan un mediano grado de porosidad, pero un alto grado de absorción de agua.

## Muestra 11

### Muestra representativa

#### Ensayo No. 1

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XIX Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 11

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	590	550	40	4%	96%
No. 8	740	460	280	28%	68%
No. 30	630	360	270	27%	41%
Fondo	770	360	410	41%	0

Descripción del suelo: Arena de río, con alto contenido de pómez, y bajo contenido de partículas finas.

Observaciones: Alto grado de absorción debido a la cantidad de pómez presente en la muestra.

Nota: Como se puede observar anteriormente hay bajo porcentaje de partículas finas, se procedió a triturar manualmente la muestra para hacer otro ensayo de granulometría, el cual se presenta a continuación.

Muestra representativa

Ensayo No. 2

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XX Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 11

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	590	550	40	4%	96%
No. 8	710	460	250	25%	71%
No. 30	630	360	270	27%	44%
Fondo	800	360	440	44%	0

Descripción del suelo: Arena de río, con alto contenido de pómez, y alto contenido de partículas finas.

Observaciones: Alto grado de absorción debido a la cantidad de pómez presente en la muestra.

## Muestra 12

Muestra representativa

Ensayo No. 1

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XXI Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 12

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	760	550	210	21%	79%
No. 8	840	460	380	38%	41%
No. 30	570	360	210	21%	20%
Fondo	560	360	200	20%	0

Descripción del suelo: Material fino de color blanco, con consolidación del mismo en forma de rocas.

Observaciones: Presenta un aparente grado de absorción alto, y un bajo contenido de partículas gruesas, en relación al total de la muestra.

Nota: Como se puede observar anteriormente hay bajo porcentaje de partículas gruesas, se procedió a triturar manualmente la muestra para hacer otro ensayo de granulometría, el cual se presenta a continuación:

Muestra representativa

Ensayo No. 2

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XXII Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 12

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"			200	20%	80%
3/8"	920	550	370	37%	43%
No. 8	730	460	270	27%	16%
No. 30	450	360	90	9%	7%
Fondo	430	360	70	7%	0

Descripción del suelo: Material fino de color blanco, con consolidación del mismo en forma de rocas.

Observaciones: Presenta un aparente grado de absorción alto, y un bajo contenido de partículas gruesas, en relación al total de la muestra.

## Muestra 13

Muestra representativa

Ensayo No. 1

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XXIII Ensayo No. 1 de granulometría, muestra 13

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"					
3/8"	830	550	280	28%	72%
No. 8	660	460	200	20%	52%
No. 30	540	360	180	18%	34%
Fondo	700	360	340	34%	0

Descripción del suelo: Ceniza volcánica color gris claro, poco consolidada en forma de rocas, las que presentan alto grado de absorción.

Observaciones: Resalta un bajo contenido de partículas gruesas en relación con el total de la muestra y un alto grado de absorción.

Nota: Como se puede observar anteriormente hay bajo porcentaje de partículas gruesas, se procedió a triturar manualmente la muestra para hacer otro ensayo de granulometría, el cual se presenta a continuación.

Muestra representativa

Ensayo No. 2

Peso bruto seco: 1020 gr

Tara: 20 gr

Peso neto seco: 1000 gr

Tabla XXIV Ensayo No. 2 de granulometría, muestra 13

Tamiz	Peso bruto (gr)	Tara (gr)	Peso neto (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
2"			180	18%	82%
3/8"	630	550	80	8%	74%
No. 8	660	460	200	20%	54%
No. 30	550	360	190	19%	35%
Fondo	710	360	350	35%	0

Descripción del suelo: Ceniza volcánica color gris claro, poco consolidada en forma de rocas, las que presentan alto grado de absorción.

Observaciones: Resalta un bajo contenido de partículas gruesas en relación con el total de la muestra y un alto grado de absorción.

## 4.2 Clasificación de laboratorio y resultados

Antes de proceder con los ensayos físicos se hizo el secado y molienda correspondiente (para la molienda se utilizó el molino de bolas ver figura 12), los resultados se presentan en la tabla XXV. El lector puede ver que solo fue efectuado para las muestras 2, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12 y 13; porque las demás muestras fueron descartadas por el ensayo mineralógico ver la sección 4.2.2.

**Tabla XXV Secado y molienda de muestras**

Muestra	2	5	6	7	8	10	11	12	13
secado	2 (al sol)	4 (al sol)	2 (al sol)	2 (al sol)	3 (al sol)	1 (al sol)	2 (al sol)	2 (en horno)	2 (al sol)
Molienda	2 horas	2 horas	2 horas	3 horas	2 horas	2 horas	2 horas	3 horas	2 horas

### 4.2.1 Ensayos físicos

#### 4.2.1.1 Peso unitario volumétrico

Después de pesar las muestras y de obtener su volumen correspondiente se procedió a calcular el peso unitario para cada muestra ver tabla XXVI.

**Tabla XXVI Peso unitario volumétrico**

Muestra	W material gr	Volumen de material Cm3	W unitario Kg/m3
2	175	140	1251.50
5	120	140	858.17
6	158	140	1129.93
7	228	140	1630.53
8	162	140	1158.53
10	237	140	1694.89
11	181	140	1294.41
12	169	140	1208.59
13	144	140	1029.81

#### 4.2.1.4 Fineza

El ensayo de fineza fue elaborado por el laboratorio central Centro Tecnológico de Cementos Progreso y los resultados obtenidos se resumen en la tabla XXVII. Para ver de forma detallada los resultados ver el anexo 1.

**Tabla XXVII Fineza de posibles puzolanas**

Fineza 325 ( 45 micrómetros)							
Muestra							
2	5	6	7	8	11	12	13
81.94%	82.17%	75.28%	37.85%	80.35%	60.48%	60.15%	85.58%

El lector puede darse cuenta que el ensayo de fineza solo se realizo para las muestras 2, 5, 6, 7, 8, 11, 12 y 13; esto se debe a que las muestras 1, 3, 4 y 9 fueron descartadas por el ensayo mineralógico ver sección 4.2.2 adicionalmente la muestra 10 fue descartada por el ensayo químico ver la sección 4.2.3.

#### 4.2.2 Ensayos mineralógicos

El ensayo mineralógico fue efectuado por el laboratorio del Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas CESEM, los resultados se presentan de forma resumida en la tabla XXVIII, para ver de forma detallada los resultados consultar el anexo 2.

**Tabla XXVIII Composición mineralógica**

<b>MUESTRA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>COMPOSICIÓN MINERALÓGICA</b>
1	Riodacita (roca volcánica)	Piroxenos, anfíboles, vidrio volcánico
2	Material piroclástico fino	Cenizas y polvo volcánico silíceo
3	Escoria volcánica rojiza	Minerales de hierro y magnesio
4	Escoria volcánica negra	Piroxenos, anfíboles y vidrio volcánico
5	Material Piroclástico Silíceo	Ceniza y polvo volcánico silíceo con fragmentos de pómez
6	Ceniza volcánica Beige	Ceniza volcánica
7	Ceniza volcánica Beige	Fragmentos de cuarzo (SiO <sub>2</sub> ), vidrio volcánico, fragmentos basálticos y Horblenda
8	Toba	Ceniza y polvo volcánico y fragmentos de pómez
9	Basalto escoriáceo	Roca basáltica conteniendo Piroxenos, olivinos, Feldespatos y en poca cantidad, Cuarzos
10	Escoria volcánica	Roca dacítica conteniendo Piroxenos, anfíboles, Feldespatos y en poca cantidad, Cuarzos
11	Arena volcánica pomácea	Fragmentos de pómez, cuarzo y vidrio volcánico con algunos fragmentos oscuros (basaltos)
12	Material Piroclástico	Fragmentos de pómez, ceniza y polvo volcánico
13	Ceniza volcánica	Ceniza y polvo volcánico, con algunos fragmentos Líticos (andesitas)

Como resultado del ensayo se diagnostico que las muestras 2, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, y 13 tienen posible reactividad puzolánica alta, por consiguiente las demás muestras quedan descartadas como material no puzolánico.

#### **4.2.3 Ensayos químicos**

El ensayo químico fue realizado por el laboratorio del Ministerio de Energía y Minas, nótese que solo fueron practicadas para dichas muestras puesto que en el ensayo mineralógico fueron descartadas algunas muestras, los resultados obtenidos se presentan de forma resumida en la tabla XXIX, para ver de forma detallada los resultados consultar el anexo 3.

**Tabla XXIX Resultados de ensayo químico**

Muestra	Óxidos (2)				
	Silicio % en peso	Aluminio % en peso	Hierro % en peso	Magnesio % en peso	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> > 70%
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	
2	61.1	15.1	3.91	1.2	80.11
5	61.14	14.46	3.55	0.68	79.15
6	62.2	15.07	3.69	1.05	80.96
7	59.37	17.46	4.43	1.18	81.26
8	67.92	14.25	3.47	0.79	85.64
10	49.3	17.09	12.6	<b>7.81</b>	78.99
11	66.86	15.16	2.88	0.97	84.9
12	67.05	13.07	1.39	0.75	81.51
13	62.49	14.97	3.26	0.45	80.72

Como resultado del ensayo todas las muestras pasan como materiales puzolánico porque la sumatoria de sus óxidos son mayores a 70%, sin embargo, la muestra No. 10 se descarta porque tiene más del 2% de magnesio.

