



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

**CENIZA VOLANTE DE CARBÓN MINERAL PARA ADICIÓN EN MEZCLAS  
DE CONCRETO**

**Eder Ivan Cano Salazar**

Asesorado por la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Guatemala, agosto de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CENIZA VOLANTE DE CARBÓN MINERAL PARA ADICIÓN EN MEZCLAS  
DE CONCRETO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**EDER IVAN CANO SALAZAR**

ASESORADO POR LA INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**


DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
EXAMINADOR	Ing. Wuilliam Ricardo Yon Chavarría
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **CENIZA VOLANTE DE CARBÓN MINERAL PARA ADICIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 5 de mayo de 2015.

  
**Eder Ivan Cano Salazar**



Guatemala, 10 de julio de 2017

Ingeniero  
José Gabriel Ordoñez Morales  
Área de Materiales y Construcciones Civiles  
COORDINADOR

Ingeniero Ordoñez

Me dirijo a usted para informarle, que he revisado el trabajo de graduación: **CENIZA VOLANTE DE CARBÓN MINERAL PARA ADICIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO**, elaborado con el estudiante universitario Eder Ivan Cano Salazar, quien contó con la asesoría de la suscrita.

Considerando que el trabajo desarrollado por el estudiante universitario Cano Salazar, satisface los requisitos exigidos en el reglamento de graduación, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,

*"Id y enseñad a todos"*

  
Inga. Civil Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Col. 5947  
ASESORA

  
Dilma Y. Mejicanos Jol  
Ingeniera Civil  
Col. 5947



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



Guatemala,  
02 de agosto de 2017

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

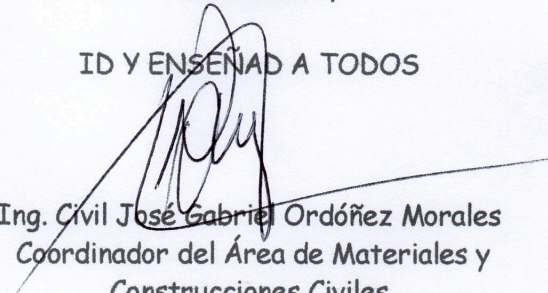
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CENIZA VOLANTE DE CARBÓN MINERAL PARA ADICIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Eder Ivan Cano Salazar quien contó con la asesoría de la Ing. Dilma Yanet Mejicanos Jol.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑANZA A TODOS

  
Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales  
Coordinador del Área de Materiales y  
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA  
AREA DE MATERIALES Y  
CONSTRUCCIONES CIVILES  
**USAC**

/mrrm.

---

*Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua*





**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Eder Ivan Cano Salazar CENIZA VOLANTE DE CARBÓN MINERAL PARA ADICIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, agosto 2017

/mrm.

*Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua*





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **CENIZA VOLANTE DE CARBÓN MINERAL PARA ADICIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO**, presentado por el estudiante universitario: **Eder Iván Cano Salazar**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, agosto de 2017

/cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por darme la vida, por no soltar mi mano durante los días oscuros, por sostener mi espíritu y darme la fuerza y fe necesaria para no darme por vencido.
- Mis padres** Antonio Cano y María Estela Salazar, por creer en mí, por brindarme todo el amor, consejos y apoyo para culminar esta etapa y ser una persona de bien, por la fe y la paciencia en todo este proceso, este triunfo es solo de ustedes.
- Mis hermanas** Vivian María y Claudia Mariela Cano Salazar, por su cariño, respaldo y compañía todos estos años.
- Mis tíos, primos y demás familia** Por siempre estar al pendiente de mí, por sus palabras de apoyo y perseverancia.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Inga. Dilma Yanet  
Mejicanos Jol**

Por su amistad, apoyo, consejos, por creer en mí siempre y guiarme en mi carrera y en esta investigación.

**Ing. Hugo Humberto  
Rivera Pérez**

Por su confianza, su valioso apoyo y consejos durante mis estudios.

**Sección de Agregados,  
Concretos y Morteros**

Ing. Mariano Álvarez, Ing. César Vásquez, Elder Ramos, Julio Álvarez, Luis Lucero, Melany Barillas, Miguel Muñoz, por su valiosa ayuda y apoyo en la realización de este trabajo.

**Centro de  
Investigaciones de  
Ingeniería**

Por haberme permitido realizar los ensayos para mi trabajo de graduación.

**Facultad de Ingeniería**

Por darme las herramientas y conocimiento para desempeñarme en mi vida profesional.

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios, darme sentido de pertenencia, conciencia y responsabilidad social con mi patria.

**Mis amigos**

Por el cariño y apoyo incondicional, por ser compañeros de mil batallas, por las victorias y derrotas, especialmente a Marlon Chajón, Roberto Nimatuj, Melisa León, José Orozco, Julio Álvarez, Paul Monzón, Edvin Barrios y Luis Santizo.

**Generadora de la Costa Sur ESI**

Por facilitarme el acceso a sus instalaciones y brindarme la materia prima para elaborar esta investigación. Especialmente al arquitecto Juan Alberto Menéndez por su valiosa colaboración.

**Centro de Investigación y Desarrollo/CETEC**

Por abrirme sus puertas y poder realizar análisis de laboratorio en sus instalaciones para la elaboración de esta investigación. Especialmente al ingeniero Mario de León.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS .....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Puzolanas.....	1
1.1.1. Origen y definición de puzolana .....	1
1.1.1.1. Clasificación de las puzolanas .....	1
1.1.2. Puzolanas naturales .....	2
1.1.2.1. Puzolanas artificiales.....	2
1.1.2.2. Propiedades de las puzolanas .....	4
1.2. Uso de las puzolanas en la elaboración de cemento .....	5
1.2.1. Adición de puzolana al concreto .....	6
1.2.2. Ventajas del uso de las puzolanas en el concreto.....	7
1.2.3. Ceniza de carbón mineral como puzolana artificial.....	8
1.2.4. Producción de energía a base de carbón mineral en Guatemala .....	9
1.3. Cantidad de ceniza producida a nivel de planta.....	13
1.3.1. Capacidad de producción de energía de la planta eléctrica .....	13

1.3.2.	Proceso de generación de energía y producción de ceniza volante.....	14
1.3.3.	Cantidad de ceniza generada en la combustión .....	18
2.	ANTECEDENTES DEL USO DE CENIZA DE CARBÓN MINERAL COMO ADICIÓN EN EL CEMENTO Y EL CONCRETO .....	21
2.1.	Definición .....	21
2.2.	Cementos con adiciones .....	22
2.3.	Adición mineral del cemento .....	23
2.3.1.	Normas y requisitos .....	24
2.3.2.	Normas de los métodos de ensayo .....	25
2.4.	Adición mineral al concreto .....	26
2.4.1.	Normas y requisitos .....	29
2.4.2.	Normas de los métodos de ensayo .....	31
2.5.	Trabajabilidad.....	32
2.5.1.	Resistencia.....	33
2.5.2.	Durabilidad .....	34
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	37
3.1.	Obtención y muestreo de la ceniza de carbón mineral .....	37
3.2.	Requisitos de la ceniza volante para adición en concreto según Norma ASTM C 618-08a .....	38
3.3.	Homogenización de la ceniza.....	39
3.4.	Materiales utilizados para la elaboración de concreto con adición.....	40
3.4.1.	Agregados .....	40
3.4.1.1.	Agregado fino .....	42
3.4.1.2.	Agregado grueso .....	45
3.4.2.	Cemento.....	48

3.4.3.	Adición de ceniza volante .....	50
3.4.4.	Agua para mezcla .....	50
3.5.	Diseño teórico de mezcla de concreto .....	51
3.6.	Ensayos de control de calidad del concreto .....	53
3.6.1.	Ensayos a concreto fresco .....	54
3.6.1.1.	Medición de la temperatura del concreto recién mezclado NTG 41053 (ASTM C-1064) .....	54
3.6.1.2.	Determinación del revenimiento NTG 41052 (ASTM C-143) .....	56
3.6.1.3.	Peso unitario del concreto NTG 41017 h5 (ASTM C-138) .....	58
3.6.1.4.	Determinación del contenido de aire NTG 41017 h7 (ASTM C-231) .....	60
3.6.1.5.	Determinación de tiempo de fraguado NTG 41017 h12 (ASTM C-403) .....	61
3.6.1.6.	Elaboración de cilindros de concreto fresco en obra NTG 41061 (ASTM C-31) .....	64
3.6.2.	Ensayos al concreto endurecido .....	66
3.6.2.1.	Resistencia a la compresión de cilindros de concreto NTG 41017 h1 (ASTM C-39) .....	67
3.6.2.2.	Determinación de carbonatación en concreto endurecido .....	69
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	71
4.1.	Materiales .....	71

4.2.	Ceniza volante (Norma ASTM C 311, C 618-08a).....	71
4.3.	Ensayos al concreto fresco .....	72
4.3.1.	Tiempo de fraguado .....	76
4.4.	Ensayos al concreto endurecido .....	77
4.4.1.	Resistencia a la compresión.....	78
4.4.1.1.	Influencia de la ceniza volante en la resistencia del concreto .....	84
4.4.1.1.1.	Reacciones químicas....	84
4.4.1.1.2.	Reacciones físicas.....	86
4.4.2.	Carbonatación .....	87
CONCLUSIONES .....		89
RECOMENDACIONES .....		93
BIBLIOGRAFÍA.....		95
ANEXOS .....		101

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Materiales cementantes suplementarios .....	3
2.	Ceniza volante de carbón mineral .....	9
3.	Estadística de producción de energía eléctrica por distintas tecnologías o combustibles para el SNI (enero-diciembre 2014).....	10
4.	Esquema general de funcionamiento de planta de generación de energía eléctrica a base de carbón mineral.....	11
5.	Planta Generadora de la Costa Sur.....	14
6.	Carbón mineral transportado y almacenado en planta. ....	15
7.	Presentación del carbón mineral antes de ser procesado .....	15
8.	Transporte del carbón por medio de bandas .....	16
9.	Ventana de inspección de quemadores .....	17
10.	Precipitador electrostático .....	18
11.	Área de colocación de ceniza en parte posterior de la planta.....	20
12.	<i>Clinker</i> antes de ser pulverizado .....	22
13.	Micrografía de partículas de ceniza volante con aumento de 1000X....	28
14.	Depósitos blancos de etrignita secundaria en un vacío, ancho del campo 64 $\mu\text{m}$ .....	35
15.	Efecto de carbonatación en el concreto armado.....	36
16.	Muestreo de ceniza de tolvas de almacenamiento .....	37
17.	Proceso de homogenización de ceniza y cemento.....	39
18.	Tamaño de partículas en agregados para uso en concreto .....	41
19.	Granulometría del agregado fino .....	44
20.	Granulometría del agregado grueso.....	47



21.	Ensayo de medición de temperatura .....	55
22.	Determinación del revenimiento.....	57
23.	Determinación del peso unitario.....	59
24.	Determinación del contenido de aire en el concreto .....	61
25.	Toma de lectura de resistencia a la penetración .....	63
26.	Especímenes de ensayo.....	63
27.	Elaboración de especímenes cilíndricos de concreto.....	65
28.	Especímenes de concreto fresco.....	66
29.	Pila de curado de cilindros de concreto .....	67
30.	Ensayo a compresión de cilindros de concreto .....	68
31.	Determinación de carbonatación .....	70
32.	Ensayo a compresión de cilindro de concreto.....	81
33.	Resistencia a compresión de mezclas con sustitución de cemento por ceniza.....	82
34.	Resistencia a compresión de mezclas con adición de ceniza .....	83
35.	Prueba de color de fenolftaleína .....	87

## TABLAS

I.	Registro de consumo de carbón y ceniza producida del 1 de julio al 18 de julio de 2016 .....	19
II.	Principales ingredientes del <i>Clinker</i> .....	23
III.	Requisitos químicos del cemento adicionado .....	24
IV.	Requisitos físicos de la puzolana.....	25
V.	Clasificación de puzolanas .....	27
VI.	Requisitos químicos.....	29
VII.	Requisitos físicos.....	30
VIII.	Comparación de resultados de análisis químico y valores requeridos en la norma ASTM C 618-08a.....	39

IX.	Características físicas del agregado fino .....	42
X.	Características físicas del agregado grueso .....	45
XI.	Porcentaje que pasa en los tamices para agregado grueso .....	47
XII.	Composición química del cemento .....	48
XIII.	Análisis químico de la ceniza volante .....	71
XIV.	Ensayos al concreto fresco .....	72
XV.	Variación de revenimiento por mezcla.....	73
XVI.	Relación de la resistencia a la compresión y cantidad de agua.....	74
XVII.	Determinación de tiempo de fraguado.....	76
XVIII.	Resistencia a la compresión.....	79



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>ACH</b>	Aluminato cálcico hidratado
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Aluminato tricálcico
<b>C</b>	Carbono
<b>cm</b>	Centímetro
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Dióxido de silicio
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>Al</b>	Elemento aluminio
<b>Fe</b>	Elemento hierro
<b>Ca</b>	Elemento calcio
<b>O</b>	Elemento oxígeno
<b>Si</b>	Elemento silicio
<b>S</b>	Elemento azufre
<b>°C</b>	Grado Celsius
<b>° F</b>	Grado Fahrenheit
<b>g</b>	Gramo
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Hidróxido de calcio
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kg/m<sup>3</sup></b>	Kilogramo por metro cúbico
<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	Kilogramo por centímetro cuadrado
<b>PSI</b>	Libra por pulgada cuadrada
<b>±</b>	Más/menos
<b>MW</b>	Mega vatios

<b>mm</b>	Milímetros
<b>#</b>	Número
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de hierro
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de aluminio
<b>pulg</b>	Pulgada
<b>pulg<sup>2</sup></b>	Pulgada cuadrada
<b>%</b>	Porcentaje
<b>a/c</b>	Relación agua cemento
<b>SCH</b>	Silicato cálcico hidratado
<b>C<sub>2</sub>S</b>	Silicato dicálcico
<b>C<sub>3</sub>S</b>	Silicato tricálcico
<b>SO<sub>3</sub></b>	Trióxido de azufre
<b>TM</b>	Tonelada métrica

## GLOSARIO

<b>Aditivo</b>	Sustancias o productos que, incorporados al concreto antes del amasado o durante el mismo en proporciones calculadas, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento.
<b>Adición</b>	Materiales inorgánicos, o con hidraulicidad latente que, finamente divididos, pueden ser añadidos al concreto con el fin de mejorar alguna de sus propiedades o conferirle características especiales.
<b>Agregado</b>	Material inorgánico natural o artificial cuyas dimensiones están comprendidas entre los límites fijados según norma. Está clasificado como fino o grueso, embebido en la pasta ocupa aproximadamente el 75 % del volumen del concreto.
<b>Alcalinos</b>	Elementos o compuestos químicos capaces de neutralizar los ácidos y sus efectos.
<b>Alita</b>	Es un silicato cálcico hidratado existente en el <i>clinker</i> de los cementos Portland.

<b>Aluminato</b>	Compuesto químico formado por aluminio en combinación con algunas bases.
<b>Antracítico</b>	Carbón mineral fósil y metamórfico con alto contenido de carbono.
<b>Ash</b>	Ceniza.
<b>ASTM</b>	Siglas en inglés de la Sociedad Americana para el Ensayo e Inspección de los Materiales (American Society for Testing and Materials).
<b>Bastidor</b>	Estructura o armazón que tiene como finalidad sostener y fijar elementos en alguna superficie.
<b>Belita</b>	Es un silicato cálcico hidratado, ingrediente típico en el <i>clinker</i> de los cementos Portland.
<b>Bicálcico</b>	Compuesto formado por dos moléculas de calcio.
<b>Bituminoso</b>	Sustancia de color negro, sólida o viscosa, comprendida entre aquellas sustancias cuyo origen son los crudos petrolíferos o sustancias de origen carbonoso.
<b>Botom</b>	Fondo.
<b>Bulk</b>	En bruto o a granel.

<b>Carbonatación</b>	Reacción entre el dióxido de carbono y un hidróxido u óxido para formar carbonato.
<b>Cementante</b>	Material con capacidad de endurecerse por medio de reacciones químicas para desarrollar resistencia mecánica a través del tiempo.
<b><i>Clinker</i></b>	Material formado tras calcinar arcilla y roca caliza, principal componente del cemento Portland.
<b>Cloruro</b>	Compuesto de cloro y otro elemento químico diferente del oxígeno. Se obtiene por acción del cloro o del ácido clorhídrico con un metal o su hidróxido.
<b><i>Coal</i></b>	Carbón.
<b>Coguanor</b>	Comisión Guatemalteca de Normas.
<b>Cohesión</b>	Atracción mutua a través de la cual los elementos de una sustancia se mantienen unidos.
<b>Curado</b>	Proceso a través del cual se mantiene el concreto y mortero en la condición húmeda y a una temperatura favorable, a fin de que se desarrollen las propiedades deseadas del material. Garantiza la hidratación y el endurecimiento satisfactorio de los materiales cementantes.



<b>Diatomitas</b>	Roca silíceas sedimentaria de origen biológico compuesta de fósiles de algas unicelulares acuáticas.
<b>Dióxido</b>	Combinación química de un radical simple o compuesto con dos átomos de oxígeno.
<b>Dosificación</b>	Proceso de medición, por peso o volumen, de los materiales que constituyen una cantidad de concreto y/o mortero.
<b>Esquisto</b>	Roca metamórfica de estructura laminar compuesta por carbono e hidrógeno, que resulta de la transformación de la arcilla sometida a grandes presiones.
<b>Etrignita</b>	Compuesto presente durante la hidratación del cemento, responsable del fraguado rápido del mismo.
<b>Fraguado</b>	Grado en el cual el concreto fresco perdió su plasticidad y se endurece.
<b>Hidratación</b>	Es la reacción entre el cemento hidráulico y el agua, a través de la cual se forman nuevos compuestos que confieren resistencia al concreto.
<b>Hidróxidos</b>	Son compuestos iónicos formados por un metal (catión) y un elemento del grupo hidróxido (anión).

Se trata de compuestos ternarios, aunque tanto su formulación como su nomenclatura son idénticas a las de los compuestos binarios.

**Hulla**

Carbón mineral de color negro y brillo mate o graso, que procede de sedimentos enterrados de grandes masas vegetales. Se emplea como combustible y para la obtención de gas.

**Insoluble**

Materia que no puede ser disuelta o diluida.

**Mortero**

Mezcla de materiales cementantes, agregado fino y agua, que puede contener aditivos, normalmente se usa para unir unidades de mampostería.

**Pasta**

Constituyente del concreto y mortero, consiste en cemento y agua.

**pH**

Símbolo químico que representa el logaritmo del recíproco de la concentración de iones de hidrógeno en átomos gramo por litro, usado para expresar la acidez y la alcalinidad (base) de la solución en una escala de 0 a 14, donde menos que 7 representa acidez y más que 7 alcalinidad.

**Portlandita**

Hidróxido de calcio, principal producto cristalino resultante de la hidratación del cemento.

<b>Puzolanas</b>	Materiales silíceos y aluminosos, tales como la ceniza volante o el humo de sílice, que por sí mismos poseen poco o ningún valor cementante, pero finamente molidos y en presencia de agua reaccionan con el hidróxido de calcio para formar compuestos con propiedades cementantes.
<b>Segregación</b>	Separación de los componentes del concreto fresco (agregados y mortero), resultando en una mezcla sin control de manipulación
<b>Silicato</b>	Sal formada por combinación del ácido silícico y una base que se puede obtener por fusión conjunta de la sílice con un carbonato de metal alcalino.
<b>Steam</b>	Vapor.
<b>Sulfato</b>	Sal formada por combinación del ácido sulfúrico y una base. Se obtiene al hacer reaccionar el ácido sulfúrico con los metales, sus hidróxidos y carbonatos, o al oxidar un sulfuro.
<b>Toba</b>	Tipo de roca ígnea volcánica, ligera, de consistencia porosa, formada por la acumulación de cenizas u otros elementos volcánicos muy pequeños.
<b>Tobermorita</b>	Sustancia producida en la hidratación del cemento, en forma de gel, capaz de aglutinar componentes entre sí.

<b>Trabajabilidad</b>	Es la propiedad del concreto y mortero fresco que determina sus características de trabajo, es decir, la facilidad para su mezclado, colocación, moldeo y acabado.
<b>Tolva</b>	Dispositivo similar a un embudo de gran tamaño destinado al depósito y canalización de materiales granulares o pulverizados, entre otros.
<b>Tricálcico</b>	Compuesto químico con tres moléculas de calcio.



## RESUMEN

El trabajo de investigación que se presenta a continuación muestra el análisis del uso de la ceniza volante de carbón mineral como adición para mezclas de concreto fresco, con el fin de determinar si la presencia de ceniza volante en el concreto puede mejorar las propiedades del mismo, tales como: la trabajabilidad en estado fresco, aumentar la resistencia del concreto endurecido, mejorar su resistencia al ataque químico de agentes externos, determinar la velocidad de endurecimiento y carbonatación.

Para llevar a cabo la investigación se realizaron mezclas de prueba, haciendo una variación en las cantidades de ceniza volante adicionada en porcentajes respecto al peso del cemento. Estos porcentajes van desde 5 % hasta 30 % de contenido de ceniza volante, tanto en adición de la misma como en sustitución de cemento Portland. Para cada mezcla se realizaron ensayos de control de calidad al concreto fresco, resistencia a la compresión y carbonatación, además se realizaron dos ensayos aleatorios de velocidad de endurecimiento para las mezclas que mostraron una mejora notable en la resistencia a compresión. Estas mezclas de prueba se comparan con una mezcla de control, la cual no contiene ceniza.

Estos ensayos se realizaron en el laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería. También se realizó un ensayo de fluorescencia por rayos X en el laboratorio químico del Centro de Investigación y Desarrollo/CETEC, para determinar la composición química de la ceniza. Todos los ensayos se realizaron bajo las especificaciones de las normas vigentes COGUANOR y ASTM.

Los resultados obtenidos muestran que el uso de la ceniza volante en mezclas de concreto, en proporciones controladas, aumenta considerablemente la resistencia del concreto endurecido a edades tempranas, este comportamiento es más evidente en las mezclas en donde se adicionó ceniza, sin embargo, en las mezclas en donde se sustituyó ceniza por cemento, aunque a menor escala, se pudo notar un aumento significativo de la resistencia mecánica a edades tempranas. El uso controlado de la ceniza brinda una mayor trabajabilidad en el concreto fresco, sin aumentar la cantidad de agua. Se debe considerar un aumento en el tiempo de fraguado leve en las mezclas con ceniza, lo que favorece en la colocación del concreto masivo.

Todos estos resultados favorables demuestran que es factible y recomendable el uso de ceniza volante de carbón mineral en mezclas de concreto, una vez se cumpla con todos los requisitos para su utilización.

# OBJETIVOS

## General

Evaluar y caracterizar física y químicamente la ceniza volante producida por la quema de carbón mineral en la generación de energía eléctrica, para ser usada como una puzolana artificial en la adición en mezclas de concreto.

