

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA DE HORNOS DE LA
PLANTA SIDEGUA COMO PUZOLANA ARTIFICIAL**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PRESENTADO A JUNTA
DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

POR:

EDGAR FRANCISCO SOLÓRZANO JIMÉNEZ

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

INGENIERO CIVIL

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. René Rolando Vargas Oliva
EXAMINADOR	Ing. José Eduardo Ramírez Saravia
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Melini Salguero
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA DE HORNOS DE LA PLANTA SIDEGUA COMO PUZOLANA ARTIFICIAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 8 de mayo de 2003.

Edgar Francisco Solórzano Jiménez

AGRADECIMIENTOS:

A DIOS

A quien debo todo, por darme la oportunidad de nacer, ser y vivir libre.

Al Ing. Sergio Castañeda

Por su valiosa ayuda, colaboración y comprensión durante el desarrollo de esta investigación.

A mi asesor

Por brindarme toda la ayuda necesaria para la realización de este trabajo.

Centro de Investigaciones de Ingeniería

Por darme la oportunidad y el apoyo para realizar mi investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES		
GLOSARIO		VIII
OBJETIVOS		
INTRODUCCIÓN		XI
1. GENERALIDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LAS PUZOLANAS Y LOS CEMENTOS MEZCLADOS		1
Puzolana		1
División de las puzolanas		1
De origen natural	1	
De origen artificial		2
Aplicaciones de las puzolanas		2
Características químicas físicas y mecánicas que debe presentar una puzolana artificial y natural		3
Normas para la evaluación de las puzolanas		4
Cementos mezclados		5
Definiciones importantes	5	
Clasificación de los cementos		6
Aplicaciones de los diferentes tipos de cementos mezclados		7
2. SIDERURGIA Y ESCORIA DE ALTOS HORNOS		9
Siderurgia		9
Papel de la escoria en la fundición del acero		10
Escoria de altos hornos		10

Utilización de la escoria de altos hornos	11
Características y propiedades mas importantes de la escoria de altos hornos	13
Producción y costos de la escoria de altos hornos	14
Disponibilidad	15
3. ESCORIA DE HORNOS DE SIDERURGICAS DE GUATEMALA (SIDEGUA)	17
Descripción del proceso de fundición siderúrgico de la planta SIDEGUA	17
Metodología y procedimiento de muestreos	18
Primer muestreo	18
Segundo y tercer muestreo	18
Obtención y preparación de la escoria	19
Producción y disponibilidad de la escoria de hornos de SIDEGUA	20
Traslado a laboratorios	20
4. METODOLOGÍA DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA DE HORNOS SIDEGUA	21
Descripción de normas	21
Norma ASTM C-593	22
Norma ASTM C-595	23
Norma ASTM C-989	25
5. DESARROLLO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	27

Realización de ensayos descritos en normas primer muestreo	27
ASTM C-593	27
ASTM C-989	29
Selección del tipo de escoria	34
Realización de ensayos descritos en normas segundo muestreo	34
ASTM C-593	35
ASTM C-989	35
ASTM C-595	36
Realización de ensayos descritos en normas tercer muestreo	41
ASTM C-595	41
Componentes químicos de la escoria seleccionada	44

6. GRÁFICOS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LA ESCORIA DE HORNOS DE SIDEGUA. 47

Primer muestreo	47
ASTM C-593	47
ASTM C-989	49
Segundo muestreo y selección de tipo de escoria	51
ASTM C-593	51
ASTM C-989	53
ASTM C-595	54
Tercer muestreo y seguimiento de los resultados segundo muestreo	57
ASTM C-595	57

CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES	63

BIBLIOGRAFÍA	64
APÉNDICE	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

1 FIGURAS

1. Resistencia a compresión cal-escoria primer muestreo.....	47
2. Finura residuo primer muestreo	48
3. Superficie específica Blaine primer muestreo	48
4. Resistencia a compresión primer muestreo	49
5. Índice de actividad puzolánica cuatro tipos de escoria.....	49
6. Fineza # 325 cuatro tipos de escoria	50
7. Porcentaje de SO ₃ cuatro tipos de escoria	50
8. Resistencia cal-escoria segundo muestreo	51
9. Peso específico segundo muestreo	52
10. Fineza residuo Segundo muestreo	52
11. Resistencia a compresión segundo muestreo	53
12. Índice de actividad puzolánica segundo muestreo	53
13. Proporción I	54
14. Proporción II	54
15. Proporción III	55
16. Resistencia a compresión de las tres proporciones	55
17. Índice de actividad puzolánica de las tres proporciones	56
18. Fineza tamiz # 325 de las tres proporciones	56
19. Peso específico de las tres proporciones	57
20. Resistencia a compresión de las tres proporciones tercer muestreo	57
21. Índice de actividad puzolánica de las tres proporciones tercer muestreo	58
22. Fineza tamiz # 325 de las tres proporciones tercer muestreo	58
23. Peso específico de las tres proporciones tercer muestreo	59

2 TABLAS

I.	Porcentajes químicos de puzolanas y cenizas.....	3
II.	Condiciones físicas de puzolanas artificiales y naturales	4
III.	Grados de escoria según edad de curado	13
IV.	Composición química de escoria de altos hornos de varios países..	14
V.	Composición química de la escoria de Estados Unidos y Canadá ..	15
VI.	Producción y utilización anual de la escoria de altos hornos	16
VII.	Resistencia a compresión cal-escoria kg/cm ²	27
VIII.	Fineza residuo tamiz # 30 y # 200	28
IX.	Peso específico.....	29
X.	Requerimientos de agua	30
XI.	Resistencia a compresión kg/cm ²	31
XII.	Índice de actividad de la escoria	31
XIII.	Fineza tamiz # 325	32
XIV.	Superficie específica Blaine	33
XV.	Porcentaje de SO ₃	34
XVI.	Resistencia a compresión cal-escoria, peso específico y residuo segundo muestreo.....	35
XVII.	Resistencia a compresión, índice puzolánico, fineza, superficie específica Blaine segundo muestreo	36
XVIII.	Resistencia a compresión e índice de actividad puzolánica 50% cemento y 50% escoria	38
XIX.	Propiedades físicas, 50% cemento y 50% escoria	38
XX.	Resistencia a compresión e índice de actividad puzolánica 30% cemento y 70% escoria	39
XXI.	Propiedades físicas 30% cemento y 70% escoria	39

XXII. Resistencia a compresión 70% cemento y 30% escoria	40
XXIII. Propiedades físicas 70% cemento y 30% escoria	40
XXIV. Resistencia a compresión e índice de actividad puzolánica 50% cemento y 50% escoria tercer muestreo.	41
XXV. Propiedades físicas 50% cemento y 50% escoria	42
XXVI. Resistencia a compresión e índice de actividad puzolánica 30% cemento 70% escoria tercer muestreo.	42
XXVII. Propiedades físicas 30% cemento y 70% escoria	43
XXVIII. Resistencia a compresión e índice de actividad puzolánica 70% cemento y 30% escoria tercer muestreo	43
XXIX. Propiedades físicas 70% cemento y 30% escoria tercer muestreo	44
XXX. Componentes químicos de la escoria	44

GLOSARIO

Aglomerante

Se denominan a los aglomerantes como materiales hidráulicos, que amasados con agua, fraguan y endurecen sumergidos en este líquido, y son prácticamente estables en contacto con él.

Clinker

Es el material que se obtiene calcinado y molturando una mezcla suficientemente fina y homogénea, de proporciones variable, de calizas, arcillas, margas y otros productos cuya presencia facilite los procesos de fabricación o permita la obtención de cementos con propiedades adicionales.

Cemento

Es el material que se obtiene por molturación conjunta, en proporciones variables, de clinker, reguladores de fraguado, escorias siderúrgicas, puzolanas y adicionales inertes.

Escoria de altos hornos

Puzolana

Es un agregado de origen mineral que se compone de silicatos de calcio y ferritas combinados con óxidos fundidos de hierro, aluminio y magnesio”. Su combinación de propiedades físicas de dureza, resistencia y textura superficial la hacen superior a la grava para ser utilizada como agregado para concreto.