#### **4.2.4 Ensayos mecánicos**

##### **4.2.4.1 Resistencia a la compresión**

Para realizar este ensayo primero se tuvieron que hacer mezclas de mortero para después hacer cubos de 2 pulgadas de arista, para todas las mezclas se utilizó 484 gramos de cemento (dicho cemento es comprendido por 34 % de cal y 66 % de puzolana), 1620 gramos de arena de río lavada y agua destilada, para ver las proporciones utilizadas ver tabla XXX.

**Tabla XXX Proporción para mezcla de mortero**

MUESTRA	Cemento gr	Arena gr	Agua gr	Proporción en peso			flow %
				c/c	arena/cemento	agua/cemento	
2	484	1620	400	1	3.35	0.83	112.5
5	484	1620	430	1	3.35	0.89	111.0
6	484	1620	412	1	3.35	0.85	111.0
7	484	1620	420	1	3.35	0.87	105.0
8	484	1620	410	1	3.35	0.85	105.0
11	484	1620	410	1	3.35	0.85	107.5
12	484	1620	460	1	3.35	0.95	107.0
13	484	1620	425	1	3.35	0.88	105.5

Con los cubos ya fraguados y curados (al ambiente) se procedió a ensayar los mismos a 7 días y 28 días, los cuales reflejaron los resultados resumidos en las tablas XXXI y XXXII.

**Tabla XXXI Cargas axiales y resistencias de cubos a 7 días**

Muestra	Cargas Axiales (lb)			Pp. (lb)	A	f'c		$\sigma$	P mínima	P máxima	Pd	F'c	
	1er. cubo	2do. cubo	3er. cubo		Pul2	lb/pul2	Kg/cm2		lb	lb	lb	lb/pul2	Kg/cm2
2	264	297	268.4	276.47	4	69.12	4.87	14.63	261.84	291.1	266.2	66.55	4.69
5	264	231	242	245.67	4	61.42	4.33	13.72	231.95	259.39	236.5	59.13	4.17
6	286	297	319	300.67	4	75.17	5.3	13.72	286.95	314.39	291.5	72.88	5.13
7	55	88	88	77	4	19.25	1.36	15.56	61.44	92.56	77	19.25	1.36
8	100	100	200	133.33	4	33.33	2.35	47.14	86.19	180.47	100	25	1.76
11	143	143	143	143	4	35.75	2.52	0	143.00	143.00	143.00	35.75	2.52
12	99	99	88	95.33	4	23.83	1.68	5.19	90.14	100.52	95.33	23.83	1.68
13	242	242	286	256.67	4	64.17	4.52	20.74	235.93	277.41	242	60.5	4.26

Como se puede observar en las tablas XXXI y XXXII las resistencias a los 7 y 28 días son pobres, esto se debe a que los cubos se curaron a temperatura ambiente, mas sin embargo si se hubieren curado con temperatura controlada y saturación las resistencias serian mayores.

**Tabla XXXII Cargas axiales y resistencias de cubos a 28 días**

Muestra	Cargas Axiales (lb)			Pp. (lb)	A	f'c		$\sigma$	P mínima	P máxima	Pd	F'c	
	1er. cubo	2do. cubo	3er. cubo		Pul2	lb/pul2	Kg/cm2		lb	lb	lb	lb/pul2	Kg/cm2
2	1111	1133	1210	1151.33	4	575.67	40.56	42.44	1108.89	1193.77	1122.00	280.50	19.76
5	1540	1540	1518	1532.67	4	766.34	53.99	10.37	1522.30	1543.04	1532.70	383.17	27.00
6	1232	1265	1144	1213.67	4	606.84	42.75	51.07	1162.60	1264.74	1188.00	297.00	20.93
7	286	275	286	282.33	4	141.17	9.95	5.19	277.14	287.52	282.30	70.58	4.97
8	242	418	385	348.33	4	174.17	12.27	76.39	271.94	424.72	348.30	87.08	6.14
11	583	627	649	619.67	4	309.84	21.83	27.44	592.23	647.11	605.00	151.25	10.66
12	165	176	198	179.67	4	89.84	6.33	13.72	165.95	193.39	170.50	42.63	3.00
13	1639	1573	1650	1620.67	4	810.34	57.09	34.00	1586.67	1654.67	1620.70	405.17	28.55

Los datos anteriores fueron obtenidos por medio de las siguientes ecuaciones.

$$Pp = \frac{1er.+2do.+3er.}{3} \quad (1.4)$$

$$f'c = \frac{Pp}{A} \quad (1.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(1er.-Pp)^2 + (2do.-Pp)^2 + (3er.-Pp)^2}{3}} \quad (1.5)$$

$$Pmínima = Pp - \sigma \quad (1.6)$$

$$Pmáxima = Pp + \sigma \quad (1.7)$$

Pd= Promedio de cargas axiales (1er., 2do. y 3er.) siempre y cuando estén dentro del rango Pmínima y Pmáxima

$$F'c = \frac{Pd}{A} \quad (1.8)$$

Donde:

$P$  = carga Axial (1.er, 2do. y 3er) en lb

$P_p$  = carga axial promedio en lb

$A$  = Área de cubo en pul<sup>2</sup>

$f'_c$  = resistencia de cubo en lb/pul<sup>2</sup>

$\sigma$  = Desviación estándar

$P$  mínima = carga mínima en lb

$P$  máxima = carga máxima en lb

$P_d$  = Carga axial con desviación estándar en lb

$F'_c$  = resistencia con desviación estándar en lb/pul<sup>2</sup>

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo anterior se dieron los resultados de las caracterizaciones o ensayos de las trece muestras, a continuación se muestra los resultados en tres tablas resumidas.

**Tabla XXXIII Caracterización mineralógica y química**

Muestra	Caracterización	Caracterización química					Observación
	Mineralogía	Silicio % SiO <sub>2</sub>	Aluminio % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hierro % Fe <sub>2</sub> O	Magnesio % Mg	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O> 70%	
1	descartada						
2		61.10	15.10	3.91	1.00	80.11	
3	descartada						
4	descartada						
5		61.14	14.46	3.55	0.68	79.15	
6		62.20	15.07	3.69	1.05	80.96	
7		59.37	17.46	4.43	1.18	81.26	
8		67.92	14.25	3.47	0.79	85.64	
9	descartada						
10		49.30	17.09	12.6	<b>7.81</b>	78.99	descartada
11		66.86	15.16	2.88	0.97	84.90	
12		67.05	13.07	1.39	0.75	80.76	
13		62.49	14.97	3.26	0.45	80.27	

**Tabla XXXIV Ensayos físicos**

muestra	Molienda (horas)	t. secado (días)	Wvolumetrico (Kg/m <sup>3</sup> )	Rel. A/C	Flow (%)	Fineza 325 (%)
2	2.00	2 (al sol)	1251.50	0.83	112.50	81.94
5	2.00	4 (al sol)	858.17	0.90	111.00	82.17
6	2.00	2 (al sol)	1129.93	0.86	111.00	75.28
7	3.00	2 (al sol)	1630.53	0.88	105.00	37.85
8	2.00	3 (al sol)	1158.53	0.85	105.00	80.35
11	2.00	2 (al sol)	1294.41	0.85	107.50	60.48
12	3.00	2 (en horno)	1208.59	0.96	107.50	60.15
13	2.00	2 (al sol)	1029.81	0.89	105.50	85.58

**Tabla XXXV Ensayo mecánico a compresión**

Muestra	Compresión a 7 días							Compresión a 28 días						
	Carga	f'c		$\sigma$	Pd	F'c		Carga	f'c		$\sigma$	Pd	F'c	
		Lb	Lb/pul2			Kg/cm2	Lb		Lb/pul2	Kg/cm2			Lb	Lb/pul2
2	276.47	69.12	4.87	14.63	266.2	66.57	4.69	1151.33	575.67	40.56	42.44	1122	280.5	19.76
5	245.67	61.46	4.33	13.72	236.5	59.19	4.17	1532.67	766.34	53.99	10.37	1532.7	383.17	27.00
6	300.67	75.23	5.30	13.72	291.5	72.81	5.13	1213.67	606.84	42.75	51.07	1188.00	297.00	20.93
7	77.00	19.30	1.36	15.56	77.00	19.30	1.36	282.33	141.17	9.95	5.19	282.30	70.58	4.97
8	133.33	33.35	2.35	47.14	100.00	24.98	1.76	348.33	174.17	12.27	76.39	348.30	87.08	6.14
11	143	35.77	2.52	0.00	143.00	35.77	2.52	619.67	309.84	21.83	27.44	605.00	151.25	10.66
12	95.33	23.85	1.68	5.19	95.33	23.85	1.68	179.67	89.84	6.33	13.72	170.5	42.63	3.00
13	256.67	64.15	4.52	20.74	242.00	60.46	4.26	1620.67	810.34	57.09	34.00	1620.7	405.17	28.55

## 5.1 Análisis de resultados de laboratorio

De acuerdo con los resultados de laboratorio se puede observar que de las trece muestras sometidas al ensayo mineralógico ver tabla XXXIII, solo 9 son materiales puzolánicos (muestras 2, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12 y 13) por consiguiente las muestras 1, 3, 4 y 9 quedan descartadas.