## Específicos

1. Analizar los efectos de la ceniza volante sobre la resistencia mecánica del concreto, tanto en adición como en sustitución, una vez se cumplan todos los requisitos y dosificaciones adecuadas para concreto.
2. Determinar la influencia de la ceniza volante en las propiedades del concreto en estado fresco, como la trabajabilidad y el tiempo de fraguado.
3. Determinar, a nivel económico, qué beneficio podría tener el uso de la ceniza volante como sustituto de cemento y adición al mismo en el concreto.
4. Analizar y establecer las cantidades o dosificaciones óptimas para mezclas de concreto con ceniza volante, sin afectar las propiedades del mismo en estado fresco y endurecido.



5. Analizar qué reacciones, a nivel químico y físico, ocurren al utilizar ceniza volante dentro del concreto, y cómo estas influyen en su comportamiento y desempeño.
6. Establecer cómo podría comportarse a futuro un concreto con ceniza volante, si existen beneficios como aumento de la resistencia a edades avanzadas, una mayor resistencia contra ataques químicos y si es posible reducir la carbonatación.
7. Reducir el impacto ambiental que causa el almacenamiento al aire libre de ceniza, dándole un uso favorable en la construcción.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad es necesario adaptar el uso de tecnologías y de materiales para mejorar la calidad de las estructuras. Algunas tecnologías tienen costos elevados y pueden ser de difícil acceso, específicamente en la tecnología del concreto se busca tener un material más durable, con una mejor resistencia y un costo relativamente más bajo. Es común el uso de aditivos y adiciones a mezclas de concreto para mejorar su desempeño, en estado fresco y endurecido. Una de las adiciones al concreto más utilizada y más económica son las puzolanas.

Una de las puzolanas más utilizadas es la ceniza volante. Esta es el resultado de la combustión de carbón para la generación de energía en plantas termoeléctricas y es ampliamente utilizada en el proceso de fabricación de cemento Portland, sin embargo, su uso para adición en mezclas de concreto también resulta de beneficio y, dependiendo su clasificación y propiedades físicas y químicas, es capaz de mejorar el desempeño del concreto en estado endurecido, brindando una resistencia a la compresión más alta y una resistencia a los ataques químicos mayor que un concreto convencional. Estudios en diversas regiones del mundo muestran que el uso de este material es altamente beneficioso para mejorar la calidad y durabilidad de las estructuras de concreto.

Para determinar si el uso de ceniza volante es factible como adición en mezclas de concreto, se realizó una caracterización química y mineralógica de la misma para determinar su composición y clasificación. En el estudio realizado se trabajó bajo los procedimientos y requerimientos de Normas COGUANOR y

ASTM, para conocer mediante ensayos las propiedades de concretos adicionados con ceniza, esto para garantizar una estandarización en las pruebas y que estas sean replicables.

El marco teórico presenta la descripción de las puzolanas, su uso a través de la historia, los tipos de puzolanas y de las ventajas que supone el uso de las mismas en el concreto. Además, se presenta la ceniza volante como puzolana artificial utilizada para el estudio, su origen, cantidad producida y generalidades del proceso de obtención.

A continuación se estudian los antecedentes del uso de ceniza volante como adición en el cemento y el concreto, las normas, requisitos para su clasificación y aceptación para su uso. También se hace referencia a las reacciones que el uso de esta provoca en el concreto. También se describe el desarrollo experimental del estudio, el cual aborda desde la obtención de la ceniza volante en planta, hasta su posterior caracterización química y clasificación dentro de los distintos tipos de cenizas existentes. Además se presentan las características físicas y mecánicas de los materiales usados, junto con los parámetros de las normas bajo las que se trabajó. Se hace una descripción del diseño de mezcla y de cada uno de los ensayos realizados al concreto en estado fresco y endurecido.

Para finalizar, se realizó una tabulación, análisis y gráficas de los resultados, de las mezclas con adición y de la sustitución de ceniza, para hacer una comparación con un concreto sin adición.

# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Puzolanas**

Las puzolanas son materiales naturales o artificiales compuestas principalmente por silicio o silicio y aluminio, con los cuales históricamente se producían materiales conglomerantes desde la antigüedad romana hasta la invención del cemento Portland. Actualmente, cuando son utilizadas conjuntamente con el cemento, contribuyen para mejorar las propiedades mecánicas del concreto endurecido.

### **1.1.1. Origen y definición de puzolana**

Originalmente se designaba como puzolana a una roca de origen volcánico existente en las proximidades de la población de Puzzouli en las faldas del monte Vesubio, en lo que ahora se conoce como Nápoles, en Italia. Con el tiempo su nombre se fue generalizando a todos los materiales que tuvieran las propiedades cementantes similares. Bajo el nombre de puzolana se incluyen productos que son significativamente diferentes en cuanto a su origen, estructura y composición química y mineralógica.

#### **1.1.1.1. Clasificación de las puzolanas**

Las puzolanas y escorias se clasifican como un material cementante suplementario y también como adiciones minerales. Por su procedencia existen distintos tipos de puzolanas y estas se clasifican en dos grupos principales: naturales y artificiales. Se les puede utilizar como una adición o como una

sustitución parcial del cemento Portland, pues estos materiales cementantes suplementarios son utilizados desde la década del 70 y se utilizan para mejorar la propiedad del concreto en cuanto a la resistencia de la reactividad álcali-agregado y, especialmente, para mejorar la resistencia mecánica del mismo, entre otros beneficios, siempre bajo el punto de vista de la conservación del medio ambiente y de la energía.

### **1.1.2. Puzolanas naturales**

Se usan desde siglos atrás, teniendo registro del empleo de ceniza volcánica y de arcilla calcinada en culturas que datan del año 2000 A.C. Aún al día de hoy se pueden observar estructuras romanas, griegas, indias y egipcias, fabricadas con concreto puzolánico, lo que comprueba la calidad de estos materiales.

El origen de las puzolanas naturales proviene en parte de rocas volcánicas, en las que el constituyente es vítreo producido por el enfriamiento brusco de la lava, esto da como resultado ceniza volcánica, piedra pómez, tobas, obsidiana y escoria.

#### **1.1.2.1. Puzolanas artificiales**

La experiencia con este tipo de puzolanas es relativamente más reciente y han sido utilizadas en proyectos tales como presas para regular la temperatura del concreto masivo y mejorar la resistencia al ataque de sulfatos. Su origen proviene en un alto porcentaje de procesos industriales, en donde se emplean altas temperaturas, las cuales brindan propiedades cementantes al desecho de materia prima. Uno de estos procesos es la combustión del carbón mineral

bituminoso para plantas termoeléctricas, en donde su desecho principal son las cenizas volantes. Dentro de las puzolanas artificiales en la actualidad, se tienen:

- Materias tratadas (tratamiento térmico entre 600 °C a 900 °C)
- Humo de sílice
- Arcillas naturales (sometidas a temperaturas mayores a 800 °C)
- Escorias de fundición de alto horno granuladas no ferrosas
- Ceniza de residuos agrícolas
- Cenizas volantes producto de la combustión de carbón mineral

Figura 1. **Materiales cementantes suplementarios**



Fuente: KOSMATKA, Steven; et al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. P. 77.

De izquierda a derecha puede verse ceniza volante de clase C (propiedades puzolánicas y cementantes), arcilla calcinada, humo de sílice, ceniza volante de clase F (propiedades puzolánicas) escoria y esquisto.

### **1.1.2.2. Propiedades de las puzolanas**

La puzolana en su estado puro posee un valor cementante nulo o muy bajo, pero al estar finamente molida reacciona con el hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , el cual funciona como un activador que a temperatura ambiente es capaz de dar una formación nueva de compuestos estables con propiedades cementantes, es decir, tiene capacidad de desarrollar resistencia por endurecimiento hidráulico.

Existe una variedad de reacciones químicas en el concreto que pueden derivar una expansión no deseada, una de las principales involucra a la etringita, la cual es una forma de sulfoaluminato de calcio. Esta sal compleja está presente en el cemento y se forma en las primeras etapas de hidratación del cemento Portland, se dispersa uniformemente en la pasta de cemento, esto ocurre durante las primeras 24 horas en que la mayoría de sulfatos se consumen. A este proceso se le conoce como etringita primaria, si ocurre en las otras etapas puede dar lugar a expansiones no deseadas y dar paso a los sulfatos, por ejemplo: de calcio, magnesio, sodio y potasio.

Esta expansión volumétrica puede generarse por la presencia en exceso de sulfato de calcio en el cemento o de cantidades significativas de sulfatos disueltos que provienen de fuentes externas, como el agua o el suelo, y que son capaces de filtrar el concreto endurecido.

Cuando una puzolana se usa en combinación con el cemento Portland, este, durante su hidratación, es la fuente de hidróxido cálcico que reacciona con los aluminosilicatos presentes en la puzolana para formar compuestos cementantes, los cuales proporcionan al concreto características favorables como mejorar la trabajabilidad y densificar el concreto, lo que le brinda una

mayor resistencia a la compresión, reduce vacíos para impedir el ingreso de agresivos y sulfatos y le brinda durabilidad. Esto significa que el uso de materiales suplementarios como las puzolanas naturales, ceniza volante, escorias, entre otros, pueden mejorar las propiedades del concreto considerablemente.

## 1.2. Uso de las puzolanas en la elaboración de cemento

Los cementos adicionados se producen por la molienda uniforme, controlada y conjunta, o por la mezcla de dos o más tipos de materiales finos. En el caso de los cementos Portland puzolánicos se clasifican para uso general en la construcción y no requieren altas resistencias iniciales. El proceso de fabricación de estos cementos es a través de la molienda del *clinker*, el cual es el ingrediente principal activo del cemento junto con una puzolana previamente clasificada. Su contenido se encuentra entre 15 % y 40 % de la masa del cemento.

La Norma ASTM C 595-07 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements (especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados) establece cinco tipos de cementos adicionados:

- Tipo IS Cemento Portland de alto horno
- Tipo IP y Tipo P Cemento Portland puzolánico
- Tipo I (PM) Cemento Portland modificado con puzolana
- Tipo S Cemento de escoria o siderúrgico
- Tipo I (SM) Cemento Portland modificado con escoria

Con excepción del cemento tipo S, los cuatro restantes son de uso general, es decir que su uso incluye pavimentos, pisos, edificios de concreto



armado, puentes, tuberías, productos prefabricados y otras aplicaciones en donde se requiera el cemento convencional y donde las propiedades de otros cementos, como los de moderada resistencia a los sulfatos, no sean necesarias. Debido a que las puzolanas tienen costos relativamente bajos, la utilización de estos materiales para reemplazar de forma parcial el principal compuesto del cemento es el *clinker*, que genera beneficios económicos significativos debido al ahorro energético que produce esta sustitución.

Estos cementos adicionados han sido preparados en fábrica, cumpliendo así con las normas y controles de calidad requeridos para su utilización. En Europa se emplea en gran porcentaje el cemento Portland adicionado con puzolana, mientras que en Estados Unidos, Canadá y otros países de América, estos materiales no se añaden en la fabricación del cemento sino en la planta de elaboración de concreto. Esto supone que el uso de adiciones directamente en el concreto brinda un mejor control en las propiedades deseadas, como la resistencia a la compresión, calor de hidratación y porcentaje de aire atrapado, entre otras.

### **1.2.1. Adición de puzolana al concreto**

En su forma básica, el concreto es una mezcla de cemento Portland, arena, agregado grueso, agua, aire y aditivos, en la que el principal componente activo es el cemento Portland. Se presenta en dos estados, los cuales son: fresco y endurecido. En la actualidad la mayoría de mezclas de concreto contienen adiciones al cemento, las cuales constituyen una porción del material cementante dentro del concreto, sin embargo, estas adiciones provienen de la fabricación del cemento. La adaptación de un concreto a ciertas exigencias tecnológicas tiene un límite y, cuando no es posible hacer variaciones entre agregados, cemento y proporcionamiento de mezcla, se recurre a productos

que mejoran las características y/o propiedades deseadas para cada aplicación. Estos productos son las adiciones de puzolana.

Una de las puzolanas artificiales más utilizada para adición en concreto fresco es la ceniza de carbón mineral o *flyash*, la cual es un subproducto de un proceso industrial y que, por sus propiedades y la alta producción de la misma, la hace un producto con amplias ventajas, dentro de ellas la accesibilidad y sus componentes químicos.

### **1.2.2. Ventajas del uso de las puzolanas en el concreto**

Es durante la preparación de la mezclas de concreto cuando se realizan las adiciones necesarias para mejorar las propiedades de un concreto, ya sean aditivos de origen químico, adiciones de fibras y/o adiciones de puzolanas; es en esta etapa cuando se definen las características del concreto endurecido, por lo tanto es de vital importancia que la adición sea controlada y bajo los procedimientos y requerimientos de las normas aplicables. En el caso de adición en mezclas de concreto se utilizará como base la Norma ASTM C-618-08a.

En el caso de las puzolanas como la ceniza de carbón mineral, en la mayoría de casos su composición mineralógica y geometría la hacen una excelente opción para adición durante el amasado o mezcla de concreto, ya que es capaz de reducir la cantidad de agua en la mezcla, debido a su geometría de forma esférica que actúa como lubricante seco. Las propiedades cementantes varían según el tipo de ceniza por su composición mineralógica y el proceso al que fue sometida, sin embargo, por lo general la mayoría de cenizas producto de la quema de carbón mineral cumple con los requisitos para adicionarse al concreto.

Económicamente resulta una excelente opción utilizar la puzolana como mineral como adición en el concreto fresco, ya se ha utilizado en sustitución de hasta un 30 % del cemento, brindando resultados satisfactorios en las propiedades del concreto endurecido, en algunos casos aumentando la resistencia a la compresión de manera significativa. Quiere decir que se puede tener un ahorro de hasta el 30 % en el material cementante sin perder las propiedades de un concreto convencional.

Su efecto dentro del concreto fresco incluye la reducción de agua de 1 % al 10 % menos que un concreto sin puzolana adicionada, esto sin afectar su asentamiento; además, mejora la trabajabilidad, presenta menos segregación que el concreto convencional, tiene calor de hidratación más bajo que el cemento Portland y, debido a esto, reduce el calor liberado en las estructuras de concreto.

### **1.2.3. Ceniza de carbón mineral como puzolana artificial**

Las cenizas volantes son un subproducto de plantas termoeléctricas que emplean carbón mineral bituminoso como combustible principal para la generación de energía eléctrica, y es el material cementante suplementario más utilizado a nivel mundial. Se calcula que anualmente en todo el mundo se produce un estimado de 200 millones de toneladas de cenizas volantes, de los cuales solamente es utilizado el 20 %. El resto no se emplea adecuadamente y representa un desecho industrial no aprovechado que genera un desperdicio de recursos, ya que pudieran ser empleados en materias primas de otras industrias, además del grave problema medio ambiental que pueden causar, ya que los depósitos de estos desechos por lo regular están al aire libre.

Entre el 5 % y el 7 % de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> a nivel global provienen de la fabricación del cemento Portland. Esto quiere decir que la huella de carbono que se deja en la atmósfera es significativa. Con el uso de materiales como la ceniza volante en la fabricación del cemento y/o en la adición al concreto, se pueda minimizar el grave problema medioambiental que supone el almacenamiento y desaprovechamiento de estos materiales residuales.

Figura 2. **Ceniza volante de carbón mineral**



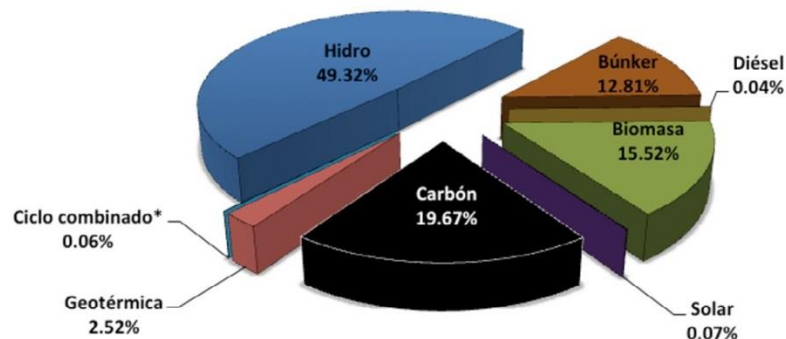
Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

#### **1.2.4. Producción de energía a base de carbón mineral en Guatemala**

En Guatemala, la principal fuente de producción de energía eléctrica está concentrada en las plantas hidroeléctricas. Aunque es eficiente, está determinada por la respuesta hídrica y los patrones climáticos de la región, sin embargo, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) realizó un

diagnóstico del sistema de generación en Guatemala en el 2009, sobre un déficit probable en el suministro de energía eléctrica entre el año 2012 al 2020, y un incremento importante del costo marginal debido al crecimiento histórico del consumo de energía eléctrica. Esto dio paso a que otras tecnologías para generación pudieran ofrecer cubrir la demanda, entre ellas la de generación de energía por la combustión de carbón mineral para abastecer al Sistema Nacional Interconectado (SNI)

Figura 3. **Estadística de producción de energía eléctrica por distintas tecnologías o combustibles para el SNI (enero-diciembre 2014)**

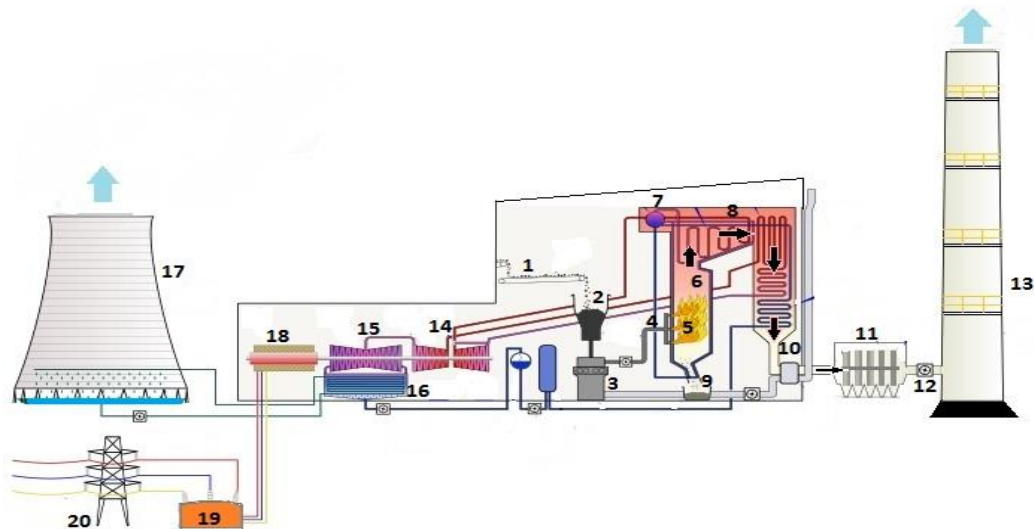


Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE). (2015). *Informe estadístico de mercado*. P. 13.

La generación de energía eléctrica por medio de la quema de carbón mineral pasó de aportar un 10 % de la totalidad de la capacidad instalada en el país, hasta un 19 % según el informe estadístico de mercado. Ha ganado auge frente a las demás tecnologías por el hecho de la eficiencia que esta tiene. Se le considera como generación de base, por lo que su producción de energía es constante durante todo el año. En tiempo de verano la demanda de producción

por este medio aumenta, ya que las reservas hídricas responsables de suministrar la mayor parte de energía tienden a disminuir.

Figura 4. **Esquema general de funcionamiento de planta de generación de energía eléctrica a base de carbón mineral**



1. Banda transportadora de carbón
2. Tolva de carbón
3. Pulverizador
4. Tubería de carbón y aire caliente
5. Quemadores
6. Caldera en donde se origina la combustión y los gases
7. Domo de presión
8. Sistema de tuberías y calentadores de agua
9. Tolva de escoria (*botom ash*)
10. Salida de gases hacia precipitador
11. Precipitador electrostático
12. Ventilador de tiro inducido
13. Chimenea de emisiones

Continuación de la figura 4.

14. Turbina de vapor de alta presión
15. Turbina de vapor de baja presión
16. Condensador
17. Torre de enfriamiento
18. Generador eléctrico
19. Transformador
20. Línea de transmisión

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, esta tecnología de producción de energía a base de combustible fósil es una de las industrias que aportan mayor cantidad de gases de efecto invernadero a la atmósfera, como el CO<sub>2</sub>, además de representar peligro a la salud, especialmente para las vías respiratorias, si no se tienen los controles necesarios para evitar la expulsión de ceniza a través de las chimeneas de las plantas.

En la actualidad las centrales de carbón mineral poseen sistemas que evitan que la ceniza salga expulsada por las chimeneas y así contribuyen a disminuir el impacto ambiental en los alrededores de las plantas. Estos sistemas precipitan las cenizas para almacenarlas en silos y luego evacuarlas a un lugar de almacenaje, sin embargo, aunque las cenizas no se liberen directamente a la atmósfera, quedan expuestas al aire, lo que eventualmente propicia que se esparzan por el viento o el agua.

Una de las soluciones al problema de almacenaje de ceniza de carbón mineral es el uso de este material en la construcción. Debido a las propiedades puzolánicas de la ceniza volante, es posible evitar la acumulación de la misma y

así mejorar el entorno ambiental en los alrededores de la planta, por lo tanto su uso propone beneficios ambientales y económicos que la convierten en un producto potencialmente rentable.

Para la presente investigación se realizó una visita de reconocimiento a una planta de energía a base de carbón mineral, ubicada en el sur del país, en donde se conoció el proceso para la producción de energía, desde la obtención de la materia prima, en este caso carbón, hasta la producción de la ceniza volante resultado de la combustión, además de conocer el aporte energético y capacidad operativa de la planta.

### **1.3. Cantidad de ceniza producida a nivel de planta**

La producción de ceniza de la planta se debe a la demanda de energía requerida del SNI, sin embargo, por ser una fuente constante de generación de energía siempre se está produciendo ceniza.

En Guatemala la explotación de carbón mineral es nula, por lo que el combustible fósil es importado de países productores, a esto se debe que la calidad de la ceniza está determinada por la calidad del carbón y los aspectos mineralógicos y geológicos de la región de donde proviene. Debido a esto la ceniza debe ser analizada periódicamente para determinar su calidad, su clasificación y su posible uso.

#### **1.3.1. Capacidad de producción de energía de la planta eléctrica**

Para llevar a cabo esta investigación se realizó una visita a la planta generadora de energía eléctrica “Generadora Costa Sur”, ubicada en el



Departamento de Escuintla, la cual opera desde 2013 con una eficiencia de más del 95 % en el suministro de potencia al SNI. Al momento de la visita, la potencia producida era de 29,4 MW, sin embargo, el diseño original tiene la capacidad de brindar hasta 85,5 MW al SNI, lo cual se traduce en un 5 % de la producción general de energía total al año.

Figura 5. **Planta Generadora Costa Sur**



Fuente: Generadora de la Costa Sur, Guatemala.