Siderurgia

Se define como puzolana a todo material natural o artificial, silíceo, silicoaluminoso, que por sí mismo posee pocas o ninguna propiedad cementante, pero que finamente dividido y en presencia del agua reacciona químicamente, a temperatura ambiente, para formar compuestos que tienen propiedades conglomerantes.

Tecnología desarrollada con la producción del hierro y sus aleaciones, en especial las que contienen un pequeño porcentaje de carbono, que constituyen los diferentes tipos de acero.

OBJETIVOS

□ **General**

La caracterización de la escoria de los hornos de la planta SIDEGUA, como material puzolánico, para determinar si es posible su uso debido a sus propiedades físicas mecánicas y químicas como material cementante, utilizando normas ASTM C-593, ASTM C-595 y ASTM C-989.

□ **Específicos**

1. Realización de los ensayos físicos, mecánicos y químicos que se describen en las normas ASTM C-593, ASTM C-989.
2. Evaluación de los resultados obtenidos, para clasificar la escoria analizada de acuerdo con las normas ASTM C-595, ASTM C-989.
3. Conocer y describir el proceso de fundición siderúrgico de la planta SIDEGUA para la obtención de la escoria.
4. Realizar una diferencia de lo que es una escoria de altos hornos y una escoria de hornos (Planta SIDEGUA), así como también sus procesos de obtención.

INTRODUCCIÓN

Existen algunas razones que pueden motivar la realización de este estudio e investigación, pero la principal radica en la determinación de las principales características y propiedades de la escoria de hornos de la planta SIDEGUA, subproducto del proceso de fundición siderúrgico, ya que se desea emplear la escoria como una puzolana artificial para uso cementante como opción en la búsqueda de un nuevo material puzolánico, que reemplace en forma parcial el uso del cemento portland y la cal hidratada.

Se desea dejar caracterizada la escoria de los hornos de SIDEGUA como puzolana artificial, para que pueda ser considerada su utilización en algún proceso de construcción cuando se elaboren cementos mezclados, exponiendo los métodos de obtención de la escoria, su preparación y selección, su cuantificación y el costo que representaría extraer este material de dicha planta para su posterior uso en la elaboración de cementos mezclados.

Basándose en la importancia que representa una puzolana artificial, se sabe que una puzolana de este tipo es obtenida por tratamiento térmico de materiales naturales, ya que una puzolana requiere simplemente ser molida, combinarla con cemento portland o cal hidratada; y con la presencia de cierta cantidad de agua para adquirir propiedades cementantes.

1. GENERALIDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LAS PUZOLANAS Y LOS CEMENTOS MEZCLADOS

1.1 Puzolana

Se define como puzolana a todo material natural o artificial, sílico, sílicoaluminoso, que por sí mismo posee pocas o ninguna propiedad cementante, pero que finamente dividido y en presencia del agua reacciona químicamente, a temperatura ambiente, para formar compuestos que tienen propiedades conglomerantes.

Las puzolanas deben su actividad química a alguna de las sustancias siguientes: materias vítreas silíceas o aluminosas, naturales o artificiales, ópalo; materias arcillosas calcinadas; algunas zeolitas; óxidos hidratados o hidróxidos de aluminio.

1.2 División de las puzolanas

1.2.1 De origen natural

1. Ceniza y tobas volcánicas, incluida la pumicita, de composición riolítica o andesítica.
2. Rocas silíceas sedimentarias, tales como tierra de diatomeas y pizarras o areniscas opalinas

1.2.2 De origen artificial

1. Arcillas y pizarras calcinadas
2. Subproductos industriales. Cenizas volantes y ladrillos molidos

1.3 Aplicaciones de las puzolanas

Las puzolanas se emplean con los siguientes fines: fijar la cal liberada de los silicatos del cemento, en forma de componentes estables y no solubles y mejorar la durabilidad del concreto, especialmente en obras sometidas a la filtración del agua. También se emplean como producto de adición en la fabricación de cementos, o directamente en la del concreto, para reducir el calor de hidratación. Las puzolanas naturales o artificiales, llamadas también cenizas volantes, pueden emplearse de dos formas diferentes:

1.3.1 En la fabricación de cementos puzolánicos. El material puzolánico natural o artificial es molido junto con el clinker. Para este caso se deberá cumplir con las condiciones que se prescriben para los cementos puzolánicos en las normas de materiales más importantes.