Con los resultados del ensayo químico ver tabla XXXIII, se puede observar que todas las muestras cumplen con el requisito de que la sumatoria de sus óxidos para cada una de ellas, son mayores que 70% por lo tanto se dice que son materiales puzolánicos, sin embargo, la muestra 10 refleja un exceso en el porcentaje de magnesio es decir es mayor de 2 % por consiguiente esta muestra queda descartada como material no puzolánico. De acuerdo con lo anterior las muestras 2, 5, 6, 7, 8, 11, 12 y 13 son materiales puzolánicos.

Con respecto al peso volumétrico de las muestras se puede observar que todas se mantienen en un promedio de 1195.18 Kg por m<sup>3</sup> ver tabla XXXIV.

Con respecto a la fineza observamos que todas las muestras tienen alto % de fineza, excepto por las muestras 7, 11 y 12 que tienen menos del 71 % ver tabla XXXIV por lo cual las mismas quedan descartadas por no cumplir con la fineza mínima requerida para una material puzolánico.

Con respecto al ensayo de flow ver tabla XXXIII, se puede observar que todos están dentro de un rango permisible y/o aceptable.

Con respecto a la resistencia a la compresión observamos que las resistencias son realmente bajas; esto se debe a que en este estudio los cubos (especímenes) fueron curados a temperatura ambiente, sin embargo, si se hubieren curado los cubos a temperatura controlada y por saturación las resistencias hubiesen sido más altas.

Independientemente de lo descrito en el párrafo anterior con respecto a la resistencia a la compresión observamos como la fineza del material esta íntimamente ligado con la resistencia a la compresión de tal forma que se puede decir que la resistencia a compresión de un mortero es directamente proporcional a la finura del material cementante (puzolana + cal), esto lo observamos fácilmente de la tabla XXXV y figuras 4 y 5, para la muestra 7 que posee un fineza de 37.85 % observamos que es la que menos compresión resiste ver tabla XXXV y figura 6, al contrario observamos que la muestra 5 y 13 que tienen % de fineza superiores al 82% observamos que alcanzan una resistencia alrededor de 27.00 y 28.55 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente

a los 28 días. En fin podemos observar que todas las muestras aumentan sus resistencias al pasar el tiempo ver figura 7.

En conclusión se puede decir que al final las muestras 2, 5, 6 y 13 son las que muestran los mejores resultados, por lo tanto se puede decir que son muy buenas puzolanas.

## **5.2 Comparación de resultados con metodología propuesta**

Es de esperar que la metodología propuesta en el capítulo 3, con respecto a la fase de experimentación pudiera variar, en efecto con la metodología propuesta se tenía cierta hipótesis de que algunas muestras pudieran dar resultados negativos (en este caso materiales no puzolánicos) y positivos (materiales puzolánicos), al igual que la metodología la fase de experimentación conduce a resultados negativos y positivos; de acuerdo con lo anterior se puede decir que la metodología propuesta funciona adecuadamente. Siempre y cuando se someta a las muestras a los ensayos correspondientes que dicta la propuesta. Hay que hacer el ensayo a compresión para muestras curadas a temperatura y humedad de acuerdo a la norma ASTM C-109, no existe aún una correlación entre muestras curadas al ambiente y muestras con temperatura controlada.

## CONCLUSIONES

1. El ensayo mineralógico descarta las muestras 1, 3, 4 y 9 por tener baja reactividad puzolánica.
2. El ensayo químico descarta a la muestra 10, puesto que esta demuestra que tiene un elevado % de óxido de magnesio; la razón es simple el óxido de magnesio no tiene una buena reacción química con la cal.
3. El ensayo de fineza descarta a las muestras 7, 11 y 12 por tener un % menor al 71%.
4. El ensayo a compresión descarta a las muestras 7, 8, 11 y 12 por tener una baja resistencia a la compresión comparada con las demás.
5. Se puede decir claramente que al tener una puzolana con un % de fineza alto esta resulta mejor, ya que al hacer morteros con este material la resistencia a la compresión se incrementa, debido a la fineza.
6. El ensayo a compresión muestra que las muestras 2, 5, 6 y 13 son las mejores puesto que estas reflejan los mejores resultados.

7. Con los resultados obtenidos se puede decir que la propuesta para la caracterización de puzolanas es válida siempre y cuando se sigan los pasos en ella descrita.

## RECOMENDACIONES

1. Es necesario llevar un estricto control sobre los ensayos mineralógicos, químicos, físicos y mecánicos, ya que de estos resultados depende de la posible validación de un material puzolánico, simultáneamente estos ensayos deben registrarse de acuerdo a las normas ASTM.
2. A veces cuando las muestras tengan una estructura rocosa es necesario triturar las rocas de forma manual para acelerar la molienda, seguidamente después se hace la molienda con una máquina, ya que de esta forma se ahorra tiempo.
3. Cuando se hagan los ensayos de compresión vale la pena realizar ensayos a 3, 7, 14 y 28 días para apreciar un mejor comportamiento en la resistencia de acuerdo a la edad.
4. Se sugiere que se hagan ensayos con cubos curados a temperatura controlada y por saturación, para comparar las resistencias con respecto a cubos curados al ambiente.

5. Para una determinación más exacta de una puzolana efectiva se debe realizar más ensayos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar Moran, Héctor Hugo. Estudio de estabilización de suelos con tierra de diatomeas y cal hidratada para uso en construcción de viviendas económicas. Trabajo de graduación de Ingeniero Civil Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1980.
2. American Society for Testing and Materials. Anual Book of Standards 2,004. Section 4, volume 04.01. "Masonry Cement". Designation C-91, "Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime". Designation C-593. Estados Unidos, Philadelphia 2004.
3. Munduate García, Cristian Lorena. Determinación de características cementantes y de uso para mezclas puzolanas-cal-arena de río. Trabajo de graduación Ingeniero Civil Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1987.
4. Zeceña Girón, Carlos Efraín. Caracterización física, mecánica y química del cemento puzolánico. Trabajo de Graduación Ingeniero Civil, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala; Facultad de Ingeniería, 1989.

**ANEXO 1**  
**ENSAYO DE FINEZA 325 (45 MICRÓMETROS)**



**Laboratorio Central  
Centro Tecnológico**

15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera  
Tel: 22864178 Fax: 22864181



**INFORME**

<b>Cliete:</b>	CENTRO TECNOLOGICO	<b>OT:</b>	9056	<b>Aprobado Fecha :</b>	23/04/2007
<b>Contacto:</b>	OMAR EDUARDO GÓDINEZ JOLON	<b>Fecha:</b>	14/04/2007		X
<b>Proyecto:</b>	TESIS	<b>Laboratorio:</b>	Cementos y Cales		
<b>Procedencia:</b>	CENTRO DE INVESTIGACION USAC	<b>Analista:</b>	GM		
<b>Muestra:</b>	PUZOLANA	<b>Supervisor:</b>	MDL	Ing. Mario de León M. Jefe de Laboratorio	

**REPORTE DE ENSAYOS FISICOS EN CEMENTO**

MUESTRA	FECHA	FINEZA
		325
Muestra #2	17/04/2007	81.94
Muestra #5	17/04/2007	82.17
Muestra #6	17/04/2007	76.28
Muestra #7	17/04/2007	37.85
Muestra #8	17/04/2007	80.35
Muestra #11	17/04/2007	60.48
Muestra #12	17/04/2007	60.15
Muestra #13	17/04/2007	85.58

**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.**

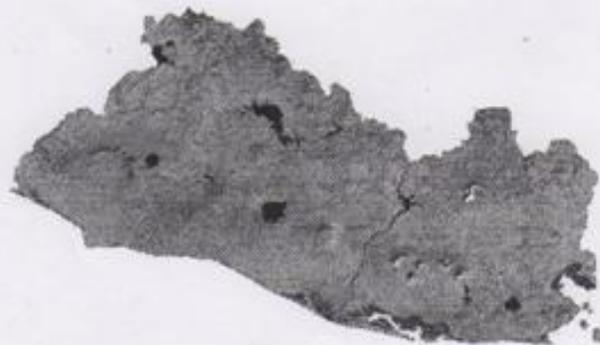
**ANEXOS 2**  
**CARACTERIZACIÓN Y/O ENSAYO DE MINERALOGÍA**



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas, CESEM  
Facultad de Ingeniería

### CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y PETROGRÁFICA

Analista: **Ing. Julio Luna**  
Asesor de tesis: **Ing. Javier Quiñónez**  
Tema de Tesis: **Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales**  
Tesisista: **Omar Eduardo Godínez Jolón**  
Carrera: **Ingeniería Civil**  
Procedencia de muestras: **República de El Salvador**  
Total de muestras analizadas: **13**  
Muestras con posible reactividad puzolánica alta: **9** (2, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12 y 13)  
Muestras con posible reactividad puzolánica baja: **4** (1, 3, 4, 9)



*República de El Salvador*



(Copia) Archivo CESEM



**Caracterización Mineralógica y Petrográfica**

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 01/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 1

**Procedencia:** Las Granadinas, Caserío el Bebedero, del Municipio de San Julián, en el departamento de Sonsonate, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** Yacimiento del lugar

**Estructura:** Compacta

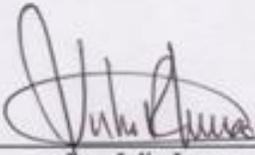
**Color:** Café

**Composición mineralógica:** Piroxenos, anfíboles y vidrio volcánico.

**Composición química probable:** Sílice, Hierro y Magnesio.

**Nombre:** Riodacita (roca volcánica)

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Sílice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
Ing. Julio Luna





**Caracterización Mineralógica y Petrográfica**

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 01/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 2

**Procedencia:** Del municipio de Armenia, en el Km 40 de la carretera que va de San Salvador a Sonsonate, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** Yacimiento del lugar

**Estructura:** Granular Fina

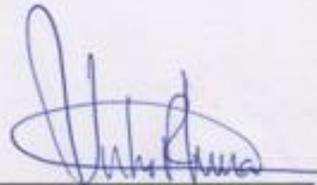
**Color:** Beige

**Composición mineralógica:** Cenizas y polvo volcánico silíceo.

**Composición química probable:** Silice, Aluminio, Hierro y Magnesio (principalmente).

**Nombre:** Material Piroclástico Fino

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Silice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
Ing. Julio Luna





**Caracterización Mineralógica y Petrográfica**

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 01/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 3

**Procedencia:** Finca las Lajas, entrada a Cerro Verde, Km 45, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** A 3 Km de la sede de la cooperativa Las Lajas.

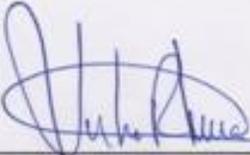
**Estructura:** Granular Compacta  
**Color:** Rojizo

**Composición mineralógica:** Minerales de Hierro y Magnesio.

**Composición química probable:** Sílice, Hierro y Magnesio.

**Nombre:** Escoria Volcánica Rojiza

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Sílice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Julio Luna





**Caracterización Mineralógica y Petrográfica**

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 01/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 4

**Procedencia:** Finca las Lajas, entrada a Cerro Verde, Km 45, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** A 3 Km de la sede de la cooperativa Las Lajas.

**Estructura:** Granular Compacta

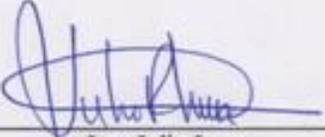
**Color:** Negro

**Composición mineralógica:** Piroxenos, anfíboles y vidrio volcánico.

**Composición química probable:** Silice, Hierro y Magnesio.

**Nombre:** Escoria Volcánica Negra

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Silice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
Ing. Julio Luna





**Caracterización Mineralógica y Petrográfica**

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 01/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 5

**Procedencia:** Finca las Lajas, entrada a Cerro Verde, Km 45, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** A 2 Km de la sede de Las Lajas hacia la Chacarita.

**Estructura:** Granular Fina

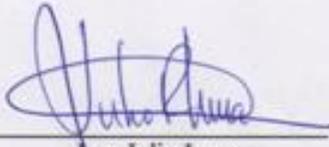
**Color:** Blanco

**Composición mineralógica:** Ceniza y polvo volcánico silíceo, con fragmentos de pómez.

**Composición química probable:** Aluminio y Silice (principalmente Silice).

**Nombre:** Material Piroclástico Silíceo

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Silice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
Ing. Julio Luna





Universidad de San Carlos de Guatemala  
Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas, CESEM  
Facultad de Ingeniería

### Caracterización Mineralógica y Petrográfica

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 01/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 6

**Procedencia:** Candelaria, departamento de Cuscatlán, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** Yacimiento a 100 metros de la casa de don Juan Pablo Alvarado.

**Estructura:** Granular

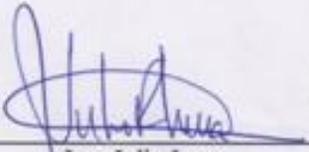
**Color:** Beige

**Composición mineralógica:** Ceniza volcánica.

**Composición química probable:** Sílice, y Aluminio.

**Nombre:** Ceniza Volcánica Beige

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Sílice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
Ing. Julio Luna



Página 6 de 13

(Copia) Archivo CESEM



**Caracterización Mineralógica y Petrográfica**

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 01/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 7

**Procedencia:** Lago de Illopango, cerca de Candelaria, en el departamento de Cuscatlán, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** Yacimiento en el desagüe del lago

**Estructura:** Granular

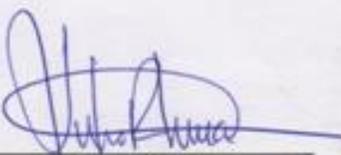
**Color:** Gris

**Composición mineralógica:** Fragmentos de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), vidrio volcánico, fragmentos basálticos y horblenda.

**Composición química probable:** Silicio, Aluminio y Hierro, no reacciona con HCl.

**Nombre:** Ceniza Volcánica Beige

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Silice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
Ing. Julio Luna





**Caracterización Mineralógica y Petrográfica**

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 02/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 8

**Procedencia:** Lago de Illopango, cerca de Candelaria, en el departamento de Cuscatlán, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** Yacimiento a orillas del lago

**Estructura:** Compacta a terrosa

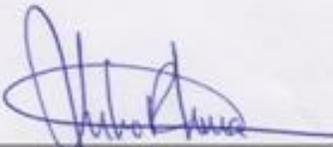
**Color:** Amarillo

**Composición mineralógica:** Ceniza y polvo volcánico, y fragmentos de pómez.

**Composición química probable:** Silicio y Aluminio en alto porcentaje, no reacciona con HCl.

**Nombre:** Toba

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Silice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
Ing. Julio Luna





**Caracterización Mineralógica y Petrográfica**

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 02/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 9

**Procedencia:** de Santa Clara a Calderitas y San Esteban, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** Yacimiento del cerro de La Molina.

**Estructura:** Granular terrosa

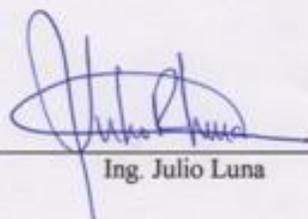
**Color:** Negro

**Composición mineralógica:** Roca basáltica conteniendo Piroxenos, Olivinos, Feldespatos y poco Cuarzo.

**Composición química probable:** Aluminio, Sílice, Hierro y Magnesio.

**Nombre:** Basalto Escoriáceo

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Sílice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
Ing. Julio Luna





**Caracterización Mineralógica y Petrográfica**

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 02/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 10

**Procedencia:** Camino a Santa Clara, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** A aproximadamente 3 Km de Apastepeque.

**Estructura:** Granular terrosa

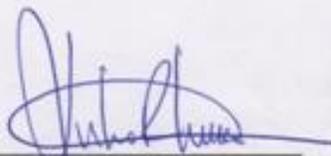
**Color:** Café Rojizo

**Composición mineralógica:** Roca Dacítica conteniendo Piroxenos, Anfíboles, Feldespatos y poco Cuarzo.

**Composición química probable:** Silicio, Aluminio y Óxido de Hierro.

**Nombre:** Escoria Volcánica

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Silice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
Ing. Julio Luna





**Caracterización Mineralógica y Petrográfica**

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 02/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 11

**Procedencia:** Río Quezalapa, a 5 Km de Cinqueras, entre los Municipios de Cinqueras y Suchitoto, 18 Km de Tejutepeque, Depto de Cuscatlán, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** Sedimentación a orillas del río.

**Estructura:** Granular

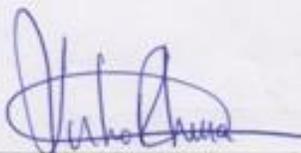
**Color:** Gris

**Composición mineralógica:** Fragmentos de pómez, cuarzo y vidrio volcánico, con fragmentos oscuros (basaltos).

**Composición química probable:** Silice, Aluminio y Hierro.

**Nombre:** Arena Volcánica Pomácea

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Silice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Julio Luna





**Caracterización Mineralógica y Petrográfica**

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 02/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 12

**Procedencia:** Municipio de Cinqueras, entre Suchitoto y Cinqueras, a 3 Km de Cinqueras, Depto. de Cuscatlán, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** Yacimiento en cantón San Nicolás.