### **1.3.2. Proceso de generación de energía y producción de ceniza volante**

El proceso inicia con la importación de carbón mineral por vía marítima. En el caso de la planta Generadora Costa Sur, el carbón utilizado proviene de Colombia y es conocido en el mercado como “Steam Coal In Bulk” y “Hulla Bituminosa Térmica”, el cual presenta una forma de roca de hasta 5 pulgadas de diámetro y se desembarca por medio de bandas transportadoras hasta un deposito ubicado en el puerto. Cada carguero tiene la capacidad de abastecer más de 50 000 toneladas métricas de carbón mineral. Este, luego de ser vertido en puerto, se transporta a la planta vía terrestre.

Figura 6. **Carbón mineral transportado y almacenado en planta.**



Fuente: Generadora de la Costa Sur, Guatemala.

El carbón permanece en una bodega bajo techo para evitar que la lluvia pueda afectar su humedad, además, las instalaciones no están cerradas en la parte de abajo para permitir la circulación de aire fresco en las pilas de carbón.

Figura 7. **Presentación del carbón mineral antes de ser procesado**



Fuente: Generadora de la Costa Sur, Guatemala

Por medio de bandas transportadoras el carbón inicia su recorrido desde la bodega de almacenamiento hasta donde se realiza el proceso de combustión. El carbón debe ser pulverizado antes de entrar a los quemadores, ya que este método brinda mayor eficiencia en la combustión.

Figura 8. **Transporte del carbón por medio de bandas**



Fuente: Generadora de la Costa Sur, Guatemala.

Una vez reducido el tamaño de partícula, es impulsado por medio de ventiladores de aire caliente a una temperatura de 150° F (66° C) hasta los quemadores dentro de la caldera. Este mismo flujo de aire se mantiene hasta la salida del proceso. Dentro de los quemadores el carbón se somete a temperaturas por arriba de los 1 500° F (815°C).

En la combustión es donde se generan los gases y también se produce el vapor en el domo de presión, el cual es enviado a las turbinas y estas a su vez accionan el generador para producir energía eléctrica. Este vapor alcanza una presión de 905,00 PSI, luego un separador ciclónico es el encargado de separar los gases de las partículas más pesadas conocidas como *bottom ash* o ceniza de fondo, por medio de rotación y gravedad; funciona como un sistema de

limpieza de gases, las partículas más pesadas son separadas a un depósito para posteriormente trasladarlas a otro lugar.

Figura 9. **Ventana de inspección de quemadores**

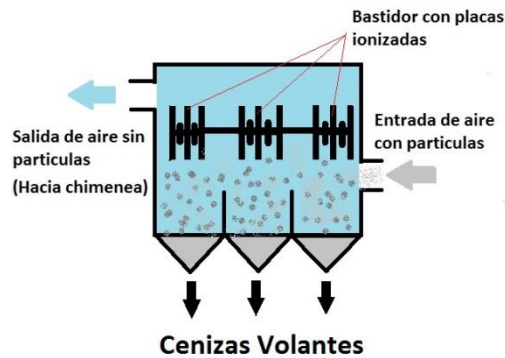


Fuente: Generadora de la Costa Sur, Guatemala.

Después de pasar por el separador ciclónico, el flujo de aire que transporta la ceniza volante lo lleva hasta la última etapa en donde se encuentra un precipitador electrostático, que es el encargado de evitar que las cenizas volantes sean liberadas por la chimenea a la atmósfera.

El precipitador electrostático es un dispositivo que se utiliza para atrapar partículas a base de su ionización, atrayéndolas mediante cargas electrostáticas inducidas. Se encarga de que la ceniza no salga a la atmósfera por la chimenea, es decir, reduce notablemente la contaminación atmosférica actuando eficientemente como un filtro, por lo que no se visualizan nubes de color negro expulsadas al aire libre, por lo tanto, las partículas en suspensión que pudiesen salir no representan un peligro ambiental. El precipitador utiliza una corriente de entre 45 000 a 70 000 voltios.

Figura 10. **Precipitador electrostático**



Fuente: elaboración propia.

La planta visitada para realizar la recolección de ceniza cumple con todos los estándares y controles para la producción de energía eléctrica. Además de seguir un estricto código de seguridad industrial y manejo de los desechos producidos por la combustión de carbón, está automatizada y, debido a esto, cada etapa del proceso puede ser monitoreada en todo momento.

### **1.3.3. Cantidad de ceniza generada en la combustión**

Después de que la ceniza volante es separada del flujo de aire por medio de ionización de partículas, esta precipita a unos contenedores cónicos conocidos como tolvas, en donde permanece hasta que es desplazada por nueva ceniza, que pasa a una cámara en donde es humedecida para confinarla, luego es trasladada a la parte trasera de la planta en un área abierta de aproximadamente 2 500 metros cuadrados.

Dado que la cantidad de ceniza producida está ligada directamente con la cantidad de energía producida y carbón consumido, la producción de la ceniza

volante es variable, sin embargo, se cuenta con un registro del consumo de carbón y producción de ceniza que se cuantifica diariamente.

Tabla I. **Registro de consumo de carbón y ceniza producida del 1 de julio al 18 de julio de 2016**

FECHA	Carbón consumido en TM	Ceniza producida TM	% de ceniza respecto al carbón
1 de julio de 2016	362,99	23,6	6,21
2 de julio de 2016	381,57	68,3	18,8
3 de julio de 2016	380,23	21	5,5
4 de julio de 2016	383,5	31,5	8,28
5 de julio de 2016	380,81	34,1	8,9
6 de julio de 2016	381,13	34,1	8,96
7 de julio de 2016	383,76	44,6	11,71
8 de julio de 2016	381,38	97,1	25,31
9 de julio de 2016	379,75	47,3	12,39
10 de julio de 2016	356,44	57,8	15,21
11 de julio de 2016	381,79	47,3	13,26
12 de julio de 2016	385,19	34,1	8,94
13 de julio de 2016	381,82	84	21,81
14 de julio de 2016	383,35	52,5	13,75
15 de julio de 2016	385,31	78,8	20,54
16 de julio de 2016	384,46	57,8	14,99
17 de julio de 2016	379,81	39,4	10,24
18 de julio de 2016	378,28	54,8	15,2
19 de julio de 2016	Día en que se realizó la visita		

Fuente: elaboración propia con datos proporcionados por Planta Generadora Costa Sur.

El promedio diario de carbón consumido es de 379,54 toneladas métricas, y una producción de ceniza de 50 toneladas métricas, lo que representa un aproximado del 14 % del carbón que ingresa a la caldera para producir los 29,4 MW de potencia que distribuye la planta.

Figura 11. **Área de colocación de ceniza en parte posterior de la planta**



Fuente: Generadora de la Costa Sur, Guatemala.

## **2. ANTECEDENTES DEL USO DE CENIZA DE CARBÓN MINERAL COMO ADICIÓN EN EL CEMENTO Y EL CONCRETO**

### **2.1. Definición**

El concreto está compuesto en su mayoría por agregados finos y gruesos que representan entre el 60 % y el 75 % de su volumen total, y su activo principal es el cemento, que es el que reacciona químicamente con el agua. En el proceso los silicatos de calcio presentes en el cemento forman dos componentes: el hidróxido de calcio y el silicato de calcio hidratado, el cual es el que da al concreto sus características principales, como el fraguado, endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional. A esta reacción se le conoce como hidratación, para formar la pasta cementante que interactúa con los agregados y para dar lugar al concreto endurecido.

Actualmente la mayoría de mezclas de concreto contienen adiciones al cemento, esto con la finalidad de mejorar su desempeño. Estas adiciones, que en su mayoría son materiales inorgánicos, puzolánicos o con propiedad hidráulica latente, también pueden ser incorporados directamente al proceso de mezclado del concreto.

En general las adiciones difieren de los aditivos, ya que estas se agregan al concreto en cantidades significativas y controladas, por lo que resulta de vital importancia determinar la cantidad a utilizar sin afectar propiedades del concreto para así obtener la dosificación volumétrica del mismo.



## 2.2. Cementos con adiciones

El cemento Portland es un conglomerante formado por *clinker*, que está constituido por silicatos de calcio hidráulicos. El *clinker* contiene otros materiales minerales como aluminatos y ferroaluminatos de calcio, además de algunas formas de sulfato de calcio conocido como yeso. Esto hace que el cemento tenga cierto comportamiento para adquirir las propiedades físicas, de resistencia mecánica y durabilidad. Estas materias primas se someten a temperaturas de entre 1 400 °C a 1 550 °C para formar un material granular, duro y de color gris.

Figura 12. ***Clinker* antes de ser pulverizado**



Fuente: KOSMATKA, Steven; et al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. P. 30.

El *clinker* es pulverizado mediante una molienda, y es en este proceso en donde se adiciona el yeso en pequeñas cantidades. Este es el encargado de controlar el tiempo de fraguado y las propiedades de contracción del cemento, además es justo en la molienda en donde ocurre la adición de materiales suplementarios cementantes como la puzolana.

Tabla II. Principales ingredientes del *clinker*

Nombre	Formula	Sigla	% en peso
Silicato tricálcico	$\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$	$\text{C}_3\text{S}$	40 – 60
Silicato bicálcico	$\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$	$\text{C}_2\text{S}$	20 – 30
Aluminoferrito tetracálcico	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO}$	$\text{C}_4\text{AF}$	5 – 12
Aluminato tricálcico	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$	$\text{C}_3\text{A}$	7 – 14
Ferrito dicálcico	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CaO}$	$\text{C}_2\text{F}$	-----
Cuando el clinker contiene $\text{C}_3\text{A}$ no contiene $\text{C}_2\text{F}$ y viceversa			

Fuente: elaboración propia.

La utilización de adiciones en el cemento se hace necesaria para tener un material más sostenible y durable, en este sentido las cenizas volantes se vuelven un material altamente calificado para formar un componente principal en la fabricación de cemento Portland. Su uso reduce el consumo de cemento por unidad de volumen, por lo que permite a la industria del cemento utilizar millones de toneladas de este subproducto industrial, que de otra forma serían vertidas como desechos, para la utilización de ceniza volante en la fabricación de cemento, la cual puede variar entre un 15 % y un 40 % de la masa del cemento final para los cementos tipos IP y P.

### 2.3. Adición mineral del cemento

Cuando se incorpora una adición mineral al cemento se producen distintos fenómenos, como una mejora en la trabajabilidad en la mezcla de concreto fresco y una durabilidad considerable en su estado endurecido, sin embargo, la más importante es la actividad puzolánica que, dependiendo del grado de reactividad o calidad de la misma, que puede ser fuerte, moderada o débil, la incorporación de estas adiciones produce una aceleración de hidratación del

*clinker* a tempranas edades, además de un ahorro económico y energético en la fabricación del cemento.

### 2.3.1. Normas y requisitos

La Norma ASTM C 595-07 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements (especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados), brinda las especificaciones físicas y químicas para cementos adicionados con materiales cementantes suplementarios como la ceniza de carbón mineral y otras puzolanas.

Tabla III. **Requisitos químicos del cemento adicionado**

Requisitos Químicos	Tipos de Cemento		
	I(SM), I(SM)-A, IS, IS-A	S, SA	I(PM), I(PM)-A, P, PA, IP, IP- A
Óxido de magnesio (MgO) max. %	-----	-----	6.0
Azufre como trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) max. %	3.0	4.0	4.0
Azufre (S) max. %	2.0	2.0	-----
Residuo Insoluble max. %	1.0	1.0	-----
Perdida por ignición max. %	3.0	4.0	5.0

Fuente: elaboración propia con base en la norma ASTM C 595-07.

Además de los requerimientos químicos del cemento con adición de puzolana al cemento, debe cumplir las características físicas especificadas en la norma, para considerar su uso en adiciones al cemento.

Tabla IV. **Requisitos físicos de la puzolana**

Puzolana para uso en cemento	Requisitos
Finura: Cantidad retenida en tamizado por vía húmeda en tamiz 45µm No. 325 máx. %	20,0
Reactividad alcalina de la puzolana para utilizar en cementos Tipo IP (< 15) and IP (< 15)-A seis ensayos de expansión en barra de mortero a 91 días, máx. %	0.05
Índice de actividad con cemento portland a 28 días, mín. %	75,0

Fuente: elaboración propia con base en la norma ASTM C 595-07.

### 2.3.2. Normas de los métodos de ensayo

La Norma ASTM C 595-07 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, que brinda las especificaciones para los cementos adicionados y los requisitos químicos del cemento y las características físicas de la puzolana para ser adicionada, también hace referencia a los métodos de ensayo para cada requerimiento. Para requisitos químicos del cemento adicionado el método de ensayo está dado por la Norma ASTM C 114-04 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement (Determinación del análisis químico del cemento hidráulico). Para los requisitos físicos de la puzolana para adición en cemento Portland los métodos de ensayo están dados por las siguientes normas:

- ASTM C 430-08 Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-µm No. 325 Sieve. (Método de ensayo estándar para Finura del cemento hidráulico por el tamiz de 45 µm No. 325).

- ASTM C 227-10 Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method). Método de ensayo. Determinación de la reactividad alcalina potencial de las combinaciones cemento-agregados (Método de la barra de mortero).
- ASTM C 109/C 109M Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Método de ensayo-Determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico).

La Norma ASTM C1157-09 Standard Performance Specification for Hydraulic Cement (Especificación Normalizada de Desempeño para Cemento Hidráulico), menciona los requisitos para desempeño, aunque es válida actualmente para todos los cementos, se inició como norma para los cementos adicionados, ya que en esencia es específicamente apropiada para estos y brinda los métodos de ensayos y referencias a otras normas para la calidad del cemento.

#### **2.4. Adición mineral al concreto**

La incorporación de adiciones directamente al concreto está ligada específicamente con las necesidades requeridas en mezcla, y cuando se desea modificar alguna propiedad para obtener resultados de desempeño en estado fresco y endurecido, se realizan prácticas controladas en donde se adiciona la puzolana directamente a la mezcla del concreto. Existen evidencias de estudios de laboratorio en que se ha elaborado concreto con un porcentaje alto de sustitución de cemento por ceniza volante, y donde se reduce el contenido de agua y el revenimiento requerido se mantiene gracias a la utilización de plastificantes.

En países como India y China, en donde la producción de ceniza de carbón mineral es alta, la calidad de esta ceniza es constante, por lo que su utilización como adición en el concreto se considera una práctica habitual. Existen estudios en que la adición puede sustituir hasta un 30 % del peso del cemento en la mezcla, esto significa un ahorro significativo en la elaboración de concreto, sin embargo, la adición está condicionada por el tipo de ceniza a utilizar, la que puede variar según su composición mineralógica debido a su procedencia y el proceso de combustión al que fue sometida.

Tabla V. **Clasificación de puzolanas**

Descripción	Clasificación
Puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tobas y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias.	N
Ceniza volante que se produce por la calcinación de carbón antracítico ó bituminoso. Esta clase de cenizas volantes poseen propiedades puzolánicas.	F
Ceniza volante producida por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza volante, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene propiedades cementantes.	C

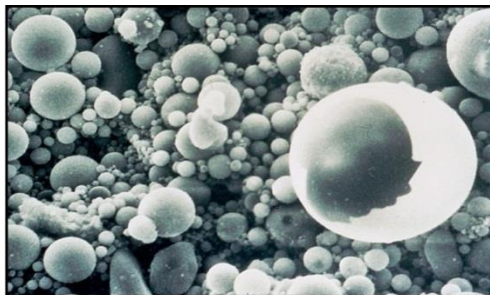
Fuente: elaboración propia según norma ASTM C 618-08a.

En lo que corresponde a resistencia del concreto a tempranas edades, esta mejora cuando se sustituye parte del cemento por adiciones minerales, las cenizas tipo C y las escorias mejoran la resistencia respecto a las cenizas tipo

F, que tienden a tardar más en llegar a las resistencias deseadas. En construcciones como los edificios de gran altura en donde la resistencia del concreto es el parámetro principal, la adición mineral más indicada es el humo de sílice, por su alta efectividad química comparada con las cenizas volantes. Los concretos con ceniza tipo C tienden a presentar un color beige, mientras los concretos con ceniza tipo F presentan un color gris más oscuro que el concreto sin adiciones.

Entre algunas propiedades de la adición de ceniza al concreto está la característica de reducir la cantidad de agua de mezclado, ya que, por su forma, que tiende de ser esférica, actúa como un lubricante, lo que mejora su trabajabilidad, además, tiende a reducir la temperatura del concreto fresco y, por el tamaño de sus partículas, puede densificar el concreto endurecido, sirviendo de llenador de vacíos, por lo que puede soportar con mayor facilidad ataques de sulfato y eventualmente ganar más resistencia a la compresión.

Figura 13. **Micrografía de partículas de ceniza volante con aumento de 1000X**



Fuente: KOSMATKA, Steven; et al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. P. 78.

Antes de su uso, la ceniza volante como adición y como sustituto del cemento en el concreto, puede procesarse mediante clasificación, tamizaje,

reducción de humedad y un análisis químico para determinar su composición y si es elegible para su utilización en mezclas de concreto.

### 2.4.1. Normas y requisitos

La Norma ASTM C 618-08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (Especificación estándar para ceniza volante de carbón y de puzolana natural cruda o calcinada para el concreto) brinda las especificaciones y requisitos físicos y químicos para la clasificación y utilización de las puzolanas como adiciones al concreto fresco. Esta norma también hace referencia al muestreo y método de ensayo. Así mismo, la norma es referenciada en publicaciones e investigaciones como el ACI Committee 232 (Comité ACI 232) en su documento ACI 232.2R Use Fly Ash in Concrete (Uso de la ceniza volante en el concreto), en el cual aborda las generalidades, requisitos, proporcionamiento y efectos de la ceniza volante en el concreto.

Tabla VI. **Requisitos químicos**

Composición química	Clasificación		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ), Óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), min. %	70.0	70.0	50.0
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ), máx %	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad, máx. %	3.0	3.0	3.0
Pérdida por ignición, máx. %	10.0	6.0	6.0

Fuente: elaboración propia según la norma ASTM C 618-08a.



Se puede utilizar puzolana clase F que brinde hasta un 12 % de pérdida por ignición y puede ser aprobada por el usuario una vez los registros de ensayos de laboratorio sean aceptables.

Tabla VII. **Requisitos físicos**

	Clasificación		
	N	F	C
<b>Finura</b>			
Cantidad retenida cuando está humedo tamiz de 45µm (No. 325), Máx. %	34	34	34
<b>Índice de actividad de resistencia <sup>A</sup></b>			
Con el cemento Portland a los 28 días, min % de la de control	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>
Con el cemento Portland a los 7 días, min % de la de control	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>
Requerimiento de agua máx. % de la mezcla de control	115	105	105
<b>Solidez <sup>c</sup></b>			
Autoclave de expansión ó contracción, máx %	0,8	0,8	0,8
<b>Requisitos de uniformidad</b>			
La densidad y la finura de las muestras individuales no debe variar respecto a la media establecida por las diez pruebas anteriores, o por todas las pruebas anteriores, si el número es inferior a diez, en más de: La densidad, la máxima variación de la media, %	5	5	5
Retenido en 45µm (No. 325), la variación máxima, puntos porcentuales de media, %.	5	5	5
<p><sup>A</sup> El índice de actividad de resistencia con cemento portland no debe considerarse como una medida de la resistencia a la compresión del concreto que contiene las cenizas volantes o puzolana natural. La masa de ceniza volante o puzolana natural especificada para la prueba para determinar el índice de actividad de fuerza con cemento portland no se considera una proporción recomendado para el concreto que se utilizará en la obra. La cantidad óptima de ceniza volante o puzolana natural para cualquier proyecto específico está determinada por las propiedades requeridas del concreto y otros componentes del mismo y se establecerá mediante pruebas. El índice de actividad de la resistencia con cemento portland es una medida de reactividad con cemento y está sujeto a variación dependiendo de la fuente tanto de la ceniza volante como del cemento.</p>			

Continuación de la tabla VII.

<p><sup>B</sup>El ensayo de índice de actividad de resistencia a 7 días o 28 días indicará el cumplimiento de las especificaciones.</p>
<p><sup>C</sup>Si la ceniza volante o puzolana natural constituyen más del 20 por ciento en peso del material de cemento en el diseño de la mezcla, los especímenes de prueba, para la expansión de autoclave deberán contener el porcentaje previsto. La expansión excesiva de autoclave es muy importante en los casos en que el agua de ceniza volante o puzolana natural y las raciones de cemento son bajas, por ejemplo, en bloque o mezclas de concreto lanzado.</p>

Fuente: elaboración propia según la norma ASTM C 618-08a.

Existen además requisitos suplementarios dentro de la Norma ASTM 618-08a, sin embargo, queda a discreción del usuario exigir al proveedor estas pruebas. Asimismo, el usuario está en potestad de rechazar el producto si este no cumple con los requerimientos físicos y químicos antes mencionados. Esta acción debe ser reportada al productor de una manera pronta.

#### **2.4.2. Normas de los métodos de ensayo**

La Norma ASTM C 618-08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (Especificación estándar para ceniza volante de carbón y de puzolana natural cruda o calcinada para el concreto), hace referencia a la norma ASTM C 311-07 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete (Métodos de prueba estándar para el muestreo y pruebas de cenizas volantes o puzolanas naturales para uso en cemento Portland). Además, existen normativas en otras regiones, como en Europa, en donde se detallan definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. Esta norma europea en su versión en español es la Norma UNE-EN 450-1:2006+A1, Cenizas Volantes para Hormigón.

A nivel nacional, la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) presenta versiones adaptadas a la región de las normas ASTM para el uso de materiales suplementarios cementantes como las puzolanas. “La ceniza volante de carbón o las puzolanas naturales deben cumplir con la especificación ASTM C618-08a. La escoria granulada de alto horno molida debe cumplir con la especificación ASTM C-989. Estos materiales cementantes deben incorporarse a la mezcla de concreto mediante el uso de cementos que ya los contengan integrados en el proceso de fabricación conforme a la Norma NTG 41095, (ASTM C 1157-09) para garantizar sistemáticamente la uniformidad y por consecuencia la calidad y durabilidad del concreto.”<sup>1</sup>

## **2.5. Trabajabilidad**

La trabajabilidad o manejabilidad es una propiedad del concreto fresco y se refiere a la facilidad con que este puede ser mezclado, manejado, transportado, colocado, compactado adecuadamente y ser terminado sin que pierda su homogeneidad, es decir, que exude o se segregue. El grado de trabajabilidad dependerá de la estructura, tamaño y forma del elemento que se va a construir, además del tamaño y disposición de los elementos de refuerzo y los métodos de colocación y compactación. Un método para medir la trabajabilidad del concreto es el ensayo de asentamiento por medio del cono de Abrams o Slump.

---

<sup>1</sup> Norma Técnica Guatemalteca NTG-41068. *Concreto premezclado. Especificaciones.* p.6.