**Estructura:** Compacta a Terrosa

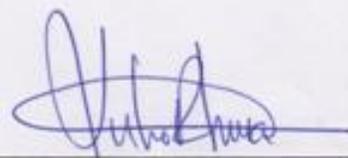
**Color:** Gris claro

**Composición mineralógica:** Fragmentos de pómez, ceniza y polvo volcánico.

**Composición química probable:** Sílice, y Aluminio.

**Nombre:** Material Piroclástico

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Sílice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
Ing. Julio Luna





**Caracterización Mineralógica y Petrográfica**

**Proyecto:** Propuesta de Metodología para la Clasificación Preliminar de Puzolanas Minerales  
**Interesado:** Omar Eduardo Godínez Jolón  
**Fecha de análisis:** 02/02/07  
**Analista:** Ing. Julio Luna

**Muestra:** Número 13

**Procedencia:** Caserío Carrasco, entre Tejutepeque y Cinqueras, a 4 Km de Tejutepeque, El Salvador.

**Localización del punto de muestreo:** Yacimiento en cercanías al barranco El Burro.

**Estructura:** Compacta a Terrosa

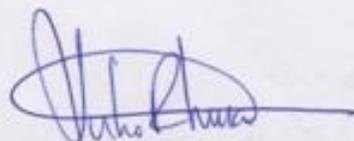
**Color:** Beige

**Composición mineralógica:** Ceniza y polvo volcánico con algunos fragmentos Líticos (andesitas).

**Composición química probable:** Sílice, y Aluminio (principalmente).

**Nombre:** Ceniza Volcánica

**Observaciones:** Realizar análisis químico para la determinación de Sílice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

  
Ing. Julio Luna



**ANEXOS 3**  
**CARACTERIZACIÓN Y/O ENSAYO QUÍMICO**

**LABORATORIO  
TÉCNICO**

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
REPUBLICA DE GUATEMALA

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP- 229-07

ORDEN No. L-095-07

Guatemala, 15-03-07

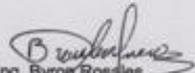
**MEM**

### RESULTADOS DE ANÁLISIS

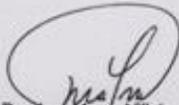
MUESTRA: Número 2  
PRESENTADA POR: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
PROCEDENCIA: Desconocida  
LOCALIZACION: 18 Av. 4-98 Zona 8 de Mixco  
FECHA DE MUESTREO: 02-02-07  
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 07-03-07  
FECHA DE ANALISIS: del 07 al 12-03-07  
PRECIO DE ANALISIS: \$ 44.80  
ANALISTA: Alfredo Gutiérrez

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	TÉCNICA	RESULTADOS ( 1 )	OXIDOS ( 2 )
Silicio % en peso	E.A.A.	28.54	61.1 SiO <sub>2</sub>
Aluminio % en peso	E.A.A.	8.0	15.1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Hierro % en peso	E.A.A.	2.73	3.91 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Magnesio % en peso	E.A.A.	0.6	1.0 MgO

Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.  
Los resultados se obtuvieron en forma elemental (1). Los óxidos (2), se calcularon por estequiometría.  
E.A.A.: Espectrometría de Absorción Atómica.  
Para concentraciones arriba del 5% elemental y dependiendo del elemento cuantificado, la técnica de absorción atómica puede presentar un margen de error.

  
Ing. Byron Rosales  
SECCIÓN DE MINERALES



  
Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro  
COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

PBX (502) 2 477-0382 y (502) 2 476-0680 Fax (502) 2 476-8506. Diagonal 17, 29-78 zona 11, Las Charcas. Guatemala, C. A. www.mem.gob.gt

**LABORATORIO  
TÉCNICO**

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
REPUBLICA DE GUATEMALA

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP- 230-07

ORDEN No. L-095-07

Guatemala, 15-03-07

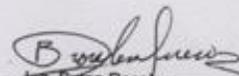
**MEM**

**RESULTADOS DE ANÁLISIS**

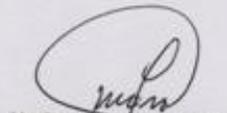
MUESTRA: Número 5  
PRESENTADA POR: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
PROCEDENCIA: Desconocida  
LOCALIZACION: 18 Av. 4-98 Zona 8 de Mixco  
FECHA DE MUESTREO: 02-02-07  
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 07-03-07  
FECHA DE ANALISIS: del 07 al 12-03-07  
PRECIO DE ANALISIS: \$ 44.80  
ANALISTA: Alfredo Gutiérrez

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	TECNICA	RESULTADOS ( 1 )	OXIDOS ( 2 )
Silicio % en peso	E.A.A.	28.58	61.14 SiO <sub>2</sub>
Aluminio % en peso	E.A.A.	7.65	14.48 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Hierro % en peso	E.A.A.	2.48	3.55 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Magnesio % en peso	E.A.A.	0.41	0.68 MgO

Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.  
Los resultados se obtuvieron en forma elemental (1). Los óxidos (2), se calcularon por estequiometría.  
E.A.A.: Espectrometría de Absorción Atómica.  
Para concentraciones arriba del 5% elemental y dependiendo del elemento cuantificado, la técnica de absorción atómica puede presentar un margen de error.

  
Ing. Byron Rosales  
SECCION DE MINERALES



  
Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro  
COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

PBX (502) 2 477-0382 y (502) 2 476-0680 Fax (502) 2 476-8506. Diagonal 17, 29-78 zona 11, Las Charcas. Guatemala, C. A. www.mem.gob.gt

**LABORATORIO  
TÉCNICO**

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
REPUBLICA DE GUATEMALA

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP- 231-07

ORDEN No. L-095-07

Guatemala, 15-03-07

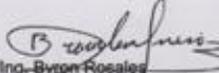
**MEM**

**RESULTADOS DE ANÁLISIS**

MUESTRA: Número 6  
PRESENTADA POR: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
PROCEDENCIA: Desconocida  
LOCALIZACION: 18 Av. 4-96 Zona 8 de Mixco  
FECHA DE MUESTREO: 02-02-07  
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 07-03-07  
FECHA DE ANALISIS: del 07 al 12-03-07  
PRECIO DE ANALISIS: \$ 44.80  
ANALISTA: Alfredo Gutiérrez

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	TECNICA	RESULTADOS ( 1 )	OXIDOS ( 2 )
Silicio % en peso	E.A.A.	29.08	62.2 SiO <sub>2</sub>
Aluminio % en peso	E.A.A.	7.98	15.07 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Hierro % en peso	E.A.A.	2.58	3.69 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Magnesio % en peso	E.A.A.	0.63	1.05 MgO

Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.  
Los resultados se obtuvieron en forma elemental (1). Los óxidos (2), se calcularon por estequiometría.  
E.A.A.: Espectrometría de Absorción Atómica.  
Para concentraciones arriba del 5% elemental y dependiendo del elemento cuantificado, la técnica de absorción atómica puede presentar un margen de error.

  
Ing. Byron Rosales  
SECCION DE MINERALES



  
Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro  
COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

PBX (502) 2 477-0382 y (502) 2 476-0680 Fax (502) 2 476-8506. Diagonal 17, 29-78 zona 11, Las Charcas. Guatemala, C. A. www.mem.gob.gt

**LABORATORIO  
TÉCNICO**

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
REPUBLICA DE GUATEMALA

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP- 232-07

**MEM**

ORDEN No. L-095-07

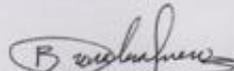
Guatemala, 15-03-07

**RESULTADOS DE ANÁLISIS**

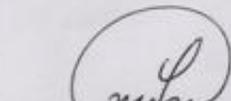
MUESTRA: Número 7  
PRESENTADA POR: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
PROCEDENCIA: Desconocida  
LOCALIZACION: 18 Av. 4-98 Zona 8 de Mixco  
FECHA DE MUESTREO: 02-02-07  
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 07-03-07  
FECHA DE ANALISIS: del 07 al 12-03-07  
PRECIO DE ANALISIS: \$ 44.80  
ANALISTA: Alfredo Gutiérrez

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	TÉCNICA	RESULTADOS ( 1 )	OXIDOS ( 2 )
Silicio % en peso	E.A.A.	27.75	59.37 SiO <sub>2</sub>
Aluminio % en peso	E.A.A.	9.24	17.46 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Hierro % en peso	E.A.A.	3.09	4.43 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Magnesio % en peso	E.A.A.	0.71	1.18 MgO

Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.  
Los resultados se obtuvieron en forma elemental (1). Los óxidos (2), se calcularon por estequiometría.  
E.A.A.: Espectrometría de Absorción Atómica.  
Para concentraciones arriba del 5% elemental y dependiendo del elemento cuantificado, la técnica de absorción atómica puede presentar un margen de error.

  
Ing. Byron Rosales  
SECCION DE MINERALES



  
Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro  
COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

PBX (502) 2 477-0382 y (502) 2 476-0680 Fax (502) 2 476-8506. Diagonal 17, 29-78 zona 11, Las Charcas. Guatemala, C. A. www.mem.gob.gt

**LABORATORIO  
TÉCNICO**

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
REPUBLICA DE GUATEMALA

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP- 233-07

ORDEN No. L-095-07

Guatemala, 15-03-07

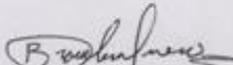
**MEM**

### RESULTADOS DE ANÁLISIS

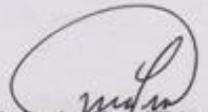
MUESTRA: Número 8  
PRESENTADA POR: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
PROCEDENCIA: Desconocida  
LOCALIZACION: 18 Av. 4-98 Zona 8 de Mixco  
FECHA DE MUESTREO: 02-02-07  
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 07-03-07  
FECHA DE ANALISIS: del 07 al 12-03-07  
PRECIO DE ANALISIS: \$ 44.80  
ANALISTA: Alfredo Gutiérrez

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	TECNICA	RESULTADOS ( 1 )	OXIDOS ( 2 )
Silicio % en peso	E.A.A.	31.75	67.92 SiO <sub>2</sub>
Aluminio % en peso	E.A.A.	7.54	14.25 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Hierro % en peso	E.A.A.	2.43	3.47 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Magnesio % en peso	E.A.A.	0.47	0.79 MgO

Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.  
Los resultados se obtuvieron en forma elemental (1). Los óxidos (2), se calcularon por estequiometría.  
E.A.A.: Espectrometría de Absorción Atómica.  
Para concentraciones arriba del 5% elemental y dependiendo del elemento cuantificado, la técnica de absorción atómica puede presentar un margen de error.

  
Ing. Byron Rosales  
SECCION DE MINERALES



  
Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro

COORDINADORA LABORATORIOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

PBX (502) 2 477-0382 y (502) 2 476-0680 Fax (502) 2 476-8506. Diagonal 17, 29-78 zona 11, Las Charcas. Guatemala, C. A. www.mem.gob.gt

**LABORATORIO  
TÉCNICO**

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
REPUBLICA DE GUATEMALA

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP- 234-07

ORDEN No. L-095-07

Guatemala, 15-03-07

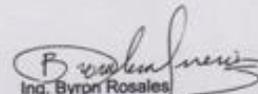
**MEM**

**RESULTADOS DE ANÁLISIS**

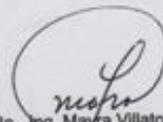
MUESTRA: Número 10  
 PRESENTADA POR: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
 PROCEDENCIA: Desconocida  
 LOCALIZACION: 18 Av. 4-98 Zona 8 de Mixco  
 FECHA DE MUESTREO: 02-02-07  
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 07-03-07  
 FECHA DE ANALISIS: del 07 al 12-03-07  
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 44.80  
 ANALISTA: Alfredo Gutiérrez

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	TECNICA	RESULTADOS ( 1 )	OXIDOS ( 2 )
Silicio % en peso	E.A.A.	23.04	49.3 SiO <sub>2</sub>
Aluminio % en peso	E.A.A.	9.04	17.09 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Hierro % en peso	E.A.A.	8.8	12.60 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Magnesio % en peso	E.A.A.	4.71	7.81 MgO

Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.  
 Los resultados se obtuvieron en forma elemental (1). Los óxidos (2), se calcularon por estequiometría.  
 E.A.A.: Espectrometría de Absorción Atómica.  
 Para concentraciones arriba del 5% elemental y dependiendo del elemento cuantificado, la técnica de absorción atómica puede presentar un margen de error.

  
 Ing. Byron Rosales  
 SECCION DE MINERALES



  
 Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro  
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

PBX (502) 2 477-0382 y (502) 2 476-0680 Fax (502) 2 476-8506. Diagonal 17, 29-78 zona 11, Las Charcas. Guatemala, C. A. www.mem.gob.gt

**LABORATORIO  
TÉCNICO**

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
REPUBLICA DE GUATEMALA

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP- 235-07

**MEM**

ORDEN No. L-095-07

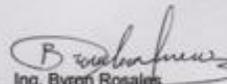
Guatemala, 15-03-07

**RESULTADOS DE ANÁLISIS**

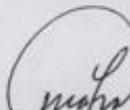
MUESTRA: Número 11  
PRESENTADA POR: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
PROCEDENCIA: Desconocida  
LOCALIZACION: 18 Av. 4-98 Zona 8 de Mixco  
FECHA DE MUESTREO: 02-02-07  
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 07-03-07  
FECHA DE ANALISIS: del 07 al 12-03-07  
PRECIO DE ANALISIS: \$ 44.80  
ANALISTA: Alfredo Gutiérrez

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	TECNICA	RESULTADOS ( 1 )	OXIDOS ( 2 )
Silicio % en peso	E.A.A.	31.25	66.86 SiO <sub>2</sub>
Aluminio % en peso	E.A.A.	8.02	15.16 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Hierro % en peso	E.A.A.	2.02	2.88 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Magnesio % en peso	E.A.A.	0.58	0.97 MgO

Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.  
Los resultados se obtuvieron en forma elemental (1). Los óxidos (2), se calcularon por estequiometría.  
E.A.A.: Espectrometría de Absorción Atómica.  
Para concentraciones arriba del 5% elemental y dependiendo del elemento cuantificado, la técnica de absorción atómica puede presentar un margen de error.

  
Ing. Byron Rosales  
SECCION DE MINERALES



  
Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro  
COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

PBX (502) 2 477-0382 y (502) 2 476-0680 Fax (502) 2 476-8506. Diagonal 17, 29-78 zona 11, Las Charcas. Guatemala, C. A. www.mem.gob.gt

**LABORATORIO  
TÉCNICO**

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
REPUBLICA DE GUATEMALA

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP- 236-07

ORDEN No. L-095-07

Guatemala, 15-03-07

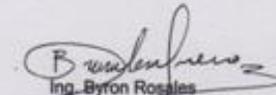
**MEM**

**RESULTADOS DE ANÁLISIS**

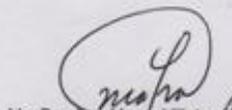
MUESTRA: Número 12  
PRESENTADA POR: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
PROCEDENCIA: Desconocida  
LOCALIZACION: 18 Av. 4-98 Zona 8 de Mixco  
FECHA DE MUESTREO: 02-02-07  
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 07-03-07  
FECHA DE ANALISIS: del 07 al 12-03-07  
PRECIO DE ANALISIS: \$ 44.80  
ANALISTA: Alfredo Gutiérrez

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	TECNICA	RESULTADOS ( 1 )	OXIDOS ( 2 )
Silicio % en peso	E.A.A.	31.34	67.05 SiO <sub>2</sub>
Aluminio % en peso	E.A.A.	6.92	13.07 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Hierro % en peso	E.A.A.	0.97	1.39 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Magnesio % en peso	E.A.A.	0.45	0.75 MgO

Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.  
Los resultados se obtuvieron en forma elemental (1). Los óxidos (2), se calcularon por estequiometría.  
E.A.A.: Espectrometría de Absorción Atómica.  
Para concentraciones arriba del 5% elemental y dependiendo del elemento cuantificado, la técnica de absorción atómica puede presentar un margen de error.

  
Ing. Byron Rosales  
SECCIÓN DE MINERALES



  
Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro  
COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

PBX (502) 2 477-0382 y (502) 2 476-0680 Fax (502) 2 476-8506. Diagonal 17, 29-78 zona 11, Las Charcas. Guatemala, C. A. www.mem.gob.gt

**LABORATORIO  
TÉCNICO**

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
REPUBLICA DE GUATEMALA

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP- 237-07

ORDEN No. L-095-07

Guatemala, 15-03-07

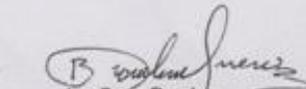
**MEM**

**RESULTADOS DE ANÁLISIS**

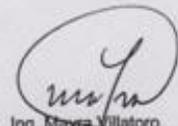
MUESTRA: Número 13  
PRESENTADA POR: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Ing. Francisco Javier Quiñónez  
PROCEDENCIA: Desconocida  
LOCALIZACION: 18 Av. 4-98 Zona 8 de Mixco  
FECHA DE MUESTREO: 02-02-07  
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 07-03-07  
FECHA DE ANALISIS: del 07 al 12-03-07  
PRECIO DE ANALISIS: \$ 44.80  
ANALISTA: Alfredo Gutiérrez

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	TECNICA	RESULTADOS ( 1 )	OXIDOS ( 2 )
Silicio % en peso	E.A.A.	29.21	62.49 SiO <sub>2</sub>
Aluminio % en peso	E.A.A.	7.92	14.97 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Hierro % en peso	E.A.A.	2.28	3.26 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Magnesio % en peso	E.A.A.	0.27	0.45 MgO

Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.  
Los resultados se obtuvieron en forma elemental (1). Los óxidos (2), se calcularon por estequiometría.  
E.A.A.: Espectrometría de Absorción Atómica.  
Para concentraciones arriba del 5% elemental y dependiendo del elemento cuantificado, la técnica de absorción atómica puede presentar un margen de error.