La adición de cenizas volantes al concreto mejora la trabajabilidad del mismo, ya que, por su condición geométrica esférica que actúa como rodamiento y su finura, vuelve al concreto más plástico y compacto, puede colocarse de manera más sencilla y el aspecto del concreto al desencofrar es mejor, ya que reduce la rugosidad.

### **2.5.1. Resistencia**

Cuando se habla de la resistencia del concreto, por lo general se hace referencia a la resistencia a la compresión del concreto endurecido. Esta etapa comienza con el fraguado final del concreto de una manera acelerada y continúa de forma más lenta en el tiempo, dependiendo de las condiciones de curado y del tipo de concreto elaborado. Por lo general un concreto convencional alcanza su resistencia a la compresión de diseño a los 28 días, sin embargo, esta evaluación se puede realizar a diferentes edades según sea conveniente para monitorear la ganancia de resistencia en un tiempo determinado. Para los concretos adicionados con ceniza volante el proceso puede verse demorado inclusive hasta los 60 o 90 días, sin embargo, este retraso se ve compensado por la ganancia de resistencia al final de este período.

Usualmente estos concretos adicionados pueden alcanzar notablemente más resistencia de aquella con la que fueron diseñados al transcurrir un tiempo considerable. Entre mayor sea la cantidad de ceniza adicionada, las resistencias de diseño se alcanzarán a una edad más tardía, por el contrario, cuando las adiciones son menores se puede tener un balance de este tiempo y obtener resultados satisfactorios a edades más tempranas. La adición de cenizas volantes permite reducir el contenido de agua sin afectar la trabajabilidad, por lo tanto, con una adecuada dosificación de ceniza volante y

que estas cumplan los requisitos de norma, es posible obtener un aumento considerable de la resistencia mecánica del concreto. Asimismo, la adecuada dosificación de ceniza volante permite reducir la presencia de vacíos en el concreto y le brinda una superficie más lisa, por lo que llega a densificarlo y este proceso conlleva mejorar su resistencia a los ataques por sulfatos y aguas agresivas.

### **2.5.2. Durabilidad**

La durabilidad del concreto es la capacidad de comportarse de forma satisfactoria ante las sollicitaciones físicas o químicas agresivas propiciadas por el ambiente, además de proteger adecuadamente las armaduras y demás elementos embebidos en el concreto durante la vida útil de la estructura que conforma. El concreto es susceptible de ser atacado por diversos agentes externos que pueden dañarlo hasta llegar a destruirlo. Este ataque es favorecido por la porosidad en el concreto endurecido, estos poros se producen por la evaporación del agua no combinada durante el proceso de curado, es decir, un exceso de agua necesaria para una mezcla adecuada de sus componentes durante su preparación. Cuanto mayor sea la relación agua/cemento la porosidad es mayor.

Una alta porosidad en el concreto puede dar lugar a que sea atacado por sulfatos, ya que el agua con presencia de sales sulfatadas puede atacar los aluminatos cálcicos hidratados y formar etrignita secundaria, el cual es un compuesto expansivo, es decir, que puede romper el material desde adentro creando fracturas considerables en el concreto endurecido.

Figura 14. **Depósitos blancos de etrignita secundaria en un vacío, ancho del campo 64  $\mu\text{m}$**



Fuente: KOSMATKA, Steven; et al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. P. 19.

El ataque de sulfatos y de cloruros se produce con más intensidad en concretos expuestos por largos períodos a humedad y en ciclos de hielo y deshielo, y con mayor incidencia en suelos con alta concentración de sulfatos, lo cual compromete su durabilidad.

La carbonatación es otro factor que puede atacar los concretos hasta el punto de afectar el refuerzo de acero. Esto se debe a que el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la portlandita del cemento hidratado y este consume la reserva alcalina del concreto, es decir que su pH se ve disminuido, lo que favorece la corrosión de las armaduras debido a que la acidez aumenta y disuelve la capa protectora de la armadura y esto como consecuencia la expone a agentes externos que le provocan corrosión por picadura.

Figura 15. **Efecto de carbonatación en el concreto armado**



Fuente: KOSMATKA, Steven; et al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. P. 16.

Todo concreto llega a carbonatarse hasta una pequeña profundidad, pero cuando esta alcanza niveles mayores compromete la durabilidad de la estructura. La adición de puzolanas o cenizas volantes al concreto puede mitigar estos inconvenientes, ya que por la acción de reducir la porosidad y aumentar la densidad del concreto lo vuelve más impermeable y, por lo tanto, menos vulnerable al ataque de agentes externos, lo que se traduce en una durabilidad considerablemente mayor cuando así sea requerido.

### 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Obtención y muestreo de la ceniza de carbón mineral

Siguiendo las reglas de seguridad industrial dentro de la planta generadora de energía eléctrica, a base de carbón mineral se realizó un muestreo de ceniza volante desde las tolvas de almacenamiento, en donde la ceniza es recolectada luego de ser separada de los gases por medio de los precipitadores electrostáticos. En este muestreo se obtuvieron alrededor de 50 kg de ceniza para realizar el desarrollo experimental de esta investigación.

Figura 16. **Muestreo de ceniza de tolvas de almacenamiento**



Fuente: Planta Generadora de la Costa Sur, Guatemala.



### **3.2. Requisitos de la ceniza volante para adición en concreto según Norma ASTM C 618-08a**

Después del muestreo de la ceniza volante en la planta de energía eléctrica, esta fue transportada a las instalaciones del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) para su almacenamiento, previo a los estudios requeridos por las normas para el cumplimiento de la aplicación en mezclas de concreto. Parte de esta ceniza fue empaquetada y trasladada al Centro de Investigación y Desarrollo (CID) para realizar un análisis químico mediante el ensayo de Fluorescencia de Rayos X, esto para determinar la composición química y mineralógica del material, asimismo la pérdida por ignición que esta presenta. Esta caracterización tiene por objetivo clasificar la ceniza volante y determinar si cumple con los requisitos y especificadores básicos que exige la norma.

Según la clasificación de puzolanas por su origen en la Norma ASTM C-618-08ay expresada en la tabla V, la ceniza se ubica en la clasificación F, ya que es el resultado de la combustión de carbón bituminoso. Además, con base en los resultados del análisis de laboratorio para determinar su composición química y mineralógica, se ubica en esta clasificación pues cumple con los requisitos químicos expresados en la tabla VI.

La suma de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) debe ser mayor al 70 %, el contenido de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) y la humedad menores al 4 %, y la pérdida por ignición no mayor al 6 %. La clasificación F para la ceniza volante la convierte en un subproducto con propiedades únicamente puzolánicas, a diferencia de la clasificación C, la cual describe estas cenizas con propiedades cementantes.

Tabla VIII. **Comparación de resultados de análisis químico y valores requeridos en la norma ASTM C 618-08<sup>a</sup>**

Composición Química	Real	Requerido
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	64.24 %	
Óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	18.32 %	
Óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7.11 %	
Total	89.67 %	70 % Min.
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	0.00 %	4% Máx.
Humedad	0.00 %	4% Máx.
Perdida por ignición	3.03 %	6 % Máx.

Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Homogenización de la ceniza

La ceniza volante se homogenizó con el cemento mediante el proceso de mezclado de forma mecánica. El proceso se realizó para cada mezcla variando las cantidades de ceniza tanto en sustitución de cemento como en adición en porcentajes respecto al peso del cemento.

Figura 17. **Proceso de homogenización de ceniza y cemento**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

### **3.4. Materiales utilizados para la elaboración de concreto con adición**

El concreto es el material de construcción más utilizado debido a la versatilidad, durabilidad y economía. Después del agua y el petróleo es uno de los elementos más demandados a nivel mundial. Se le puede encontrar en cualquier lugar, es usado en construcción de carreteras, viviendas, puentes, presas, edificios y muchas obras civiles. Está conformado por la conglomeración de agregados finos y gruesos, cemento, agua y aire, en ocasiones y según sea requerido aditivos para mejorar o potenciar sus propiedades en estado fresco y endurecido.

Antes de realizar una mezcla de concreto, se debe tener presente la calidad de los componentes que lo conformarán, por lo tanto, un adecuado control sobre los agregados, agua, cemento y aditivos a utilizar, así como las condiciones de amasado correctas que juegan un papel determinante en la calidad y funcionalidad del concreto. En el caso de los agregados que ocupan la mayor cantidad de volumen, hasta un 75 % en una mezcla, conocer sus propiedades mecánicas, características físicas y químicas, es de vital importancia para realizar una dosificación balanceada de los componentes, para un resultado eficiente y económicamente adecuado de las necesidades requeridas por el usuario.

#### **3.4.1. Agregados**

Los agregados para concreto son el constituyente más importante del mismo, ya que influyen en sus propiedades y su desempeño tanto del estado fresco como endurecido, además de influir en el proporcionamiento y en la economía de la mezcla.

Los agregados finos y gruesos deben cumplir una serie de normas para su uso en la ingeniería. “Deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.”<sup>2</sup>

Figura 18. **Tamaño de partículas en agregados para uso en concreto**



Fuente: KOSMATKA, Steven; et al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. P. 106

Por lo tanto, la calidad de los agregados está ligada a la calidad del concreto. Un agregado con propiedades físicas y mecánicas satisfactorias brindará un buen concreto, sin embargo, un agregado que no cumpla con todas las especificaciones requeridas podrá ser utilizado siempre y cuando al diseño de la mezcla de concreto se le realicen las modificaciones pertinentes para compensar las deficiencias propias del agregado.

---

<sup>2</sup>KOSMATKA, Steven; et al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. P. 104.

### 3.4.1.1. Agregado fino

El agregado a emplearse proviene de una planta de procesamiento y distribución ubicada al sur del país, en el municipio de Palín, Escuintla. Es producto de la trituración de roca ígnea, también llamadas rocas magmáticas, que se ubican en el grupo del basalto. Las propiedades físicas del agregado se muestran a continuación:

Tabla IX. **Características físicas del agregado fino**

Densidad Relativa (sss)	2,56	Porcentaje de Absorción (%)	0,70
Densidad (sss) (kg/m <sup>3</sup> )	2 550,00	Contenido de Materia Orgánica	1
Masa Unitaria, Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1810,00	Pasa Tamiz # 200 (%)	5,30
Masa Unitaria, Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	1700,00	Retenido Tamiz 6,35 (%)	0,00
Porcentaje de Vacíos, Compactado (%)	29,00	Modulo de Finura	2,58
Porcentaje de Vacíos, Suelto (%)	34,00		

Fuente: elaboración propia, según resultados de laboratorio.

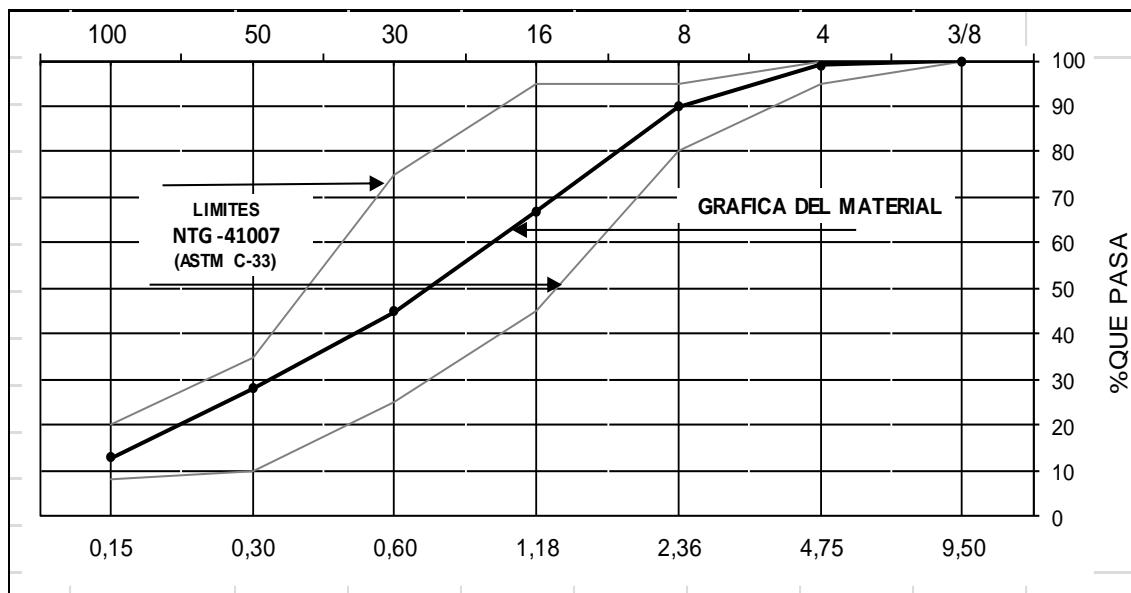
La Norma NTG 41007 h1: Agregados para concreto, especificaciones, que es en esencia equivalente a la Norma ASTM C 33 con algunas modificaciones adecuadas a las condiciones locales de Guatemala, y el Código ACI 211:1: Proporcionamiento de mezclas, brindan los parámetros para algunos de los ensayos de laboratorio descritos en la tabla IX, con los cuales se puede deducir lo siguiente:

- La Norma NTG 41007 h1 (ASTM C 33), para agregado fino, especifica el parámetro de la densidad relativa entre los valores 2,40 y 2,90, por lo tanto el resultado del ensayo, que tiene un valor de 2,56, está dentro del parámetro establecido por la norma.

- Para la masa unitaria compactada del agregado fino se establece un rango entre 1 200 kg/m<sup>3</sup> a 1 750 kg/m<sup>3</sup>, sin embargo, aunque el resultado del ensayo da un valor de 1 810 kg/m<sup>3</sup>, que sobrepasa el valor límite, este es aceptable, ya que el diseño de mezcla se puede balancear haciendo una corrección en la masa unitaria del concreto.
- El porcentaje de vacíos obtenido basado en la masa unitaria compactada es de 34 %, que comparado con el rango de la norma que oscila entre el 40 % a 50 %, indica una cantidad menor de pasta de cemento para llenar estos vacíos.
- El porcentaje de absorción para el agregado es bajo, es decir, absorbe poca cantidad de agua, su valor es de 0,70 %.
- Para el ensayo de contenido de materia orgánica la Norma NTG 41010 h4 (ASTM C-40) establece como aceptable un material en el rango de No.1 a No.3. Para el agregado fino analizado el valor fue de No.1, por lo que dicho resultado es aceptable.
- La norma exige que el porcentaje que debe pasar por el tamiz No. 200, para agregado fino manufacturado, no debe exceder el 7 %. En el ensayo realizado el valor es de 5,30 %, el cual cumple la especificación de la norma.
- El porcentaje de retenido de tamiz No. 6,35 es 0 %, por lo que no contiene material considerado como agregado grueso dentro de su granulometría.

- El módulo de finura para el agregado fino manufacturado debe ubicarse en un rango de 2,30 y 3,10. El resultado del ensayo brinda un 2,58, por lo que cumple con lo especificado en la norma. El módulo de finura proviene de la granulometría del material.

Figura 19. **Granulometría del agregado fino**



Fuente: elaboración propia, según resultados de laboratorio.

- En la gráfica de la granulometría de la figura 18 se observa que la graduación del agregado se ubica dentro de los límites establecidos por la Norma NTG 41007 h1 (ASTM C 33), por lo que cumple el parámetro requerido.

### 3.4.1.2. Agregado grueso

El agregado grueso a emplearse proviene de la misma fuente y del mismo tipo de roca que el agregado fino. Las características físicas se muestran a continuación:

Tabla X. **Características físicas del agregado grueso**

Densidad Relativa (sss)	2,67	Pasa Tamiz # 200 (%)	1,70
Densidad (sss) (kg/m <sup>3</sup> )	2 660,00	Porcentaje de Vacíos, Compactado (%)	41,00
Masa Unitaria, Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1 580,00	Porcentaje de Vacíos, Suelto (%)	45,00
Masa Unitaria, Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	1 460,00	Modulo de Finura	5,77
Porcentaje de Absorción (%)	0,80	Retenido Tamiz 6,35 (%)	60,70

Fuente: elaboración propia, según resultados de laboratorio.

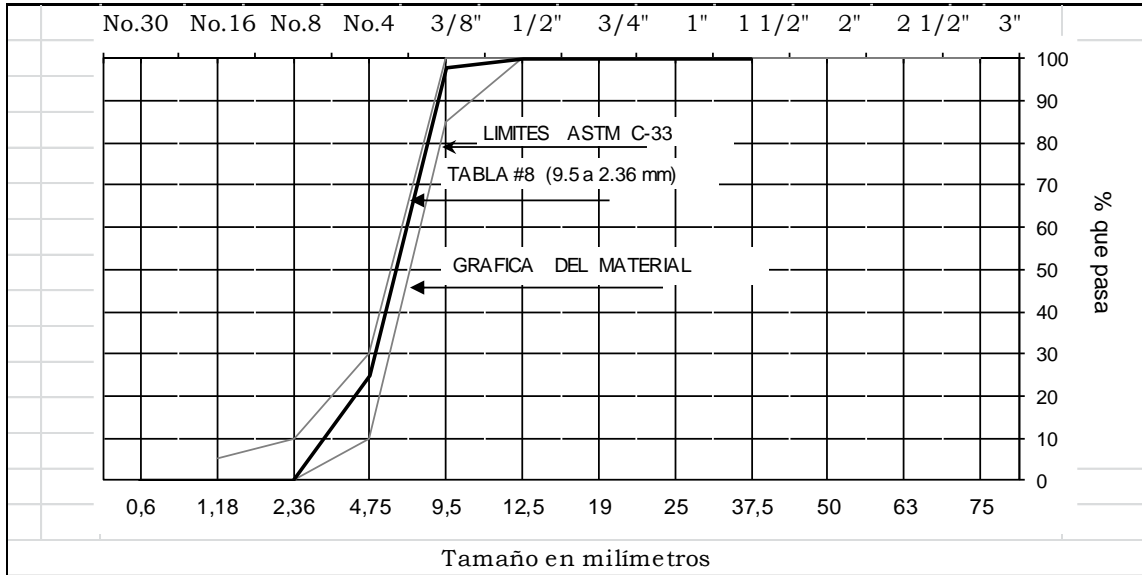
La Norma NTG 41007 h-1 (ASTM C 33) y el código ACI 211,1: Proporcionamiento de mezclas, brindan los parámetros para algunos de los ensayos de laboratorio descritos en la tabla X, con los cuales se puede deducir lo siguiente:

- La Norma NTG 41007 h-1 (ASTM C 33) especifica los parámetros de la densidad relativa para agregado grueso de un concreto normal, entre 2,40 y 3,00. El resultado del ensayo fue de 2,67, por lo que cumple con el requerimiento.
- La masa unitaria compactada de un agregado grueso para un concreto normal varía de 1 200 kg/m<sup>3</sup> a 1 750 kg/m<sup>3</sup>. El resultado del ensayo fue de 1 580 kg/m<sup>3</sup>, por lo que cumple con el requerimiento.



- El porcentaje de absorción del agregado grueso oscila entre 0,2 % al 4,0 %. El resultado del ensayo fue de 0,80 %, por lo que se encuentra dentro del parámetro establecido, además, se observa que el agregado tiene poca absorción de agua, esto debido a la naturaleza del mismo.
- Para agregado grueso, la norma especifica que el porcentaje que debe pasar por el tamiz No. 200 no puede ser mayor a 1,0 %. En el ensayo que se realizó, el porcentaje es de 1,7 %, lo que supera el límite establecido, sin embargo, dicha norma hace la aclaración de que cuando el límite es excedido, puede ser aumentado a un 15,00 %, si el material está libre de arcillas y esquistos o se sabe que el agregado fino a ser utilizado en el concreto contiene menos que la cantidad máxima especificada que pasa el tamiz No. 200 (ver tabla IX), por lo tanto el material cumple con las especificaciones de la norma.
- El agregado contiene, según el resultado del ensayo, un 41,00 % de vacíos en su designación compactada, lo que es un porcentaje considerablemente alto y puede deberse a la forma angular de las partículas. Esto puede requerir mayor pasta de cemento para llenar vacíos y por lo tanto aumentar el costo del concreto.
- Se reporta un módulo de finura para el agregado grueso de 5,77 %, sin embargo, la Norma NTG 41007 (ASTM C 33) no tiene información sobre los límites del módulo de finura. El módulo de finura proviene de la granulometría del material.

Figura 20. **Granulometría del agregado grueso**



Fuente: elaboración propia, según resultados de laboratorio.

- En la gráfica de la granulometría de la figura 19 se observa que la graduación del agregado se ubica dentro de los límites establecidos por la Norma NTG 41007 h1 (ASTM C 33), por lo que cumple el parámetro requerido.

Tabla XI. **Porcentaje que pasa en los tamices para agregado grueso**

Tamiz No.	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.8	No.16
% Que pasa	100,0	100,00	100,00	100,00	98,00	25,00	0,00	0,00

Fuente: elaboración propia, según resultados de laboratorio.

- La tabla XI muestra el porcentaje que pasa en cada tamiz, el tamaño máximo nominal del agregado grueso se halla en el rango del 5 % al 15 % en porcentaje retenido; el porcentaje en el tamiz 3/8" es de 2,0 %, y el siguiente tamiz cuenta con 75 %, entonces se toma como tamaño máximo nominal el tamiz 3/8", ya que es el más cercano al 5 % del límite inferior.

### 3.4.2. Cemento

El cemento a utilizar para el desarrollo experimental es un cemento Portland tipo I (PM), de uso general con adición de puzolana, según Norma NTG 41095, con una resistencia a la compresión especificada de 4 060 libras por pulgada cuadrada a los 28 días.

Tabla XII. **Composición química del cemento**

Elementos presentes en el cemento Portland	Forma de expresar el contenido	Contenido en % de óxidos
Si (Silicio)	SiO <sub>2</sub>	17,0-25,0
Ca (Calcio)	CaO	60,0-67,0
S (Azufre)	SO <sub>3</sub>	1,0-3,0
Fe (Hierro)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5-6,0
Al (Aluminio)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0-8,0
Na, K (Sodio, Potasio)	Na <sub>2</sub> O y K <sub>2</sub> O	0,0-1,0
Mg (Magnesio)	MgO	0-0,5

Fuente: NEVILLE, Adam; BROOKS, J.J. *Tecnología del concreto*. P. 19.

Durante el proceso de hidratación del cemento, el aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A), uno de los cuatro componentes principales del cemento y el más reactivo frente al agua (ver tabla II), en presencia del yeso reacciona con este, formando

trisulfoaluminato cálcico (etrignita), cuya función es regular el fraguado acelerado del  $C_3A$  y su temperatura de hidratación. La etrignita se deposita en las partículas de  $C_3A$ , bloqueando el acceso a la disolución, es decir que disminuye su velocidad de reacción o fraguado.

La adición de puzolana en la fabricación del cemento hace que la cantidad de  $C_3A$  disminuya y con esta la cantidad de yeso. Al tener una cantidad menor de  $C_3A$  el cemento se hace más resistente al ataque de sulfatos.

Las reacciones de hidratación de los dos silicatos de calcio  $C_3S$  y  $C_2S$  de la tabla II son similares entre sí, únicamente difieren por la cantidad producida de hidróxido de calcio conocido como Portlandita, que es un producto cristalino, por el calor de hidratación, y porque el  $C_3S$  tiene una reacción más rápida y es el que define la resistencia a tempranas edades. También se forman sustancias coloidales como el gel de torbemorita, este tiene la propiedad de aglutinar todos los componentes entre sí. Estos dos silicatos son los compuestos más importantes y los responsables de la resistencia de la pasta hidratada del cemento.

El ferroaluminatotetracálcico ( $C_4AF$ ) presente en el cemento, a diferencia de los tres componentes anteriores no posee una influencia relevante en la hidratación del cemento, sin embargo, reacciona con el yeso para dar paso a la sulfoferrita de calcio, y su presencia puede acelerar la hidratación de los silicatos. El  $C_4AF$  es el responsable del color grisáceo del concreto.

La velocidad de hidratación del concreto es afectada, además de la composición química del cemento, por la finura de la molienda, la cantidad de agua agregada a la mezcla y las temperaturas de los componentes del concreto al mezclarlos.

### **3.4.3. Adición de ceniza volante**

Las adiciones al concreto son materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que, finamente divididos, pueden ser añadidos antes o durante el proceso de mezclado al concreto, con el fin de mejorar alguna de sus propiedades o conferirle características especiales. La adición utilizada es ceniza volante de carbón mineral de clasificación F. La cantidad se estableció por medio de porcentajes respecto al peso del cemento utilizado en el diseño de la mezcla, estos varían entre 5 % a 15 %, como adición, y del 5 % hasta un 30 % en sustitución de cemento a la mezcla.

El contenido de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y trióxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en la ceniza a utilizar reacciona con facilidad con el hidróxido cálcico. Estos forman silicatos y aluminatos cálcicos hidratados semejantes a los formados en la reacción de hidratación del cemento y son capaces de desarrollar resistencia mecánica, principalmente el silicato cálcico hidratado (SCH), mientras que el aluminato cálcico hidratado (ACH), al reaccionar e hidratarse, se vuelve más estable ante agentes químicos. Las reacciones de estos compuestos se expresan de la siguiente manera:



### **3.4.4. Agua para mezcla**

La calidad del agua utilizada para las mezclas cumple con especificaciones de agua para concreto, entre las cuales se indica que se puede utilizar agua potable para consumo humano con un pH entre 6,0 y 9,2, y

libre de partículas en suspensión, sin sabor ni olor presentes. Las impurezas excesivas pueden afectar el tiempo de fraguado, la resistencia y la estabilidad volumétrica del concreto. El agua potable utilizada tiene un pH de 6,5 a 8,5 según Norma Coguanor NTG 29001, por lo que cumple el parámetro. La cantidad de agua se determina al establecer la trabajabilidad deseada del concreto. En todas las mezclas se utilizó la misma calidad de agua.

### **3.5. Diseño teórico de mezcla de concreto**

El proceso para determinar las características requeridas del concreto en su estado fresco y endurecido es llamado diseño de mezcla. Entre estas características están las propiedades del concreto fresco como la trabajabilidad, durabilidad y resistencia para el estado endurecido. La dosificación de la mezcla se refiere al proceso de determinar las cantidades de los componentes del concreto para lograr las características deseadas.

Para determinar la dosificación adecuada se requiere conocer las características físicas y mecánicas de los componentes del concreto, es decir, un informe detallado de los agregados. Usualmente las dosificaciones de concreto que no contienen aditivos químicos y/o materiales distintos al cemento son re-dosificados para incluir estos materiales. El comportamiento del concreto se debe verificar con mezclas de prueba en laboratorio o en campo. “Las proporciones calculadas por cualquier método se deben considerar siempre objeto de una revisión basada en la experimentación con las mezclas de prueba”.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup>American Concrete Institute. *Proporcionamiento de mezclas concreto normal, pesado y masivo*. P. 11.

La mayoría de propiedades requeridas en el concreto endurecido dependerán, principalmente, de la calidad de la pasta cementante, y la etapa fundamental para el proporcionamiento adecuado es la elección de la relación agua / cemento adecuada para una correcta trabajabilidad, resistencia y durabilidad del concreto, y que cumpla con la necesidad de la estructura.

El método de cálculo para la dosificación del concreto o diseño teórico de mezcla es el utilizado en la Sección de Agregados, Concretos y Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Este método es sencillo y con un alto índice de efectividad una vez se cumplan con todos los requisitos establecidos. Entre los parámetros en que se basa el método están los siguientes:

- Determinar el tipo de estructura y la resistencia del concreto a utilizar.
- Establecer el revenimiento para determinar la adecuada relación agua / cemento en la mezcla, para tener una adecuada trabajabilidad.
- Los agregados del concreto deben cumplir con las especificaciones de normas mencionadas con anterioridad.
- Determinar el tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- Estimar el peso volumétrico a obtener del concreto.

Para la presente investigación se realizó un diseño teórico para cumplir una resistencia a la compresión de 281 kg/m<sup>2</sup> (4 000 PSI) a los 28 días, con un asentamiento de 8-10 cm y una proporción de: 1 : 2,02 : 2,19 : 0,54. Esta proporción es constante en las mezclas en las cuales la ceniza se utilizó como

adición, variando la cantidad de ceniza adicionada en porcentajes de 5 %, 10 % y 15 %, en relación al peso del cemento.

En las mezclas de sustitución de ceniza por cemento se mantuvo la misma proporción, únicamente se sustituyó parte del cemento por ceniza en porcentajes de 5 %, 10 %, 15 % y 30 % sobre el peso del cemento. En total se realizaron 7 mezclas de concreto entre adición y sustitución de ceniza. Para poder tener un parámetro de comparación sobre los efectos de este material sobre el concreto se realizó una mezcla patrón, la cual no tiene ningún tipo de material adicionado o sustituido.

### **3.6. Ensayos de control de calidad del concreto**

Los requisitos para la dosificación del concreto están basados en que este debe tener la adecuada durabilidad y resistencia para lo que fue diseñado, por lo tanto la elaboración y desempeño satisfactorio de un concreto con propiedades específicas debe cumplir con los ensayos de control de calidad y aceptación, ya que estos son parte indispensable en el proceso constructivo.

Los resultados de las pruebas de laboratorio o ensayos brindan información vital que da los parámetros para ajustar el diseño de mezcla y cumplir los requerimientos de calidad del concreto. Las mezclas de prueba se pueden preparar según las circunstancias en un laboratorio o directamente en campo.

Los ensayos de laboratorio se realizaron en la Sección de Agregados, Concretos y Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería, bajo los procedimientos indicados en las normas. Los ensayos de control de calidad se dividen en ensayos al concreto fresco y ensayos al concreto endurecido.



### **3.6.1. Ensayos a concreto fresco**

El concreto se debe mezclar completamente hasta que tenga una apariencia uniforme, con todos sus componentes adecuadamente distribuidos. Su consistencia debe ser plástica y semifluida, para permitir una fácil y adecuada colocación en obra. La dosificación de los componentes del concreto deben tener la mayor precisión posible para tener el comportamiento deseado en su estado fresco. La cantidad de agua y aditivo se pueden medir tanto por volumen como por masa. Un concreto adecuadamente mezclado tendrá en esencia las mismas características en muestras tomadas de diferentes porciones de la mezcla. Se debe enfatizar en la importancia de muestras realmente representativas en los ensayos de control.

Es importante mencionar que para todos los ensayos que se le realizan al concreto fresco, los accesorios deben estar ligeramente humedecidos para una adecuada manipulación de la mezcla. Los ensayos al concreto fresco se realizaron bajo los procedimientos y especificaciones recomendadas en las Normas NTG y ASTM para estas pruebas. Son los siguientes:

#### **3.6.1.1. Medición de la temperatura del concreto recién mezclado NTG 41053 (ASTM C-1064)**

Este método de ensayo permite medir la temperatura en mezclas de concreto por medio de un dispositivo de precisión y se utiliza para verificar que este no presente una reacción atípica como un fraguado acelerado, el cual tiende a elevar la temperatura del concreto. Se sabe que el cemento, durante su fase de hidratación por reacción química exotérmica, eleva la temperatura al concreto, a esto se le conoce como calor de hidratación. Un aumento en la temperatura puede estar motivado por un cemento con escasa cantidad de

sulfato de calcio (yeso), por un cemento con presencia de acelerantes como el cloruro de calcio, una baja o nula cantidad de adición de puzolana y un exceso en la finura del cemento. El no tener un adecuado control de la temperatura puede influenciar negativamente en las propiedades del concreto fresco y endurecido.

Figura 21. **Ensayo de medición de temperatura**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

El ensayo se realiza luego de observar que la mezcla tiene la consistencia deseada. Consiste en humedecer e introducir un mínimo de 75 mm (3 pulgadas) un termómetro de vástago (figura 20), el cual cuenta con un sensor que al estar sumergido en un tiempo de 2 a 5 minutos dentro del concreto, brindará la temperatura del concreto recién mezclado, la cual se reporta con una aproximación de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1^{\circ}\text{F}$ ).

### **3.6.1.2. Determinación del revenimiento NTG 41052 (ASTM C-143)**

Este método de ensayo comprende la determinación del asentamiento del concreto hidráulico, tanto en laboratorio como en campo. El ensayo consiste en colocar una muestra de concreto recién mezclado dentro de un molde metálico previamente humedecido, con forma de cono truncado, cuyas dimensiones son: 30,0 cm de altura, 20,0 cm de diámetro en la base y 10,0 cm de diámetro en la parte superior. Este molde es conocido también como Cono de Abrams.

El cono se coloca sobre una placa metálica no absorbente previamente humedecida y sobre una superficie totalmente plana, a continuación se llena el recipiente con tres capas de igual volumen, cada capa es apisonada 25 veces en forma circular y uniforme con una barra de acero lisa y con la punta semiesférica de 1,6 cm de diámetro, esto con la finalidad de consolidar la muestra de concreto dentro del molde. Al llegar a la última capa se debe asegurar que exista un remanente de concreto por encima del molde, al terminar de apisonar se debe emparejar la superficie de la capa con un movimiento de enrase o rodamiento de la barra.

Una vez nivelada la capa superior de concreto se debe continuar sosteniendo el molde firmemente hacia abajo por medio de los estribos que están a sus costados, mientras se remueve el concreto del área que rodea la base. De inmediato se retira el molde levantándolo cuidadosamente en forma vertical y sin movimientos laterales o de torsión. El molde debe colocarse invertido a un costado del concreto desplomado para efectuar la medida del asentamiento. Esta prueba se realiza sin interrupción desde el inicio del llenado hasta la remoción del molde en un período de 2 ½ minutos.

Figura 22. **Determinación del revenimiento**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería/ USAC.

El revenimiento se mide de inmediato determinando la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro original desplazado en la superficie del concreto (ver figura 21). Si ocurre una caída evidente de una porción, el desplome o el desprendimiento de una parte de la masa de concreto, se desecha la prueba y se realiza una nueva con otra porción de la mezcla. Si esto ocurre en dos ensayos consecutivos, el concreto tiene una escasa plasticidad y cohesión para que la prueba sea aplicable. Un valor alto de revenimiento es indicativo de un concreto más fluido. Se debe registrar el revenimiento de la mezcla con una aproximación de 5 mm o en pulgadas, al  $\frac{1}{4}$  de pulgada más cercano.

### **3.6.1.3. Peso unitario del concreto NTG 41017 h5 (ASTM C-138)**

Este método determina el peso por unidad de volumen, también llamado densidad aparente del concreto recién mezclado, para compararlo con el estimado durante el diseño teórico de la mezcla. Usualmente el concreto convencional tiene un peso unitario entre 2 240 kg/m<sup>3</sup> y 2 460 kg/m<sup>3</sup>, si ocurriera una variación significativa a la esperada, se debe considerar los materiales, la relación agua / cemento y / o que el contenido de aire fue modificado previamente en el diseño teórico, es decir, se requiere un concreto con características distintas a un concreto convencional.

El procedimiento consiste inicialmente en registrar el peso de un recipiente circular de metal, el cual tiene un volumen de siete litros, este volumen se utiliza hasta para agregados de una pulgada. Una vez obtenido el peso del recipiente este se coloca en una superficie plana y libre de vibraciones, para ser llenado en tres capas de igual volumen. Cada capa debe apisonarse con una barra igual a la utilizada en el procedimiento del revenimiento. Se compacta 25 veces en forma circular y uniforme cada capa, seguido de una serie de 10 a 15 golpes leves distribuidos a los lados del recipiente con un mazo de goma, a la altura de cada capa, esto con la finalidad de cerrar los vacíos dejados por la varilla apisonadora.

Una vez compactada la última capa, se procede a enrasar el recipiente con una placa metálica para retirar el exceso de concreto en la superficie, así mismo se le debe dar un acabado suavemente, teniendo la precaución de dejar el recipiente lleno y nivelado. Después de enrasar se limpia el concreto del exterior del recipiente y se determina el peso del concreto en el mismo con la

exactitud requerida. Se recomienda, para fines de economía en la mezcla, utilizar el concreto del recipiente para realizar el ensayo de contenido de aire.

Figura 23. **Determinación del peso unitario**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Para determinar el peso unitario o densidad aparente del concreto se resta el peso del recipiente, del peso del recipiente con concreto, y se divide el peso neto del concreto entre el volumen del recipiente de medición. Se reporta en  $\text{pie}^3$  o  $\text{m}^3$ , según sea requerido. Se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{M_{rc} - M_r}{V_r} = D$$

Donde:

$M_{rc}$ = peso de recipiente con concreto

$M_r$ = peso de recipiente vacío

$V_r$ = volumen de recipiente

$D$ = peso unitario o densidad aparente

#### **3.6.1.4. Determinación del contenido de aire NTG 41017 h7 (ASTM C-231)**

Este ensayo tiene la finalidad de medir el contenido de aire en el concreto fresco, existen varios métodos para realizarlo, sin embargo, el más práctico es el método de presión, el cual se basa en la ley de Boyle, la cual relaciona presión y volumen. La presión aplicada comprime el aire atrapado dentro de la mezcla de concreto, incluyendo el aire en los poros de los agregados. Por esta razón las pruebas por este método no son recomendadas para mezclas que contengan agregados muy porosos o con materiales livianos. Este ensayo no puede distinguir la cantidad de aire en los vacíos dejados por una mala consolidación, por eso se requiere de una adecuada compactación durante el procedimiento.

Para realizar el procedimiento se utiliza el mismo equipo y método de compactación que se realizó en el ensayo de peso unitario, por lo que es factible usar el concreto que aún esté dentro del recipiente. Se debe limpiar el borde del recipiente, ya que será acoplado a un sistema medidor de aire por presión tipo B, el cual consta de válvulas de alivio y de inyección de aire, también cuenta con un manómetro que indica el porcentaje de aire contenido en la mezcla.

Una vez acoplado el sistema, se sujeta al recipiente mediante cuatro seguros para formar un sello y evitar que el aire escape durante el procedimiento. También se verifica que todas las válvulas estén correctamente cerradas, se coloca agua por una de las válvulas para formar un sello hidráulico sobre la mezcla, se procede a inyectar aire al medidor por medio de bombeo hasta llegar a la lectura de calibración, luego se cierra la válvula y se libera el

aire del medidor a la mezcla, mientras se golpea suavemente el recipiente para ayudar a liberar el aire atrapado.

Figura 24. **Determinación del contenido de aire en el concreto**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Se toma la lectura directamente del indicador en porcentaje. El contenido máximo de aire es de 7,5 % para un concreto con agregado grueso de tamaño máximo nominal de 3/8", según el Código ACI comité 211,1, para un concreto con una exposición media o severa para productos químicos u otros agentes agresivos.

#### **3.6.1.5. Determinación de tiempo de fraguado NTG 41017 h12 (ASTM C-403)**

El método de ensayo determina el tiempo de fraguado de concreto por medio de mediciones de resistencia a la penetración de mortero tamizado de la mezcla de concreto. Es aplicable tanto para uso bajo condiciones controladas de laboratorio como en condiciones controladas en obra.



El ensayo inicia desde el registro del tiempo en que el agua tiene contacto con el cemento, luego se obtiene una muestra de mortero representativa del concreto, mediante tamizado en su estado plástico por el tamiz 4,75 mm. El mortero se coloca en recipientes lisos y no absorbentes, de forma cilíndrica o rectangular que posean la suficiente área para efectuar las medidas, y una profundidad de al menos 15 cm para realizar las mediciones sin ninguna complicación.

La muestra de mortero debe ser colocada en un lugar libre de radiación solar, viento y vibraciones, a una temperatura entre 20 °C y 25 °C. Se le coloca un paño húmedo para evitar evaporación en la superficie del mortero, la primera lectura de penetración se realiza después de un período de entre 3 a 5 horas, previo a esto se retira el agua de exudación en la superficie del mortero por medio de una pipeta. Después de la primera lectura, las siguientes penetraciones se realizarán en intervalos regulares de media hora.

Las lecturas se realizan por medio de un dispositivo de carga de operación manual, el cual mide la fuerza requerida para causar la penetración de cada serie de agujas intercambiables. El dispositivo tiene una capacidad de carga máxima de 130 lb.

Las agujas se cambian cada vez que la penetración en el mortero se dificulta, estas varían en área desde 1 pulg<sup>2</sup> a 1/20 pulg<sup>2</sup>. La lectura de la resistencia a la penetración se realiza aplicando una fuerza constante por 10 segundos. La fuerza se deja de aplicar cuando la aguja ha alcanzado 1 pulg de penetración en la superficie, luego se registra la lectura de la cantidad de fuerza aplicada al dispositivo de carga.

Figura 25. **Toma de lectura de resistencia a la penetración**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Se debe realizar al menos seis penetraciones para cada ensayo de tiempo de fraguado. Se da como finalizado el ensayo cuando la resistencia a la penetración en el mortero iguale o exceda  $281 \text{ kg/cm}^2$  (4 000 PSI), sin importar la cantidad de penetraciones que deban realizarse hasta llegar a dicha resistencia.

Figura 26. **Especímenes de ensayo**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Se realizará una gráfica de la resistencia a la penetración en función del tiempo transcurrido, en la cual se determina el tiempo de fraguado inicial y fraguado final. La temperatura, la relación agua / cemento y los aditivos tienen una influencia considerable en el tiempo de fraguado del concreto.

#### **3.6.1.6. Elaboración de cilindros de concreto fresco en obra NTG 41061 (ASTM C-31)**

Esta práctica trata sobre el procedimiento para preparar y curar especímenes cilíndricos y representativos de concreto fresco, para su posterior evaluación de la resistencia a la compresión. Esta se realiza luego de finalizar los ensayos de aceptación del concreto fresco y consiste en elaborar los especímenes de concreto por medio de moldes que cumplan con requisitos y especificaciones como el material de fabricación. Este debe ser un material no absorbente y que no tenga una reacción negativa al estar en contacto con el concreto.

La probeta estándar para la resistencia a la compresión es un cilindro con 150 mm (6 pulg) de diámetro y 300 mm (12 pulg), de altura para concreto con agregado grueso de 50 mm (2 pulg) o de menor tamaño. Para agregados mayores, el diámetro del cilindro debe tener un mínimo de tres veces la dimensión máxima de dicho agregado, y la altura debe ser dos veces el diámetro.

Los moldes deben colocarse en una superficie rígida y nivelada, libre de vibraciones y otras perturbaciones, y en un lugar cercano a donde serán almacenados. Se obtiene una muestra representativa de concreto y se realiza el llenado de forma cuidadosa en tres capas de igual volumen. Cada capa será consolidada con una barra de acero lisa igual a la utilizada en los ensayos de

asentamiento y peso unitario, así mismo, cada capa será golpeada levemente con un mazo de goma para liberar el aire atrapado durante la consolidación. En la última capa se elimina el remanente y se procede a realizar un acabado liso y uniforme en la superficie con una placa metálica o una espátula.

Figura 27. **Elaboración de especímenes cilíndricos de concreto**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Después del procedimiento de moldeado de cilindros, estos deben ser transportados a un lugar seguro y cercano al área en donde se elaboraron, libres de radiación solar, vibraciones y cualquier perturbación que pudiese alterar su proceso de fraguado.

Figura 28. **Especímenes de concreto fresco**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Se elaboran seis probetas de concreto por mezcla de prueba. Estas se ensayarán a la compresión en pares, a diferentes edades para conocer la evolución de la resistencia a través del tiempo.

### **3.6.2. Ensayos al concreto endurecido**

El concreto endurecido debe tener un proceso de curado adecuado para garantizar que las moléculas de cemento se hidraten correctamente, para obtener las características esperadas en cuanto a las sollicitaciones mecánicas a las que será sometido, como la resistencia a la compresión. Los ensayos al concreto endurecido brindan con exactitud el comportamiento del mismo y permiten verificar si el diseño teórico de mezcla fue satisfactorio al cumplir con las resistencias deseadas. Este diseño se vuelve parte fundamental para determinar el futuro de una estructura o de un rediseño de mezcla que permita cumplir las exigencias requeridas.

Figura 29. **Pila de curado de cilindros de concreto**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Los ensayos para el concreto endurecido se realizaron bajo los procedimientos y normas NTG y ASTM utilizadas, y son los siguientes:

#### **3.6.2.1. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto NTG 41017 h1 (ASTM C-39)**

El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros de concreto endurecido, por medio de una máquina de compresión de accionamiento mecánico, a una velocidad constante hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima aplicada entre el área de la sección transversal del espécimen. Las edades de ensayo son 3, 7 y 28 días. Se ensayaron dos cilindros por edad y se reporta la resistencia del promedio entre ellos. Se utilizaron almohadillas de neopreno para el cabeceo de los cilindros y así lograr una carga distribuida adecuadamente en las superficies.

Figura 30. **Ensayo a compresión de cilindros de concreto**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Los cilindros ensayados en todas las mezclas, exceptuando la mezcla patrón o de control, presentaron coloración oscura al inicio, debido a la presencia de ceniza, sin embargo, esa coloración desaparece luego de unos meses.

Un concreto convencional alcanza su resistencia de diseño a la edad de 28 días, una vez se hayan cumplido todos los requisitos y parámetros indicados en las normas, y que el personal a cargo de los ensayos esté debidamente capacitado para efectuarlos. El incumplimiento en los requisitos mencionados anteriormente puede derivar en resultados insatisfactorios en cuanto a la calidad de un concreto.

### **3.6.2.2. Determinación de carbonatación en concreto endurecido**

El carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es el principal producto químico de la carbonatación. Este reduce la alcalinidad del concreto y crea contracciones, las cuales pueden ser perjudiciales a largo plazo, comprometiendo la vida útil de la estructura.

Los compuestos oxidantes presentes en el cemento junto con la cal libre, presentes después del proceso de hidratación, le dan al concreto un pH aproximado de 12, haciéndolo un material alcalino, teniendo en cuenta que se considera como neutro un pH de 7 y un pH máximo de 14. Un pH alto en el concreto hace que este sea propenso a la estabilización de compuestos ácidos. El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico reacciona con el hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{HO})_2$ , también conocido como portlandita del cemento hidratado. Esta reacción consume la reserva alcalina (reduce el pH) del concreto, lo que favorece la corrosión de las armaduras.