  
Ing. Byron Rosales  
SECCION DE MINERALES



  
Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro  
COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

PBX (502) 2 477-0382 y (502) 2 476-0680 Fax (502) 2 476-8506. Diagonal 17, 29-78 zona 11, Las Charcas. Guatemala, C. A. www.mem.gob.gt

**ANEXO 4**  
**GRAFICAS DE ENSAYO A COMPRESIÓN**

Figura 3 Cargas axiales de cubos

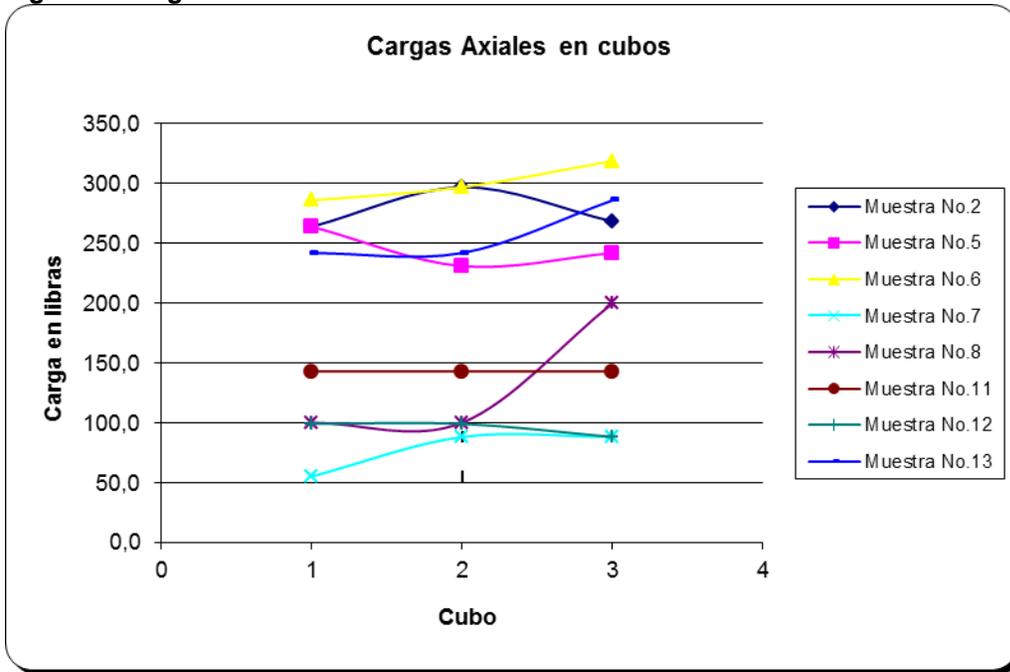
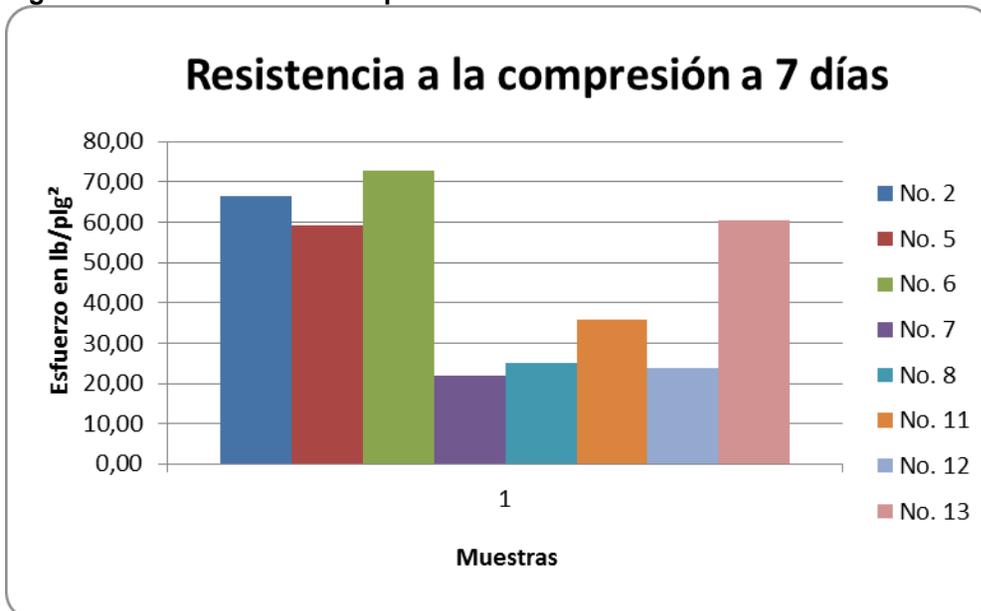
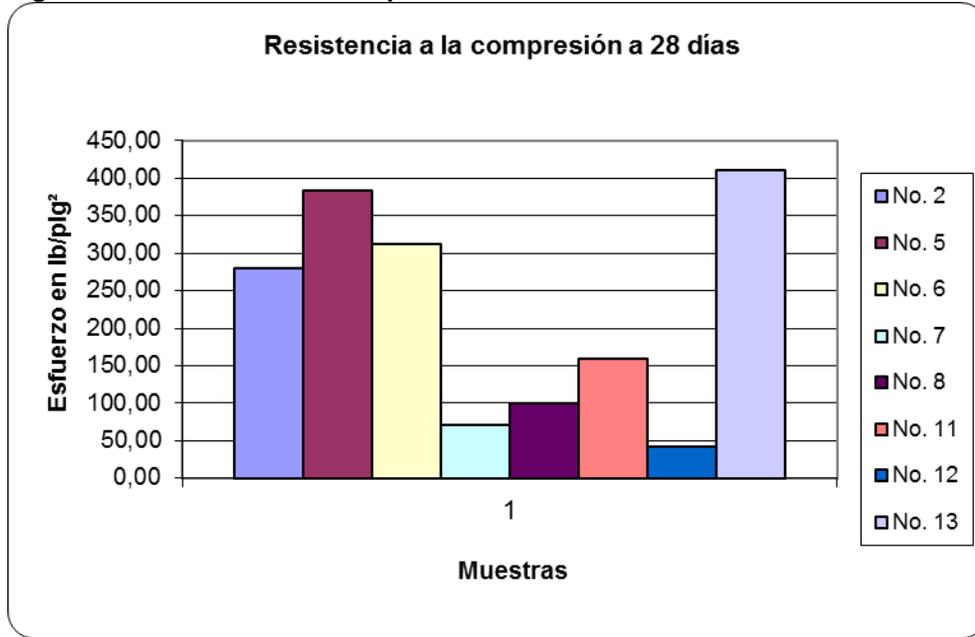