Debido a esto se busca tener un concreto más denso y hermético, con una baja relación A/C para reducir estos efectos, los cuales no se pueden evitar debido a la naturaleza del comportamiento de los ácidos y las bases. El ensayo para determinar la presencia de carbonatación en el concreto consiste en aplicar una cantidad de un indicador de pH líquido, llamado fenolftaleína, a una porción de concreto recién fracturado, en que un color fucsia indica un concreto alcalino (sin carbonatación). Este ensayo es únicamente de apreciación visual y se define en dos resultados: aceptable o no.



Figura 31. **Determinación de carbonatación**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

La mayoría de concretos que están expuestos al ambiente pueden ser afectados por la carbonatación debido al  $\text{CO}_2$ , especialmente los concretos con una alta relación A/C.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. Materiales

Los materiales utilizados en la realización de las mezclas de concreto (cemento, agregado, agua y adiciones), para la presente investigación, cumplen con los parámetros y requisitos de las normas establecidas, por lo que la calidad de los mismos es aceptable para el desarrollo práctico.

### 4.2. Ceniza volante (Norma ASTM C 311, C 618-08a)

Se realizó un análisis químico mediante fluorescencia de rayos X, del cual se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla XIII. **Análisis químico de la ceniza volante**

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de aluminio (III)	18,2
CaO	Óxido de calcio (II)	1,78
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de cromo (III)	0,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de hierro (III)	7,11
K <sub>2</sub> O	Óxido de potasio (I)	1,52
MgO	Óxido de magnesio (II)	0,21
MnO	Óxido de manganeso (II)	0,05
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sodio (I)	0,72
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Óxido de fósforo (V)	0,00
SO <sub>3</sub>	Óxido de azufre (VI)	0,00
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silicio (IV)	64,24
TiO <sub>2</sub>	Óxido de titanio (IV)	0,84
LOI (950 °C)	Perdida por ignición	3,03

Fuente: elaboración propia, según resultados de laboratorio del Centro de I+D/CETEC.

La ceniza volante empleada en las mezclas de concreto realizadas cumple con los requisitos que indica la Norma ASTM C-618-08a según los resultados mostrados en las tablas V y VIII.

### 4.3. Ensayos al concreto fresco

Las mezclas en que se realizó una sustitución de ceniza por cemento tienen la nomenclatura “CEN” seguida por la cantidad en porcentaje de peso que se sustituyó de ceniza respecto del cemento, de la siguiente manera: “CEN. % de ceniza / % de cemento”. Las mezclas en donde se realizó una adición de ceniza volante tienen la nomenclatura “PAT+” seguida del número en porcentaje respecto del peso del cemento en que se adicionó ceniza a una mezcla patrón.

Los resultados de los ensayos al concreto fresco se muestran en la siguiente tabla, en la cual se identifican las siete mezclas realizadas y el punto de comparación denominado “mezcla de control”, a partir del cual se hicieron las diferentes adiciones y sustituciones de ceniza volante.

Tabla XIV. **Ensayos al concreto fresco**

Identificación de mezcla	Temperatura (°C) ASTM C-1064	Revenimiento (cm) ASTM C-143	Peso Unitario (kg/m <sup>3</sup> ) ASTM C-138	Contenido de aire (%) ASTM C-231
CONTROL	21	6,0	2 380	1,6
CEN. 5/95	22	3,8	2 380	1,4
CEN. 10/90	21	3,8	2 390	1,3
CEN. 15/85	22	3,2	2 330	1,6
CEN. 30/70	21	2,5	2 360	1,4
PAT.+5	21,5	2,5	2 370	1,6
PAT.+10	22	2,5	2 360	1,5
PAT.+15	22	2,5	2 360	1,6

Fuente: elaboración propia.

Todas las mezclas se realizaron bajo los mismos procedimientos y con los mismos ensayos de aceptación de concreto fresco. En cada una el cemento se homogenizó con la ceniza previo a ser agregado a la mezcladora, por lo que el material se distribuyó correctamente en toda la masa de concreto fresco.

Los resultados de los ensayos de concreto fresco mostraron similitud notable entre la mezcla de control y las distintas mezclas con variaciones en cuanto a la adición y sustitución de cemento por ceniza. Para tener conocimiento de la influencia de la ceniza dentro del concreto fresco se tiene lo siguiente:

- Revenimiento

En el diseño teórico de mezcla se especifica un revenimiento de 8 cm  $\pm$ 2 cm, por lo tanto es permisible un revenimiento de 6 cm a 10 cm. La mezcla control dio un resultado de 6 cm. Algunas mezclas de concreto que contienen ceniza volante requieren una cantidad menor de agua que un concreto que contenga solamente cemento Portland.

Tabla XV. **Variación de revenimiento por mezcla**

Identificación de mezcla	Revenimiento (cm) ASTM C-143	Variación de revenimiento respecto a mezcla control	
		Absoluta (cm)	en %
CONTROL	6.0	0.00	0.00
CEN. 5/95	3.8	2.2	36.7
CEN. 10/90	3.8	2.2	36.7
CEN. 15/85	3.2	2.8	46.7
CEN. 30/70	2.5	3.5	58.3
PAT.+5	2.5	3.5	58.3
PAT.+10	2.5	3.5	58.3
PAT.+15	2.5	3.5	58.3

Fuente: elaboración propia.

El revenimiento puede tener una variación respecto a la mezcla de control debido a su confinamiento durante el procedimiento de varillado de hasta de un 58,3 %, menor al obtenido con la mezcla de control, sin embargo, esto no afecta la trabajabilidad de la mezcla. La ceniza volante, por su morfología esférica (ver figura 13), se comporta como un lubricante seco, lo que le permite al concreto demandar menos agua que la especificada en el diseño teórico, sin perder la trabajabilidad. Como consecuencia puede presentar un revenimiento menor comparado con la mezcla de control. Esto influye en el aumento de resistencia a la compresión.

Tabla XVI. **Relación de la resistencia a la compresión y cantidad de agua**

Identificación de mezcla	Revenimiento (cm) ASTM C-143	Relacion Agua/Cemento	Variacion de la relacion de Agua/Cemento en %	Resistencia a compresion a 28 días. (PSI)
CONTROL	6.0	0.54	0,00 %	4,350
CEN. 5/95	3.8	0.54	0,00 %	4,370
CEN. 10/90	3.8	0.51	5,55 %	4,490
CEN. 15/85	3.2	0.55	1,85 %	4,160
CEN. 30/70	2.5	0.55	1,85 %	2,910
PAT.+5	2.5	0.51	5,55 %	5,160
PAT.+10	2.5	0.54	0,00 %	5,020
PAT.+15	2.5	0.56	3,70 %	5,200

Fuente: elaboración propia.

- **Temperatura**

Las cenizas volantes y otras puzolanas naturales poseen un calor de hidratación menor que el cemento Portland, como consecuencia su utilización reduce el calor liberado en estructuras de concreto. Algunas puzolanas reducen hasta en un 40 % el calor liberado por los cementos tipo I, esta reducción de

calor es fundamental en estructuras masivas en que el calor de hidratación es fundamental en la calidad del concreto.

La variación de temperatura en las mezclas tuvo un máximo de 1 °C, entre la mezcla de control y las mezclas subsiguientes. Debido a que las masas de concreto en cada mezcla son a escala laboratorio, esta mínima variación se puede considerar irrelevante, ya que el efecto de la ceniza en la temperatura del concreto tiene más influencia en concretos masivos. La temperatura ambiente durante la realización de las mezclas tuvo un promedio de 22 °C.

- **Peso unitario**

Los resultados de este ensayo presentan una variación mínima respecto a la mezcla patrón, se observa una disminución del mismo poco significativa en las mezclas con mayor presencia de ceniza, tanto en adición como en sustitución de cemento. La ceniza tiende a reducir vacíos de aire, por lo tanto puede aumentar el peso del concreto haciéndolo más denso. La sustitución o adición de ceniza debe tener un punto de equilibrio, ya que un exceso de la misma podría perjudicar el concreto.

- **Contenido de aire**

El uso de ceniza volante en el concreto tiene un efecto reductor del contenido de aire, debido a que por su tamaño ocupa gran cantidad de vacíos en la mezcla de concreto, si bien en los resultados la variación no es significativa. Para masas de concreto de mayor volumen se recomienda utilizar aditivo incorporador de aire, si las especificaciones del concreto así lo requieren.

### 4.3.1. Tiempo de fraguado

“El grado de retardo depende de factores como la cantidad de cemento Portland, la demanda de agua, el tipo, la reactividad y la dosis de escoria o puzolana y la temperatura del concreto”<sup>4</sup>. La presencia de ceniza volante, ya sea en sustitución del cemento o en adición a la mezcla, provoca un retardo en el tiempo de fraguado. Este tiempo tendrá una variación dependiendo de la cantidad de ceniza que se desee utilizar. Para determinar este efecto de retardo en las mezclas de concreto se realizó el ensayo de tiempo de fraguado o velocidad de endurecimiento en las mezclas que mostraron un mejor desempeño en estado fresco y endurecido, tanto en adición como en sustitución, comparadas con la mezcla patrón.

Tabla XVII. **Determinación de tiempo de fraguado**

Identificación de mezcla	Tiempo de fraguado inicial	Tiempo de fraguado final
CONTROL	5 horas 37 minutos	7 horas 30 minutos
CEN. 10/90	7 horas 51 minutos	10 horas 52 minutos
PAT.+15	7 horas 51 minutos	11 horas 40 minutos

Fuente: elaboración propia.

Los compuestos del cemento Portland, como el silicato tricálcico ( $C_3S$ ), que al hidratarse forma el hidróxido cálcico ( $CaO \cdot H_2O$ ) o cal libre, junto con el aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) hidratado, son los responsables del inicio del fraguado y resistencia temprana del concreto.

---

<sup>4</sup>KOSMATKA, Steven; et al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. P. 85.

Durante las primeras horas desde que el agua tiene contacto con el cemento, la ceniza compite con el aluminato tricálcico para obtener el hidróxido cálcico, es decir que la ceniza resta la reacción del aluminato con el hidróxido de calcio encargados del fraguado temprano, por lo tanto, provoca el retardo. Este aluminato tendrá una mejor reacción con el sulfato de calcio y el yeso, esto como consecuencia brindará un concreto más inerte con menos compuestos reactivos a los agentes externos, es decir, más resistente a los sulfatos. La demanda de agua también se ve disminuida debido a que se necesita menos de esta, porque la reacción de aluminato con el hidróxido de calcio es menor.

#### **4.4. Ensayos al concreto endurecido**

Después del proceso de hidratación y fraguado, el concreto comienza a ganar resistencia una vez que la red cristalina que lo conforma se estabiliza. En los primeros días es considerablemente notable su comportamiento en cuanto a las propiedades de resistencia, impermeabilidad y durabilidad. Usualmente un concreto convencional alcanza la resistencia de diseño a los 28 días de elaborado, solo si ha cumplido con los requerimientos establecidos en las normas, luego de eso continuará ganando resistencia de una forma más lenta en el tiempo. Otras edades propuestas son 56 y 90 días; a estas edades el concreto gana resistencia aproximadamente de 10 % a 15 % mayor que la resistencia a los 28 días.

Las puzolanas, como la ceniza volante, contribuyen para un aumento significativo de la resistencia del concreto, sin embargo, la resistencia con estos materiales puede tener una variación mayor o menor comparada con una mezcla que solo contenga cemento Portland. Eso es influenciado principalmente por el tipo de ceniza volante, las propiedades y clasificación que esta posea, asimismo, la cantidad adicionada y de sustitución no debe



excederse, ya que esto puede reducir el hidróxido de calcio liberado en la hidratación  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , también llamada portlandita, lo que se traduce en una baja resistencia del concreto.

Algunos concretos con cenizas volantes requieren de 28 a 90 días para sobrepasar la resistencia comparada con una mezcla de control, dependiendo de las proporciones de la mezcla, esto debido a que las reacciones puzolánicas de algunos materiales son más lentas. Un concreto con ceniza volante tipo C desarrollará una resistencia a una edad temprana mayor que un concreto con una ceniza tipo F, la cual tiene un menor índice de reactividad.


Las puzolanas, como la ceniza volante, se aprovechan frecuentemente en la elaboración de concreto masivo, ya que estas estructuras no se ponen en servicio inmediatamente y su desarrollo lento de resistencia temprana es una ventaja, ya que proporciona más tiempo para la colocación y acabado del concreto. Con los debidos ajustes y controles de calidad se pueden utilizar todas las clases de cenizas, una vez cumplan con los requisitos de normas para su uso en concreto.

#### **4.4.1. Resistencia a la compresión**

Para determinar el efecto de la ceniza volante en mezclas de concreto se realizaron ensayos a compresión de cilindros, a edades de 3, 7 y 28 días, en distintos porcentajes de sustitución y adición de ceniza comparados con una mezcla de control. Las variaciones de resistencia para cada mezcla se muestran a continuación:

Tabla XVIII. **Resistencia a la compresión**

Identificación de mezcla	Resistencia de mezcla por edad en lb/pulg <sup>2</sup> (PSI)			% de Variación de la resistencia respecto a la mezcla de control a 28 días
	3 días	7 días	28 días	
CONTROL	1 730	2 500	4 350	0
CEN. 5/95	2 070	2 880	4 370	1
CEN. 10/90	2 170	2 870	4 490	3
CEN. 15/85	1 840	2 580	4 160	-5
CEN. 30/70	1 270	1 710	2 910	-34
PAT.+5	2 960	3 870	5 160	18
PAT.+10	2 580	3 510	5 020	15
PAT.+15	2 510	3 340	5 200	19

 Mezclas que sobrepasaron la mezcla control a la edad de 28 días.

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XVI, en la quinta columna: “variación de la resistencia respecto a la mezcla de control”, se aprecia el porcentaje en que cada mezcla de adición y sustitución supera o decrece respecto a la resistencia esperada de la mezcla patrón.

A partir de estos resultados se define con claridad el beneficio en cuanto al aumento de resistencia a tempranas edades del uso de ceniza volante en el concreto. La adición de ceniza a una mezcla patrón tiene un mejor desempeño que las mezclas en donde se sustituyó ceniza por cemento Portland.

En las mezclas de sustitución CEN. 15/85 y CEN. 30/70, la resistencia disminuyó en un 5 % y 34 %, respectivamente, es decir que para obtener un balance no debe excederse en un 15 % la sustitución de ceniza por cemento Portland. Cabe mencionar que es posible que la ceniza, debido a su clasificación, tenga un retardo en alcanzar la resistencia de diseño de hasta 90 días, por lo que los resultados finales pueden ser discutibles, en especial para la mezcla CEN 15/85, que tuvo un comportamiento inicial a 3 y 7 días, similar a la mezcla de control, sin embargo, aunque a 28 días no superó la resistencia esperada, está muy próxima a esta. Para el caso del presente estudio se hace el análisis para edades tempranas o un concreto convencional.

Las mezclas de sustitución CEN. 5/95 y CEN. 10/95, cumplen satisfactoriamente con el desempeño requerido desde el inicio, superando en un índice del 1 % y 3 % a la mezcla de control a 28 días, esto significa que se tuvo un ahorro de cemento de entre un 5 % a 10 %, sin afectar las propiedades requeridas en el diseño de mezcla. Es posible obtener el balance de ceniza para sustituir el cemento mediante mezclas de prueba, asimismo estos resultados positivos pueden mejorar a través del tiempo como suele ocurrir con las cenizas tipo F.

Las mezclas en las que se utilizó la ceniza como adición tuvieron un desempeño mejor de lo esperado, elevando la resistencia del concreto, aumentándola hasta 850 lb/pulg<sup>2</sup> sobre la mezcla de control. La mezcla PAT.+15 tuvo un aumento de 19 %, esto significa que es posible obtener mejores resistencias al utilizar ceniza volante tipo F, lo cual, para fines estructurales, es beneficioso para un desencofrado rápido, debido a que el comportamiento a 3 y 7 días superó significativamente a la mezcla patrón.

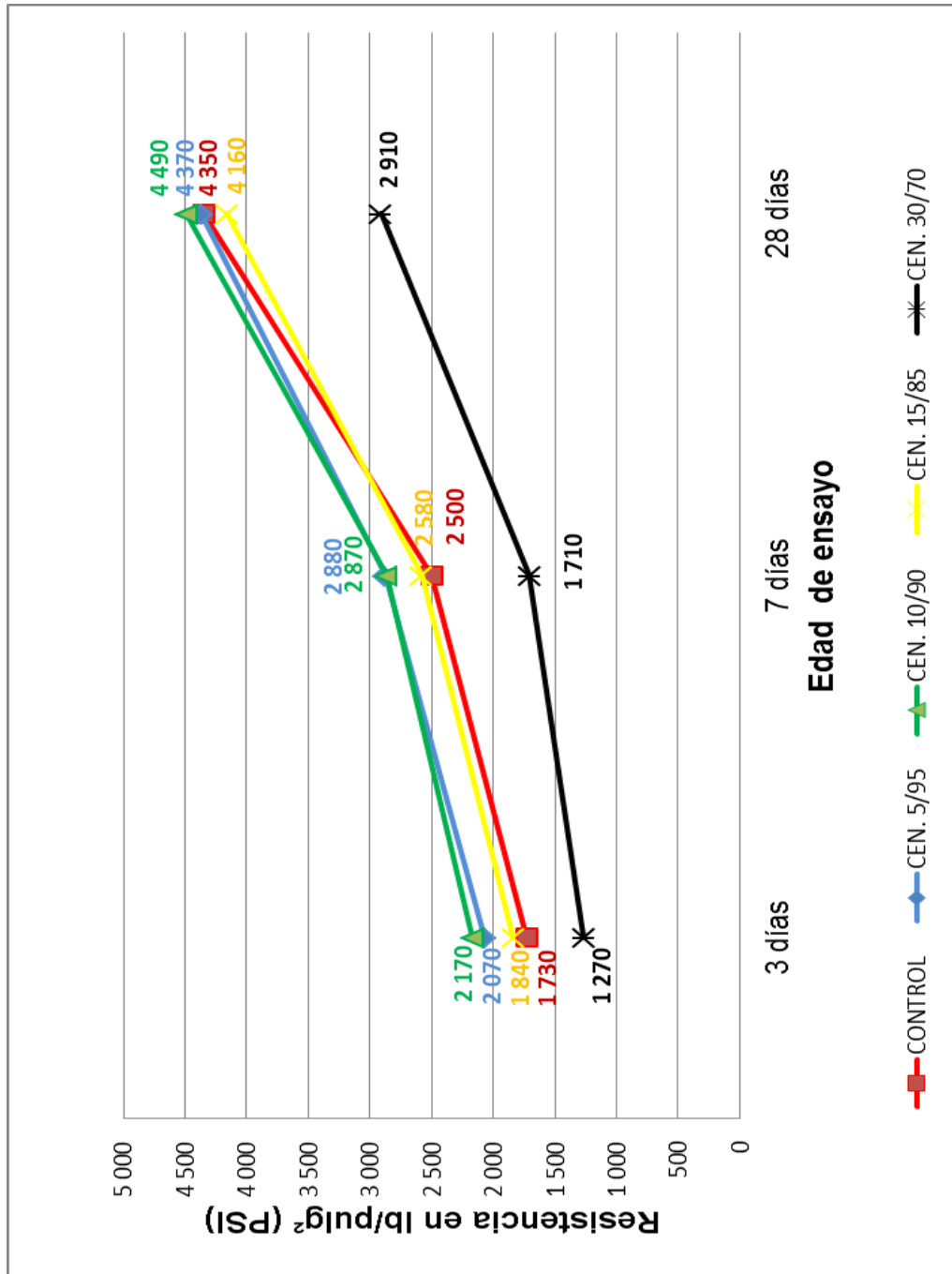
Figura 32. **Ensayo a compresión de cilindro de concreto**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

En la figura 32 se observa el momento en que ocurre la falla por compresión de uno de los especímenes ensayados. El comportamiento durante el ensayo es igual a especímenes de concreto convencional. En la figura se observa que la probeta presenta una falla por corte.

Figura 33. Resistencia a compresión de mezclas con sustitución de cemento por ceniza



Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Resistencia a compresión de mezclas con adición de ceniza



Fuente: elaboración propia.

Los especímenes de ensayo mostraron un comportamiento normal, es decir que no se observó ningún fenómeno que pudiese influir en su resistencia, como la aparición de fisuras por contracción plástica, desde y durante su proceso de curado hasta el día del ensayo. Muestran un color oscuro debido a la presencia de ceniza, sin embargo, este tiende a desaparecer cuando el concreto es expuesto al aire después de unos días.

#### **4.4.1.1. Influencia de la ceniza volante en la resistencia del concreto**

Los resultados de los ensayos a compresión de concreto con ceniza como sustituto de cemento y como adición, muestran que es factible la utilización de esta puzolana. Para entender cómo sucede este aumento de resistencia en ciertas dosificaciones es necesario conocer la reacción que provoca la ceniza a nivel químico y físico en el concreto.

##### **4.4.1.1.1. Reacciones químicas**

A nivel químico, la pasta de cemento es el resultado de la reacción del cemento con el agua, la cual produce compuestos de hidratación; estos finalmente se transforman en una masa firme y dura. Los silicatos presentes en el cemento son los principales activos aglutinantes del mismo, siendo estos el silicato tricálcico ( $C_3S$ ) y silicato bicálcico ( $C_2S$ ), siendo el  $C_3S$  el que se hidrata y endurece rápidamente y es responsable del inicio del fraguado y la resistencia temprana, mientras el  $C_2S$  tiene una velocidad de hidratación menor, pero contribuye para el aumento de la resistencia después de los 7 días.

En su fase de hidratada, el  $C_3S$  es conocido como alita, mientras el  $C_2S$  tiene el nombre de velita. De las reacciones de estos dos compuestos se

obtiene el hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o portlandita, con una estructura cristalina. Entre más compacta sea esta estructura tendrá mejores propiedades mecánicas.

La ceniza volante contiene óxido de silicio y óxido de aluminio (ver tabla XIII), estos reaccionan con la portlandita proveniente de la hidratación de los silicatos ( $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$ ). Esta reacción, por lo general, es más lenta y da lugar a una nueva formación de compuestos estables y químicamente inertes, con características cementantes llamados silicatos de calcio hidratado, debido a que la ceniza reacciona también con el óxido de calcio y forma enlaces con el óxido de silicio para mejorar las propiedades mecánicas del concreto.

Por otra parte está el aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ), otro compuesto del cemento encargado de la liberación de calor de hidratación durante los primeros días y de contribuir también en un porcentaje mínimo en la resistencia a temprana edad. Este aluminato ofrece poca resistencia al ataque de sulfatos, sin embargo, se ve disminuido al sustituir cemento por ceniza en las mezclas. Esto es beneficioso, ya que los concretos con bajos porcentajes de  $\text{C}_3\text{A}$  resisten mejor a los ambientes con sulfatos. Es por eso que la ceniza volante es utilizada con frecuencia en concretos masivos, ya que al reducir el  $\text{C}_3\text{A}$  también disminuye el calor de hidratación y aumenta la resistencia ante agentes externos.

Se debe tomar en cuenta que en la adición de ceniza a una mezcla de concreto, esta no debe excederse, ya que las reacciones no serían completas, lo que dejaría demasiada ceniza sin interactuar con los compuestos del cemento, lo cual desencadenaría baja resistencia y una estructura porosa en el concreto. Cabe destacar que el aluminato tricálcico que provoca el calor de hidratación no puede estar ausente del todo en el concreto, porque es



necesario este calor, ya que es una fuente de energía para acelerar las reacciones de los silicatos, además, este aluminato tricálcico, junto con el sulfato de calcio  $\text{CaSO}_4$  (yeso), evita la contracción volumétrica del concreto.

En resumen, la reacción de los componentes de la ceniza con el cemento hidratado es una reacción lenta, al contrario que la reacción solamente de hidratación del cemento, la cual es más rápida, por tanto, la velocidad de liberación del calor y el desarrollo de resistencias serán procesos más lentos, pero estos retardos se ven compensados con las altas resistencias desarrolladas por el concreto adicionado con ceniza en el futuro.

#### **4.4.1.1.2. Reacciones físicas**

A nivel físico, la finura y la forma de la ceniza son las que definen su capacidad de reacción. Mientras más fina sea la ceniza su reactividad es mayor. La morfología de la ceniza de carácter esférico le otorga una mejor trabajabilidad al concreto, al actuar como lubricante, lo que disminuye la demanda de agua sin dejar de ser trabajable. Esto aumenta considerablemente la resistencia.

La siguiente etapa ocurre en un tiempo posterior, cuando los productos de reacción rellenan de forma muy eficiente los espacios capilares que quedan después de la hidratación de los componentes del cemento, directamente en la pasta cementante, así como en las interfaces agregado-pasta. Al insertarse en los vacíos o poros el concreto se vuelve más denso y menos permeable, lo que además de mejorar la resistencia mecánica, también vuelve al concreto más resistente al ataque de agentes agresivos, como los sulfatos. Esta acción refuerza la reacción química que reduce la actividad de elementos como el aluminato tricálcico y, por lo tanto, genera durabilidad en el concreto.

#### 4.4.2. Carbonatación

Debido a que la ceniza volante en el concreto, en cantidades prudentes, le brinda un mayor margen de protección contra los agentes externos, se realizó la prueba de carbonatación en especímenes que fueron almacenados después ser ensayados a compresión sin llevarlos a una destrucción total.

Figura 35. **Prueba de color de fenolftaleína**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

La prueba de color de fenolftaleína en superficies recién fracturadas de los especímenes reveló un concreto alcalino después de 300 días de realizada la mezcla. La carbonatación es la reacción química del hidróxido de calcio o cal libre con el dióxido de carbono presente en el ambiente, en que el dióxido de carbono toma calcio de la cal libre para formar el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). La reacción lenta que tiene la puzolana con el hidróxido de calcio evita una carbonatación prematura.



## CONCLUSIONES

1. El uso de ceniza volante de carbón mineral en mezclas de concreto brinda beneficios, tanto en adición como en sustitución de cemento, al mejorar las propiedades mecánicas de este, solamente si dicha ceniza cumple con los requisitos de la Norma ASTM C 618-08a, y si es adecuadamente dosificada en cantidades controladas y utilizando agregados que cumplan las especificaciones requeridas en las normas respectivas.
2. Los resultados de los ensayos en concreto fresco demuestran que la variación de estos respecto a un concreto sin ceniza volante tiene un comportamiento similar, esto significa que la ceniza no altera las propiedades del concreto en estado fresco. Cabe mencionar que la utilización de ceniza reduce la cantidad de agua demandada por la mezcla, sin perder la trabajabilidad, lo cual influye positivamente en la resistencia a compresión.
3. Los ensayos de determinación de tiempo de fraguado demuestran que el uso de ceniza retrasa la velocidad de endurecimiento del concreto, debido a que la reacción de los componentes de esta, con el aluminato tricálcico presente en el cemento durante la hidratación, ocurren de una manera más lenta en comparación con una mezcla únicamente con cemento Portland. Un tiempo de fraguado más lento es beneficioso en colocación de concreto masivo, por lo que la ceniza resulta una opción favorable para este propósito.

4. Los ensayos a compresión de concreto con sustitución de porcentajes en peso de ceniza volante por cemento Portland, demuestran que es factible sustituir cemento, hasta en un 10 %, superando levemente la resistencia deseada a los 28 días. Por lo tanto, se puede obtener un concreto relativamente más económico sin afectar la resistencia a la compresión del mismo, esto significa un ahorro considerable si se aplica a grandes volúmenes de colocación. Un exceso de ceniza de más del 15 % puede resultar perjudicial en el concreto.
  
5. Los ensayos a compresión de concreto con adición de ceniza volante respecto al peso del cemento, de hasta un 15 %, demuestran que la resistencia mecánica del concreto se ve ampliamente mejorada respecto a mezclas con únicamente cemento Portland. Este comportamiento se mantuvo en cada una de las tres edades de ensayo, llegando a aumentar la resistencia hasta en un 19 % respecto a lo esperado. El uso de ceniza como adición representa una opción comprobada para mejorar el desempeño del concreto a tempranas edades y en edades más allá de los 90 días, para su uso estructural.
  
6. Debido a las reacciones químicas de los compuestos formados en la hidratación del cemento, con el silicio y aluminio de la ceniza se producen enlaces y nuevos compuestos estables y con propiedades cementantes, esto, como consecuencia, tiene un aumento significativo en la resistencia mecánica del concreto, especialmente en las mezclas con adición. Asimismo, la morfología y finura de ceniza es capaz de llenar los vacíos en el concreto, densificándolo y aportando además de resistencia mecánica, resistencia a los agentes externos a los que pueda verse expuesto, como los sulfatos en el ambiente.

7. Al realizar las pruebas de carbonatación después de ensayar a compresión los especímenes de concreto, se puede apreciar que no existe carbonatación a tempranas edades, debido a que la cantidad de poros en el concreto es reducida por la presencia de ceniza.
8. La carbonatación del concreto ocurre cuando el dióxido de carbono en el ambiente penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos de calcio. Esta reacción baja la alcalinidad del concreto y, por lo tanto, puede dañar el refuerzo permitiendo la corrosión en la armadura. Se realizó prueba de carbonatación a especímenes almacenados después del ensayo a compresión y de 300 días de elaboración, dando como resultado un concreto alcalino, lo que quiere decir que la ceniza no tiene un efecto negativo a edades avanzadas sobre el concreto, y no da lugar a carbonatación.
9. Un exceso en la dosificación de ceniza como sustitución respecto al cemento, reduce la resistencia esperada a edades tempranas, debido a que el equilibrio entre las reacciones químicas se rompe. Esto da lugar a un concreto poroso y de resistencia baja. Por otra parte, un exceso en la dosificación de ceniza como adición produce un desbalance de reacciones, dejando demasiada ceniza sin poder reaccionar con los componentes del cemento, y esto se traduce en una baja resistencia.
10. La apariencia del concreto con ceniza es más oscura que la de un concreto convencional, esto debido a la coloración de la ceniza. Esta coloración disminuye a través del tiempo para dar paso al color del concreto tradicional, sin afectar su desempeño, además su uso estará contribuyendo a la disminución de la contaminación ambiental.



## RECOMENDACIONES

1. Antes de considerar el uso de la ceniza volante de carbón mineral en mezclas de concreto, esta debe ser analizada química y físicamente, para determinar si cumple con los requerimientos que exigen las normas para su clasificación y su uso en el concreto fresco.
2. Realizar análisis periódicos de la ceniza volante para asegurarse que mantenga los requerimientos de norma, especialmente cuando en la planta termoeléctrica exista algún cambio en los procedimientos de generación de energía, como variaciones de temperatura de combustión o cambios dentro del sistema de recolección de ceniza, y cada vez que el tipo de carbón a utilizar en la combustión tenga un origen geológico diferente del habitual. Estos análisis serán de utilidad para determinar si la calidad de la ceniza es constante.
3. No utilizar la ceniza volante como sustitución o adición de cemento en el concreto, sin previa realización de mezclas de prueba, esto con la finalidad de evaluar el comportamiento de la misma en el concreto, específicamente la reacción con el cemento y agregados.
4. Para una ceniza volante tipo F, no exceder en adición al concreto más del 15 %, ya que el exceso de este material en la mezcla quedaría sin reaccionar con el cemento, y esto podría resultar en un concreto con baja resistencia mecánica y alta porosidad.



5. La sustitución de ceniza volante por cemento en mezclas de concreto no debe superar el 10 % de ceniza sobre cemento en peso, debido a que al tener un excedente de esta, la cantidad de cemento se hace insuficiente para reaccionar con ceniza, lo que provocaría un mayor retardo en el tiempo de fraguado y una baja resistencia mecánica en el concreto endurecido.
6. Considerar un estudio de ceniza volante en mezclas de concreto que exceda de los 90 días para su ensayo a compresión, y determinar si la misma es capaz de brindar una resistencia significativamente mayor comparada con una mezcla de control a edades avanzadas. Asimismo, realizar ensayos de exposición con agentes agresivos o sulfatos, para determinar si es capaz de resistir ataques químicos prolongados.
7. Según los resultados, la ceniza volante en el concreto es capaz de densificarlo y, por lo tanto, de protegerlo de ataques químicos y carbonatación, lo que supone una protección de la corrosión al acero de refuerzo. Debe considerarse ensayos de adherencia de concreto con acero para edades avanzadas y determinar si los componentes de la ceniza tienen un efecto nocivo en la adherencia del concreto.
8. Utilizar la ceniza volante junto con materiales que cumplan las normas y requerimientos, bajo la supervisión de personal calificado para realizar las dosificaciones máximas permitidas, así como para ejecutar correctos ensayos a concreto fresco y endurecido y hacer un adecuado curado y manipulación de los especímenes de ensayo, para obtener un registro fiel del comportamiento de un concreto con ceniza volante.

## BIBLIOGRAFIA

1. ÁLVAREZ GUILLÉN, Julio Cesar. *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2017. 110 p.
2. American Concrete Institute. *Proporcionamiento de mezclas. Concreto normal, pesado y masivo*. EE.UU: Comité ACI 211.1, 2004. 56 p.
3. American Concrete Institute. *Use of fly ash in concrete*. EE.UU: ACI Committee 232.2R-03, 2003. 41 p.
4. ARGUIZ C. et al. *Efecto de la adición de mezclas de ceniza volante y ceniza de fondo procedentes del carbón en la resistencia mecánica y porosidad de cementos portland*. España: Materiales de construcción, Vol. 63, 309, 49-64, 2013. 15 p.
5. ASTM C311 / C311M-16. *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. EE.UU: ASTM International, 2016. 34 p.
6. ASTM C595-07. *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*. EE.UU: ASTM International, 2007. 7 p.

7. ASTM C618-08a. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*. EE.UU: ASTM International. 3 p.
8. BONAVETTI, V. L.; RAHHAL, V. F. *Interacción de adiciones minerales en pastas de cemento*. Revista de la Construcción, 2006. [en línea] <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127619380004>. [Fecha de consulta: 9 de mayo de 2017].
9. CHAKRABORTY, Arun Kumar. *High Volume Fly Ash Concrete for use in structural applications*. India: Bengal Engineering and Science University, Department of Civil Engineering, 2005. 25 p.
10. Comisión Guatemalteca de Normas. NTG-41007 (ASTM C-33). *Agregados para concreto. Especificaciones*. Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, 2010. 24 p.
11. \_\_\_\_\_. NTG-41017 h1 (ASTM C-39). *Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, s/f. 15 p.
12. \_\_\_\_\_. NTG-41017 h5 (ASTM C-138). *Método de ensayo. Determinación de la densidad aparente (masa unitaria) rendimiento (volumen de concreto producido) y contenido de aire (gravimétrico) del concreto*. Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, s/f. 9 p.

13. \_\_\_\_\_. NTG-41017 h7 (ASTM C-231). *Método de ensayo. Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión.* Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, s/f. 21 p.
14. \_\_\_\_\_. NTG-41017 h12 (ASTM C-403). *Método de ensayo. Determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto por su resistencia a la penetración.* Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, 2013. 18 p.
15. \_\_\_\_\_. NTG-41052 (ASTM C-143). *Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.* Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, s/f. 9 p.
16. \_\_\_\_\_. NTG-41053 (ASTM C-1064). *Método de ensayo. Medición de temperatura del concreto hidráulico recién mezclado.* Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, s/f. 5 p.
17. \_\_\_\_\_. NTG-41061 (ASTM C-31). *Práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra.* Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, s/f. 14 p.
18. \_\_\_\_\_. NTG-41068 (ASTM C-94). *Concreto premezclado. Especificaciones.* Guatemala: COGUANOR, Ministerio de Economía, s/f. 29 p.
19. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Informe estadístico de mercado, 2014.* Guatemala: CNEE, 2004. 91 p.


20. JIMÉNEZ, S. *Combustión de carbón*. España: Laboratorio de investigación en tecnologías de la combustión LITEC, 2012. 7 p.
21. JUÁREZ QUEVEDO, Belcky María de Los Ángeles. *La utilización de la cáscara de arroz bajo el proceso de calcinación controlada como puzolana artificial en el diseño de morteros para acabados*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 96 p.
22. KOSMATKA, Steven H.; et al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. EE. UU: Portland Cement Association, 2004. 456 p.
23. LONDOÑO GIRALDO, Carlos Arturo. *Combustión de carbón*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Procesos y Energías, 2002. 220 p.
24. MARTÍNEZ ROSALES, Edgar Jacob. *Evaluación de la ceniza volante producida por la combustión de carbón, en la planta generadora San José powerstation para utilizarse como puzolana artificial*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 52 p.
25. NEVILLE, Adam; BROOKS, J.J. *Tecnología del concreto*. México: Trillas, 1998. 329 p.
26. Norma Española. UNE-EN 450-1:2006+A1. *Cenizas volantes para hormigón*. España: Comité técnico AEN/CTN 83 Hormigón, 2008. 34 p.

27. OSSA M., Mauricio; JORQUERA S., Héctor. *Cementos con cenizas volantes*. Chile: Universidad de Chile, 1984. 17 p.




# ANEXOS

## Anexo 1. Informe del análisis completo de agregado fino



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



---

**ANÁLISIS COMPLETO DE AGREGADO FINO PARA CONCRETO**  
NORMA NTG 41007 h1 (ASTM C-33) **No. 08140**

O.T. No. 36241 INFORME SACM- 280  
HOJA 1/1

**INTERESADO:** Eder Ivan Cano Salazar, Carné: 200010911

**PROYECTO:** Trabajo de graduación "Ceniza volante de carbón mineral para adición de mezclas en concreto".

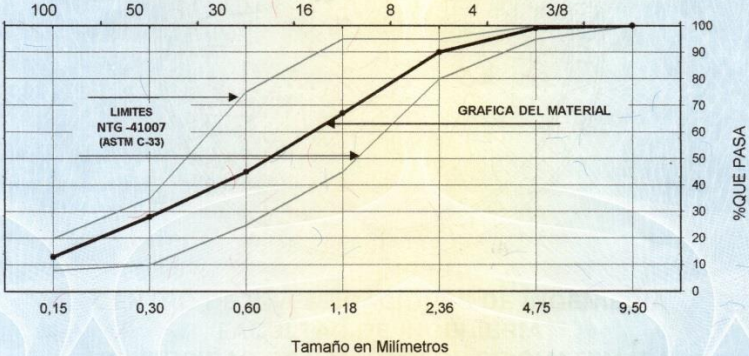
**DIRECCIÓN:** Ciudad.

**FECHA:** 15 de julio de 2016

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS:**

Densidad Relativa (sss)	2,56	Porcentaje de Absorción (%)	0,70
Densidad (sss) (kg/m <sup>3</sup> )	2 550,00	Contenido de Materia Orgánica	1
Masa Unitaria, Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1810,00	Pasa Tamiz # 200 (%)	5,30
Masa Unitaria, Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	1700,00	Retenido Tamiz 6,35 (%)	0,00
Porcentaje de Vacíos, Compactado (%)	29,00	Modulo de Finura	2,58
Porcentaje de Vacíos, Suelto (%)	34,00		




Tamiz No.	9,50	4,75	2,36	1,18	0,60	0,30	0,15
% Que pasa	100,00	99,00	90,00	67,00	45,00	28,00	13,00

**OBSERVACIONES:**

- Muestra proporcionada por el interesado.
- Tamiz # 200, procedimiento A, lavado con agua corriente.
- Contenido de materia orgánica máximo permisible No. 3

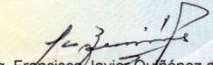
El presente informe representa únicamente las muestras identificadas en el mismo. Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

**ATENTAMENTE,**

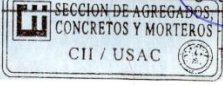


Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo.



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
Director CII/USAC



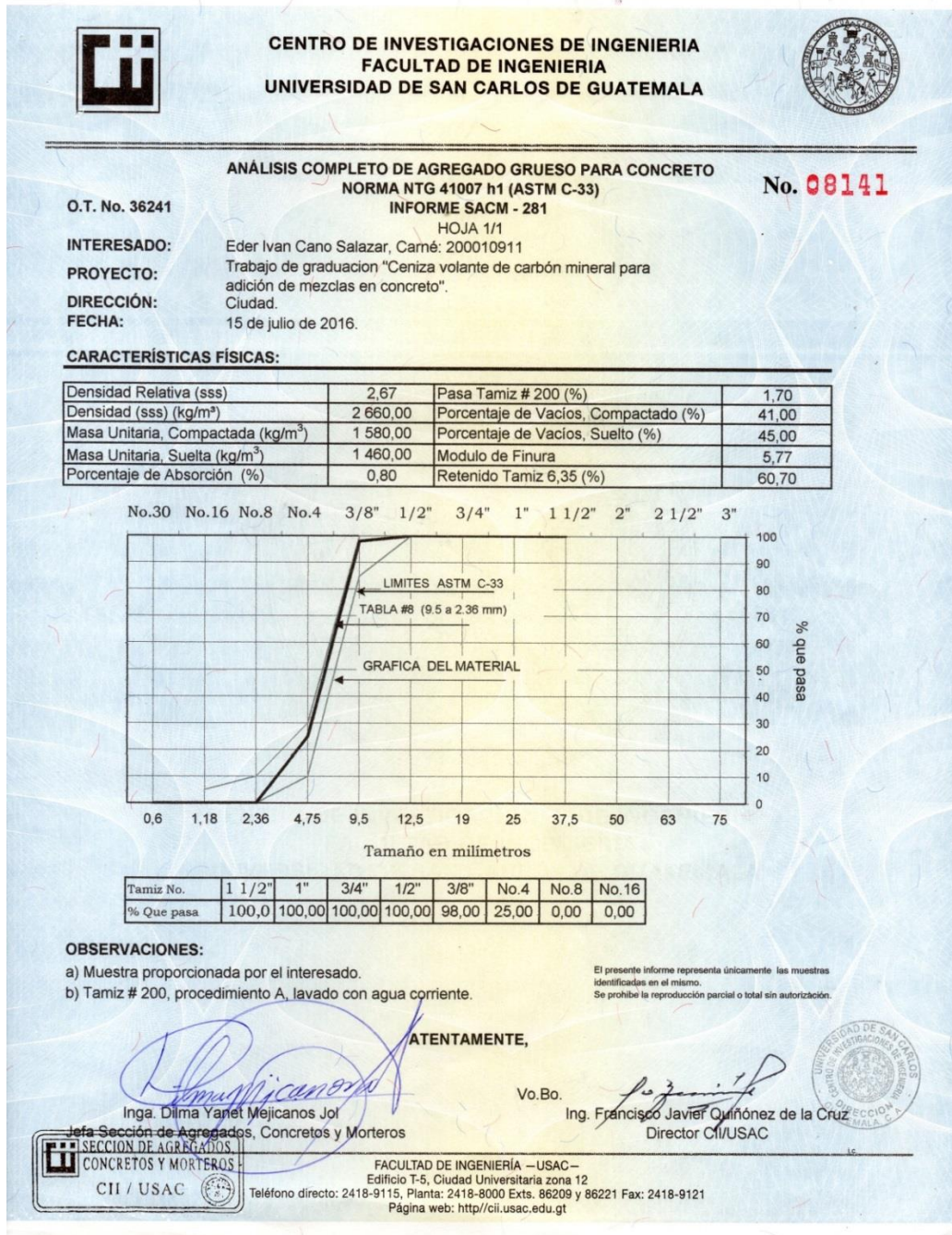
SECCIÓN DE AGREGADOS,  
CONCRETOS Y MORTEROS  
CII / USAC

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.



## Anexo 2. Informe del análisis completo de agregado grueso



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

### Anexo 3. Informe del diseño práctico de mezcla patrón



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



---

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO**  
NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39)  
INFORME SACM - 549  
HOJA 1/1

**No. 08485**

O.T. No. 36242

**INTERESADO:** Eder Ivan Cano Salazar Carne: 200010911

**PROYECTO:** Trabajo de graduacion "Ceniza volante de carbón mineral para adición en mezclas de concreto"

**DIRECCIÓN:** Ciudad.

**EMISION DE INFORME:** 23 de noviembre de 2016

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD en días	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA ESTRUCTURA	PESO en kg	DIÁMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/pig	TIPO DE FRACTURA
Patron 1	22-9	22/07/2016	25/07/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	12,920	15,125	30,367	46 000	11,40	1 650	B
Patron 2	23-9	22/07/2016	25/07/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	12,940	15,110	30,377	50 000	12,40	1 800	B
Patron 3	24-9	22/07/2016	29/07/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	13,010	15,175	30,353	72 500	17,80	2 580	B
Patron 4	25-9	22/07/2016	29/07/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	13,000	15,175	30,417	67 500	16,60	2 410	B
Patron 5	26-9	22/07/2016	19/08/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	12,980	15,100	30,300	120 000	29,80	4 320	B
Patron 6	27-9	22/07/2016	19/08/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	13,000	15,160	30,313	122 500	30,20	4 380	B

**OBSERVACIONES :**

- Diseño de mezcla bajo condiciones de laboratorio.
- Muestras ensayadas en maquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300,000 lbs.
- Dial utilizado para lectura de cargas: 300,000 lbs.
- Cilindros cabeceados según norma ASTM C-1231.
- Asentamiento de mezcla: 6 cm. ( 2,4" )
- Peso unitario: 2 380 Kg/m<sup>3</sup>.
- Contenido de aire: 1,6%.
- Temperatura: 21 °C.
- Proporción utilizada para concreto de 4000 PSI: 1 : 2,02 : 2,194 : 0,51

**BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA**



A. CONO



B. CONO Y CLIVAJE



C. CONO Y RUPTURA



D. CORTE



E. COLUMNAR

El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

**ATENAMENTE,**



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

Vo.Bo.