Figura 4 Resistencia a la compresión a 7 días



**Figura 5 Resistencia a la compresión a 28 días**



**Figura 6 Resistencia a la compresión a 7 y 28 días**

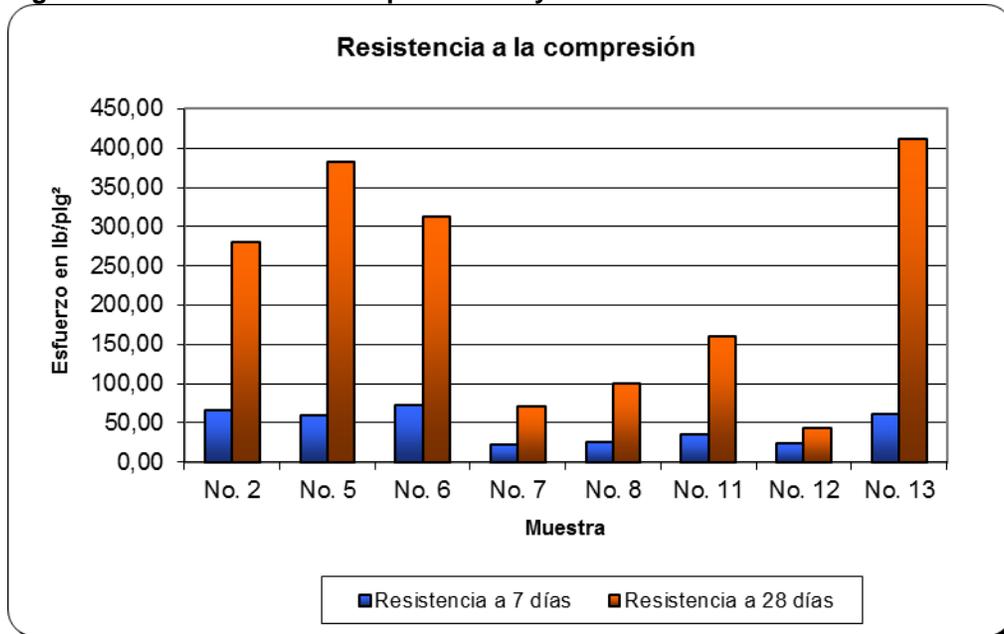


Figura 7 Esfuerzo vs. edad

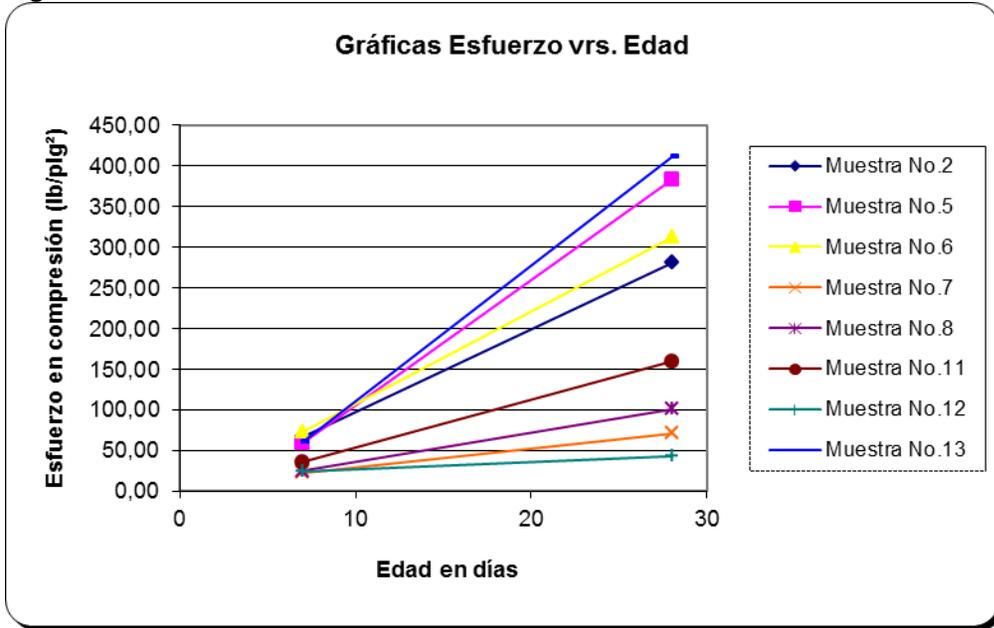
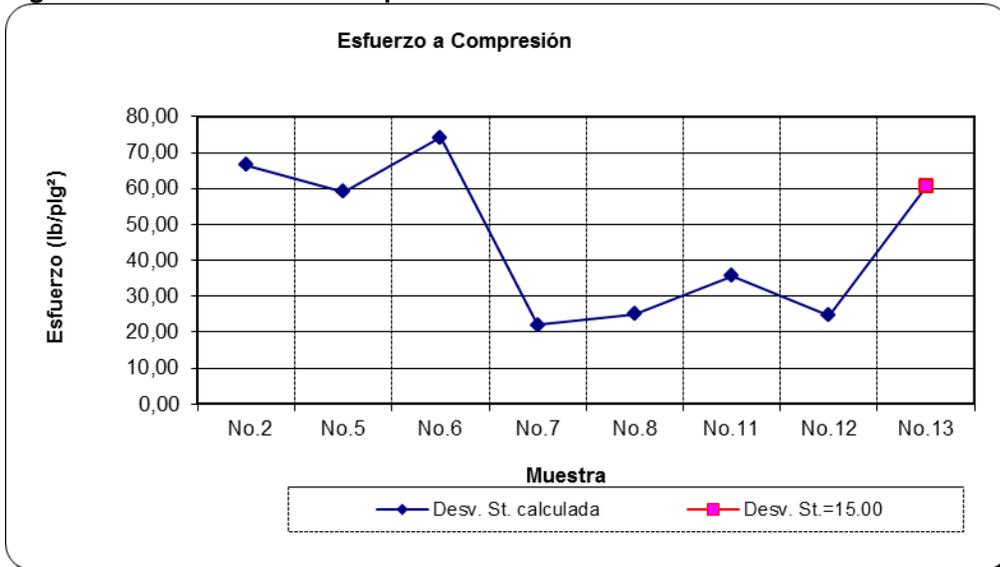
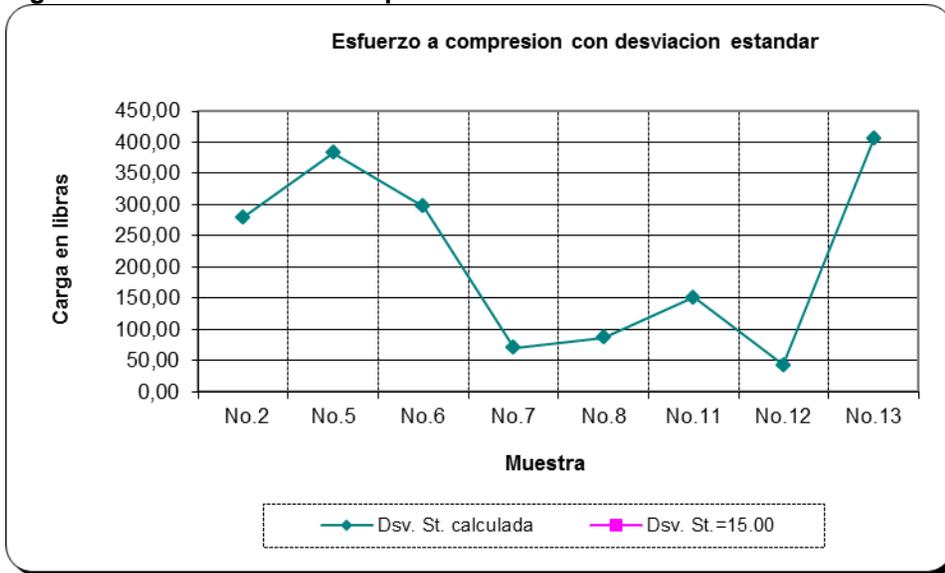


Figura 8 Resistencia a la compresión a 7 días con desviación estándar



**Figura 9 Resistencia a la compresión a 28 días con desviación estándar**



**ANEXO 5  
FOTOGRAFÍAS**

**Figura 10 Apisonamiento y secado al sol de material**



**Fuente: CII-USAC, febrero- marzo 2007.**

**Figura 11 Equipo en ensayo mineralógico**



**Figura: CESEM-USAC, febrero 2007**

**Figura 12 Molino de bolas**



**Fuente: CII-USAC, febrero- marzo 2007.**

**Figura 13 Bolas de arcilla**



**Fuente: CII-USAC, febrero- marzo 2007.**

**Figura 14 Vista interior de molino de bolas**



**Fuente: CII-USAC, febrero- marzo 2007.**

**Figura 15 Tamizado de material despues de molienda**



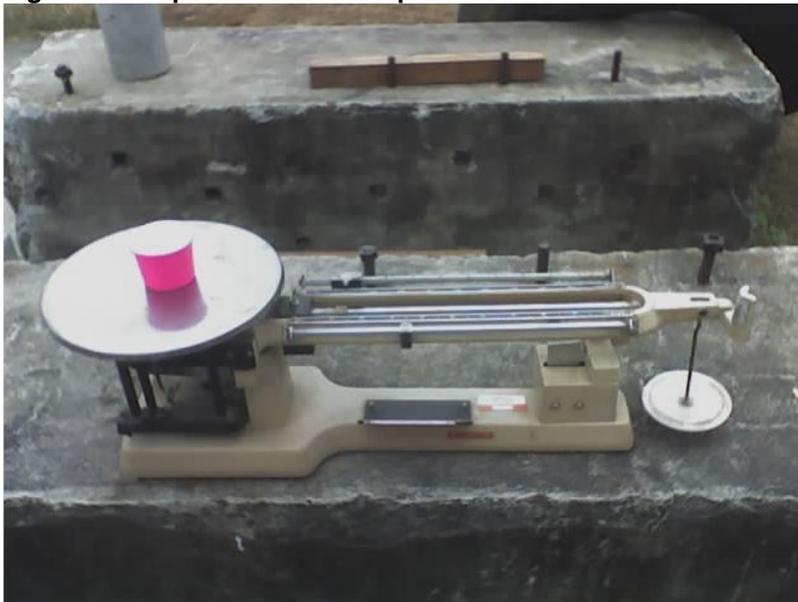
**Fuente: CII-USAC, febrero- marzo 2007.**

**Figura 16 Horno para el secado de muestras**



**Fuente: CII, división de suelos-USAC, febrero 2007.**

**Figura 17 Proporción de cal en peso**



**Fuente: CII-USAC, febrero- marzo 2007.**

**Figura 18 Mezcla de 34% de cal y 66% de material**



Fuente: CII-USAC, febrero- marzo 2007.

**Figura 19 Proporción en peso de puzolana**



Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.

**Figura 20 Proporción en peso de arena**



Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.

**Figura 21 Cantidad de adición de agua destilada**



Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.

**Figura 22 Máquina mezcladora**



**Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.**

**Figura 23 Equipo de ensayo de flow**



**Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.**

**Figura 24 Lectura de flow**



**Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.**

**Figura 25 Fraguado inicial en moldes**



**Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.**

**Figura 26 Desencofrado de cubos**



Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.

**Figura 27 Fraguado de cubos en saturación con cal**



Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.

**Figura 28 Cubos a ensayar a compresión**



**Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.**

**Figura 29 Lectura de temperatura ambiente en fraguado**



**Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.**

**Figura 30 Máquina universal para ensayo a compresión**



**Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.**

**Figura 31 Cubo en ensayo a compresión**



**Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.**

**Figura 32 Falla de reloj de arena**



**Fuente: CII, división de morteros-USAC, marzo- mayo 2007.**