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
Director CII/USAC




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




Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 4. Informe del diseño práctico de mezcla con 30 % de sustitución de ceniza por cemento



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



---

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO**  
NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39) **No. 08486**

O.T. No. 36242 INFORME SACM - 550

HOJA 1/1

**INTERESADO:** Eder Ivan Cano Salazar Carne: 200010911

**PROYECTO:** Trabajo de graduación "Ceniza volante de carbón mineral para adición en mezclas de concreto"

**DIRECCIÓN:** Ciudad.

**EMISION DE INFORME:** 23 de noviembre de 2016

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE COLOCACION	FECHA DE RUPTURA	EDAD en dias	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA ESTRUCTURA	PESO en kg	DIÁMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/in <sup>2</sup>	TIPO DE FRACTURA
CEN.30/70	28-9	01/08/2016	04/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	12,710	15,170	30,190	35 000	8,60	1 250	B
CEN.30/70	29-9	01/08/2016	04/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	12,730	15,150	30,203	36 000	8,90	1 290	B
CEN.30/70	30-9	01/08/2016	08/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	12,660	15,135	30,100	45 000	11,10	1 610	B
CEN.30/70	31-9	01/08/2016	08/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	12,700	15,110	30,200	50 000	12,40	1 800	B
CEN.30/70	32-9	01/08/2016	29/08/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	12,690	15,125	30,137	78 000	19,30	2 800	B
CEN.30/70	33-9	01/08/2016	29/08/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	12,760	15,200	30,323	85 000	20,80	3 020	B

**OBSERVACIONES :**

a) Diseño de mezcla bajo condiciones de laboratorio.

b) Muestras ensayadas en maquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300,000 lbs.

c) Dial utilizado para lectura de cargas: 300,000 lbs.

d) Cilindros cabeceados según norma ASTM C-1231.

e) Asentamiento de mezcla: 2,5 cm. ( 1" )


f) Peso unitario: 2 360 Kg/m<sup>3</sup>.

g) Contenido de aire: 1,4 %.

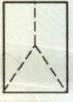
h) Temperatura: 21 °C.

i) Proporción utilizada para concreto de 4000 PSI: 1 : 2,02 : 2,194 : 0,55


**BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA**




A. CONO




B. CONO Y CLIVAJE



C. CONO Y RUPTURA



D. CORTE



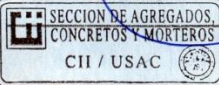
E. COLUMNAR

El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

**ATENTAMENTE,**

*[Firma]*  
Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo. *[Firma]*  
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
Director CII/USAC




SECCION DE AGREGADOS,  
CONCRETOS Y MORTEROS  
CII / USAC

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 5. Informe del diseño práctico de mezcla con 15 % de sustitución de ceniza por cemento



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



---

O.T. No. 36483

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO**  
NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39)  
INFORME SACM - 556  
HOJA 1/1

**No. 08492**

**INTERESADO:** Eder Ivan Cano Salazar Carne: 200010911

**PROYECTO:** Trabajo de graduación "Ceniza volante de carbón mineral para adición en mezclas de concreto"

**DIRECCIÓN:** Ciudad.

**EMISION DE INFORME:** 23 de noviembre de 2016

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD en días	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA ESTRUCTURA	PESO en kg	DIÁMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/in <sup>2</sup>	TIPO DE FRACTURA
CEN.15/85	59-9	17/08/2016	20/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	12,790	15,250	30,133	54 000	13,10	1 900	B
CEN.15/85	60-9	17/08/2016	20/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	12,690	15,200	30,077	50 000	12,30	1 780	B
CEN.15/85	61-9	17/08/2016	24/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	12,940	15,215	30,373	70 000	17,10	2 480	B
CEN.15/85	62-9	17/08/2016	24/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	12,840	15,140	30,150	75 000	18,50	2 680	B
CEN.15/85	63-9	17/08/2016	14/09/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	12,890	15,180	30,317	118 000	29,00	4 210	B
CEN.15/85	64-9	17/08/2016	14/09/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	12,810	15,175	30,200	115 000	28,30	4 110	B

**OBSERVACIONES :**

a) Diseño de mezcla bajo condiciones de laboratorio.

b) Muestras ensayadas en maquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300,000 lbs.

c) Dial utilizado para lectura de cargas: 300,000 lbs.

d) Cilindros cabeceados según norma ASTM C-1231.

e) Asentamiento de mezcla: 3,18 cm. ( 1 1/4" )

f) Peso unitario: 2 330 Kg/m<sup>3</sup>.

g) Contenido de aire: 1,6 %.

h) Temperatura: 22 °C.

i) Proporción utilizada para concreto de 4000 PSI: 1 : 2,02 : 2,194 : 0,55

**BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA**



A. CONO



B. CONO Y CLIVAJE



C. CONO Y RUPTURA



D. CORTE



E. COLUMNAR

El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

**ATENTAMENTE,**



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

Vo.Bo.



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
Director CII/USAC



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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 6. Informe del diseño práctico de mezcla con 10 % de sustitución de ceniza por cemento



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



---

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO**  
NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39) **No. 08488**  
INFORME SACM - 552  
HOJA 1/1

O.T. No. 36242

**INTERESADO:** Eder Ivan Cano Salazar Carne: 200010911  
**PROYECTO:** Trabajo de graduación "Ceniza volante de carbón mineral para adición en mezclas de concreto"  
**DIRECCIÓN:** Ciudad.  
**EMISION DE INFORME:** 23 de noviembre de 2016

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD en días	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA ESTRUCTURA	PESO en kg	DIÁMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/pig <sup>2</sup>	TIPO DE FRACTURA
CEN.10/90	40-9	09/08/2016	12/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	12,990	15,065	30,477	61 500	15,30	2 220	B
CEN.10/90	41-9	09/08/2016	12/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	12,900	15,110	30,200	59 000	14,60	2 120	B
CEN.10/90	42-9	09/08/2016	16/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	13,000	15,200	30,433	78 500	19,20	2 790	B
CEN.10/90	43-9	09/08/2016	16/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	12,960	15,180	30,297	82 500	20,30	2 950	B
CEN.10/90	44-9	09/08/2016	06/09/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	12,920	15,075	30,317	120 000	29,90	4 340	B
CEN.10/90	45-9	09/08/2016	06/09/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	13,000	15,125	30,400	129 000	31,90	4 630	D

**OBSERVACIONES :**

- Diseño de mezcla bajo condiciones de laboratorio.
- Muestras ensayadas en maquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300,000 lbs.
- Dial utilizado para lectura de cargas: 300,000 lbs.
- Cilindros cabeceados según norma ASTM C-1231.
- Asentamiento de mezcla: 3,8 cm. ( 1 ½" )
- Peso unitario: 2 390 Kg/m<sup>3</sup>.
- Contenido de aire: 1,3 %.
- Temperatura: 21 °C.
- Proporción utilizada para concreto de 4000 PSI: 1 : 2,02 : 2,194 : 0,51

**BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA**







El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

**ATENTAMENTE,**



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

Vo.Bo.



Ing. Francisco Javier Quirónez de la Cruz  
Director CII/USAC

SECCION DE AGREGADOS,  
CONCRETOS Y MORTEROS  
CII / USAC

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 7. Informe del diseño práctico de mezcla con 5 % de sustitución de ceniza por cemento



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



---

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO** No. **08487**  
**NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39)**  
 INFORME SACM - 551  
 HOJA 1/1

O.T. No. 36242

**INTERESADO:** Eder Ivan Cano Salazar Carne: 200010911

**PROYECTO:** Trabajo de graduacion "Ceniza volante de carbón mineral para adición en mezclas de concreto"

**DIRECCIÓN:** Ciudad.

**EMISION DE INFORME:** 23 de noviembre de 2016

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD en días	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA ESTRUCTURA	PESO en kg	DIAMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/pulg <sup>2</sup>	TIPO DE FRACTURA
CEN.5/95	34-9	09/08/2016	12/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	13,000	15,160	30,393	56 000	13,80	2 000	B
CEN.5/95	35-9	09/08/2016	12/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	13,000	15,075	30,423	59 000	14,70	2 130	B
CEN.5/95	36-9	09/08/2016	16/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	13,000	15,175	30,447	82 500	20,30	2 950	B
CEN.5/95	37-9	09/08/2016	16/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	13,050	15,305	30,497	80 000	19,30	2 800	B
CEN.5/95	38-9	09/08/2016	06/09/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	12,960	15,110	30,320	120 000	29,80	4 320	E
CEN.5/95	39-9	09/08/2016	06/09/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	13,010	15,200	30,267	124 000	30,40	4 410	B

**OBSERVACIONES :**

- Diseño de mezcla bajo condiciones de laboratorio.
- Muestras ensayadas en maquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300,000 lbs.
- Dial utilizado para lectura de cargas: 300,000 lbs.
- Cilindros cabeceados según norma ASTM C-1231.
- Asentamiento de mezcla: 3,8 cm. ( 1 ½" )
- Peso unitario: 2 380 Kg/m<sup>3</sup>.
- Contenido de aire: 1,4 %.
- Temperatura: 22 °C.
- Proporción utilizada para concreto de 4000 PSI: 1 : 2,02 : 2,194 : 0,54

**BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA**



A. CONO



B. CONO Y CLIVAJE



C. CONO Y RUPTURA



D. CORTE



E. COLUMNAR

El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.



**ATENTAMENTE,**  
Inga Dilma Yapel Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo.



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
Director CII/USAC




SECCION DE AGREGADOS  
CONCRETOS Y MORTEROS  
CII / USAC


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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 8. Informe del diseño práctico de mezcla con adición de 5 % de ceniza



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



---

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO**  
NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39)  
INFORME SACM - 553  
HOJA 1/1

**No. 08489**

O.T. No.36242

**INTERESADO:** Eder Ivan Cano Salazar Carne: 200010911

**PROYECTO:** Trabajo de graduación "Ceniza volante de carbón mineral para adición en mezclas de concreto"

**DIRECCIÓN:** Ciudad.


**EMISION DE INFORME:** 23 de noviembre de 2016

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE COLOCACION	FECHA DE RUPTURA	EDAD en dias	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA ESTRUCTURA	PESO en kg	DIÁMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/in <sup>2</sup>	TIPO DE FRACTURA
PAT+5	41-9	17/08/2016	20/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	13,030	15,150	30,533	80 000	19,70	2 860	B
PAT+5	42-9	17/08/2016	20/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	13,000	15,200	30,420	85 500	21,00	3 050	B
PAT+5	43-9	17/08/2016	24/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	13,060	15,115	30,480	107 500	26,60	3 860	B
PAT+5	44-9	17/08/2016	24/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	12,940	15,100	30,193	107 500	26,70	3 870	B
PAT+5	45-9	17/08/2016	14/09/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	13,060	15,120	30,590	137 500	34,10	4 950	B
PAT+5	46-9	17/08/2016	14/09/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	13,010	15,145	30,273	150 000	37,00	5 370	B


**OBSERVACIONES :**

- Diseño de mezcla bajo condiciones de laboratorio.
- Muestras ensayadas en maquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300,000 lbs.
- Dial utilizado para lectura de cargas: 300,000 lbs.
- Cilindros cabeceados según norma ASTM C-1231.
- Asentamiento de mezcla: 2,5 cm. ( 1" )
- Peso unitario: 2 370 Kg/m<sup>3</sup>.
- Contenido de aire: 1,6 %.
- Temperatura: 21,5 °C.
- Proporcion utilizada para concreto de 4000 PSI: 1 : 2,02 : 2,194 : 0,51


**BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA**




A. CONO




B. CONO Y CLIVAJE



C. CONO Y RUPTURA



D. CORTE



E. COLUMNAR

El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

**ATENTAMENTE,**

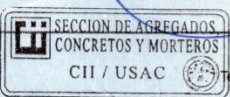


Inga Dilma Yaner Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo.



Ing. Francisco Javier Quirón de la Cruz  
Director CII/USAC



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



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 9. Informe del diseño práctico de mezcla con 10 % de adición de ceniza



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



---

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO**  
NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39)  
INFORME SACM - 554  
HOJA 1/1

**No. 08490**

O.T. No. 36242

**INTERESADO:** Eder Ivan Cano Salazar Carne: 200010911

**PROYECTO:** Trabajo de graduación "Ceniza volante de carbón mineral para adición en mezclas de concreto"

**DIRECCIÓN:** Ciudad.

**EMISION DE INFORME:** 23 de noviembre de 2016

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD en días	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA ESTRUCTURA	PESO en kg	DIÁMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg <sup>2</sup>	TIPO DE FRACTURA
PAT.+10	47-9	17/08/2016	20/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	12,810	15,225	30,217	72 500	17,70	2 570	B
PAT.+10	48-9	17/08/2016	20/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	12,910	15,175	30,337	72 500	17,80	2 580	B
PAT.+10	49-9	17/08/2016	24/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	12,950	15,120	30,357	97 500	24,10	3 500	B
PAT.+10	50-9	17/08/2016	24/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	12,870	15,145	30,210	98 000	24,20	3 510	B
PAT.+10	51-9	17/08/2016	14/09/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	12,980	15,225	30,433	140 000	34,20	4 960	B
PAT.+10	52-9	17/08/2016	14/09/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	12,910	15,190	30,303	142 500	35,00	5 080	B

**OBSERVACIONES :**

a) Diseño de mezcla bajo condiciones de laboratorio.

b) Muestras ensayadas en maquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300,000 lbs.

c) Dial utilizado para lectura de cargas: 300,000 lbs.

d) Cilindros cabeceados según norma ASTM C-1231.

e) Asentamiento de mezcla: 2,5 cm. ( 1" )

f) Peso unitario: 2 360 Kg/m<sup>3</sup>.

g) Contenido de aire: 1,5 %.

h) Temperatura: 22 °C.

i) Proporción utilizada para concreto de 4000 PSI: 1 : 2,02 : 2,194 : 0,54

**BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA**



A. CONO



B. CONO Y CLIVAJE



C. CONO Y RUPTURA



D. CORTE



E. COLUMNAR

El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

**ATENTAMENTE,**

*[Firma]*  
Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo. *[Firma]*  
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
Director CII/USAC



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



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.



Anexo 10. Informe del diseño práctico de mezcla con 15 % de adición de ceniza



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



---

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO**  
**NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39)**  
**INFORME SACM - 555**  
**HOJA 1/1**

**No. 08491**

O.T. No. 36242

**INTERESADO:** Eder Ivan Cano Salazar Carne: 200010911

**PROYECTO:** Trabajo de graduacion "Ceniza volante de carbón mineral para adición en mezclas de concreto"

**DIRECCIÓN:** Ciudad.

**EMISION DE INFORME:** 23 de noviembre de 2016

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD en días	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA ESTRUCTURA	PESO en kg	DIÁMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/in <sup>2</sup>	TIPO DE FRACTURA
PAT.+15	53-9	17/08/2016	20/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	12,870	15,200	30,350	69 000	16,90	2 450	B
PAT.+15	54-9	17/08/2016	20/08/2016	3	Diseño de mezcla de concreto	12,850	15,225	30,350	72 500	17,70	2 570	B
PAT.+15	55-9	17/08/2016	24/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	12,980	15,140	30,477	94 000	23,20	3 370	B
PAT.+15	56-9	17/08/2016	24/08/2016	7	Diseño de mezcla de concreto	12,940	15,150	30,480	92 500	22,80	3 310	B
PAT.+15	57-9	17/08/2016	14/09/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	12,910	15,180	30,383	145 000	35,60	5 170	B
PAT.+15	58-9	17/08/2016	14/09/2016	28	Diseño de mezcla de concreto	12,880	15,215	30,307	147 000	36,00	5 220	E

**OBSERVACIONES :**

- Diseño de mezcla bajo condiciones de laboratorio.
- Muestras ensayadas en maquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300,000 lbs.
- Dial utilizado para lectura de cargas: 300,000 lbs.
- Cilindros cabeceados según norma ASTM C-1231.
- Asentamiento de mezcla: 2.5 cm. ( 1" )
- Peso unitario: 2 360 Kg/m<sup>3</sup>.
- Contenido de aire: 1,6 %.
- Temperatura: 22 °C.
- Proporcion utilizada para concreto de 4000 PSI: 1 : 2,02 : 2,194 : 0,56

**BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA**



A. CONO



B. CONO Y CLIVAJE



C. CONO Y RUPTURA



D. CORTE



E. COLUMNAR

El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

**ATENTAMENTE,**



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

Vo.Bo.



Ing. Francisco Javier Quirónez de la Cruz  
Director CII/USAC



SECCION DE AGREGADOS,  
CONCRETOS Y MORTEROS  
CII / USAC

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

## Anexo 11. Informe de ensayo de tiempo de fraguado en mezcla patrón

### DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO DE MEZCLAS DE CONCRETO POR SU RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN NORMA NTG 41017.h12 (ASTM 403/C403M-08)

HOJA 1/1

**INTERESADO:** Eder Ivan Cano Salazar, carné: 2000-10911

**PROYECTO:** Trabajo de graduación "Ceniza de carbon mineral para adición en mezclas de concreto"

**DIRECCIÓN:** CII/FIUSAC Laboratorio de concretos

**EMISIÓN DE INFORME:** 29 de noviembre de 2016

Cantidad en masa de materiales por metro cúbico:

Cemento Kg	Arena Kg	Piedrin Kg	Agua Litros
416	844	914	225

Tiempo (minutos)	Esfuerzo de penetración (psi)
210	52
240	75
270	138
300	220
330	456
360	650
390	1000
420	1900
450	3450
465	4614

Tamaño nominal máximo: 3/8"  
 Relación A/C: 0,51  
 Aditivos utilizados: Ninguno  
 Contenido de aire: 1,60%  
 Asentamiento: 6,0 cm  
 Temperatura después de tamizado: 21,9 °C  
 Temperatura ambiente inicial: 21,3 °C  
 Temperatura ambiente final: 20,5 °C  
 Tiempo de fraguado inicial: 337 minutos  
 Tiempo de fraguado final: 451 minutos



El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.  
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 12. Informe de ensayo de tiempo de fraguado en mezcla con sustitución de 10 % de ceniza por cemento



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



---

**DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO DE MEZCLAS DE CONCRETO  
POR SU RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN** No. 11007  
 NORMA NTG 41017 h12 (ASTM 403/C403M-08)  
 INFORME SACM - 570  
 HOJA 1/1

O. T. 36483

**INTERESADO:** Eder Ivan Cano Salazar, carné: 2000-10911

**PROYECTO:** Trabajo de graduación "Ceniza de carbon mineral para adición en mezclas de concreto"

**DIRECCIÓN:** CII/FIUSAC Laboratorio de concretos

**EMISIÓN DE INFORME:** 28 de noviembre de 2016

---

Cantidad en masa de materiales por metro cúbico:

Cemento Kg	Arena Kg	Piedrin Kg	Agua Litros
416	844	914	225

Tiempo (minutos)	Esfuerzo de penetración (psi)
240	42
270	70
300	80
330	80
360	102
390	150
420	280
450	350
480	560
510	700
540	1200
570	1800
600	2400
630	3276
660	4243

Tamaño nominal máximo: 3/8"

Relación A/C: 0,51

Aditivos utilizados: Sustitución 10% de ceniza

Contenido de aire: 1,30%

Asentamiento: 3,8cm

Temperatura después de tamizado: 21,9 °C

Temperatura ambiente inicial: 21,3 °C

Temperatura ambiente final: 20,5 °C

Tiempo de fraguado inicial: 471 minutos

Tiempo de fraguado final: 652 minutos



**Tiempo de fraguado**

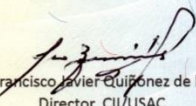
El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo. Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,



Inga Dilma Yanez Mejicanos Jol  
Jefa Sección Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo.



Ing. Francisco Javier Quijón de la Cruz  
Director CII/USAC

**SECCION DE AGREGADOS,  
CONCRETOS Y MORTEROS**  
CII / USAC

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



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 13. Informe de ensayo de tiempo de fraguado en mezcla con adición de 15 % de ceniza



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



---

**DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO DE MEZCLAS DE CONCRETO  
POR SU RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN** **No. 11008**  
 NORMA NTG 41017 h12 (ASTM 403/C403M-08)  
 INFORME SACM - 571  
 HOJA 1/1

O. T. 36483

**INTERESADO:** Eder Ivan Cano Salazar, carné: 2000-10911

**PROYECTO:** Trabajo de graduación "Ceniza de carbon mineral para adición en mezclas de concreto"

**DIRECCIÓN:** CII/FIUSAC Laboratorio de concretos

**EMISIÓN DE INFORME:** 28 de noviembre de 2016

Cantidad en masa de materiales por metro cúbico:

Cemento Kg	Arena Kg	Piedrin Kg	Agua Litros
416	844	914	225

Tamaño nominal máximo: 3/8"

Relacion A/C: 0,56

Aditivos utilizados: Ceniza de carbon mineral 15%

Contenido de aire: 1,60%

Asentamiento: 2,5 cm

Temperatura despues de tamizado: 21,9 °C

Temperatura ambiente inicial: 21,3 °C

Temperatura ambiental final: 20,5 °C

Tiempo de fraguado inicial: 471 minutos

Tiempo de fraguado final: 700 minutos

Tiempo (minutos)	Esfuerzo de penetración (psi)
240	80
270	98
300	146
330	150
360	186
390	208
420	240
450	300
480	580
510	800
540	900
570	1600
600	2000
630	2460
660	3107
690	3766
720	4465

Tiempo de fraguado



El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo. Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTEMENTE,



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

Vo.Bo.



Ing. Francisco Javier Quiroz de la Cruz  
Director CII/USAC



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



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

# Anexo 14. Informe de ensayo de Fluorescencia de Rayos x

 <p><b>CEMENTOS PROGRESO S. A.</b>  <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b>          15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera          Tel: 22864178 Fax: 22864181 laboratorio@cempro.com</p>		OT	28664
		FECHA	2016-09-09
		PÁGINA	1 DE 1
		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	GENERADORA DE LA COSTA SUR
Dirección / Teléfono	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA / 2286-4100	Muestra	CENIZA VOLATIL DE CARBÓN MINERAL
Contacto	MARIO DE LEÓN / EDER IVAN CANO	Analistas	JOSÉ LAZARO MARTÍNEZ
Proyecto	TESIS CENIZA VOLANTE DE CARBÓN MINERAL PARA ADICIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO	Fecha de Ensayo	2016-09-09

## INFORME DE ENSAYO

### ANÁLISIS QUÍMICO

#### MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)														
Muestra	Al2O3	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SO3	SiO2	TiO2	LOI (950 °C)	Total
1 CENIZA VOLATIL DE CARBÓN MINERAL	18.32	1.78	0.08	7.11	1.52	0.21	0.05	0.72	0.00	0.00	64.24	0.84	3.03	97.90

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

  
 Analista

  
 Jefe de Laboratorio/Coordinador

OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.

SCL-CT-QC-IE-02/Rev. 0