1.3.2 Las puzolanas se introducen directamente en la concreteira como un ingrediente más, en la elaboración del concreto o del mortero. Y en este se deberá prestar especial cuidado para que la puzolana quede homogéneamente distribuida en toda la masa del concreto, durante la mezcla o amasado de este.

1.4 Características químicas físicas y mecánicas que debe presentar una puzolana artificial y natural

Algunas prescripciones de las características químicas y de puzonalidad, que deben cumplir las puzolanas cuando tengan que emplearse como un producto de adición activo en las dos formas antes mencionadas se presentan a continuación.

Tabla I. Porcentajes químicos de puzolanas y cenizas

	Puzolanas naturales	Cenizas volantes
Dióxido de silicio (SiO ₂) + óxido de aluminio (Al ₂ O ₃), mínimo.	70 %	70 %
Óxido de magnesio (MgO), máximo	5 %	5 %
Óxido de sodio + potásico, expresados como óxido sódico (Na ₂ O), máximo	1,5 %	1,5 %
Trióxido de azufre (SO ₃), máximo	3 %	4 %
Pérdida por calcinación sobre muestra seca, máximo	10 %	8 %
Actividad puzolánica resistencia a compresión del mortero cal-puzolana, a siete días, mínimo	75%	75%

Fuente: PCA Research and Development Bulletin RD112T.

Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements.

En la siguiente tabla se muestran las condiciones que deben cumplir las puzolanas naturales y artificiales en adición directa con un concreto, mortero o fabricación de un cemento puzolánico.

Tabla II. Condiciones físicas de las puzolanas artificiales y naturales

Finura: superficie específica, en cm ² /g, mínimo	6.500
--	-------

Material retenido sobre el tamiz #325, máximo	20%
Humedad: contenido de agua, máximo	3 %
Regularidad: cada uno de los resultados individuales de los ensayos efectuados con muestras de puzolana, en número no inferior a diez, diferirán de la media aritmética de aquellos, en menos de los porcentajes siguientes:	
Para la superficie específica	15 %
Para el peso específico	5 %
Homogeneidad: el material puzolánico deberá quedar homogéneamente distribuido en toda la masa de concreto o mortero durante el amasado de éste.	

Fuente: *PCA Research and Development Bulletin RD112T.*

Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements.

1.5 Normas para la evaluación de las puzolanas

Los ensayos de las puzolanas naturales o artificiales se realizaron de acuerdo con las normas de *The American Society for Testing and Materials* (ASTM) las cuales se describirán en el capítulo cuatro.

1.6 Cementos mezclados:

1.6.1 Definiciones importantes

Antes de conocer los distintos tipos de cementos mezclados conoceremos las definiciones de aglomerantes, clinker y cemento.

1. Aglomerantes: se denominan a los aglomerantes como materiales hidráulicos, que amasados con agua, fraguan y endurecen sumergidos en este líquido, y son prácticamente estables en contacto con él.
2. Clinker: es el material que se obtiene calcinando y molturando una mezcla suficientemente fina y homogénea, de proporciones variables, de calizas, arcillas, margas y otros productos cuya presencia facilite los procesos de fabricación o permita la obtención de cementos con propiedades adicionales.
3. Cemento mezclado: es el material que se obtiene por molturación conjunta, en proporciones variables, de clinker, reguladores de fraguado, escorias siderúrgicas, puzolanas y adicionales inertes.

1.6.2 Clasificación de los cementos

Los cementos puede clasificarse en los siguientes tipos

1. Portland
2. Siderúrgico.
3. Puzolánico
4. Compuesto

1. **Cemento portland:** el clinker de cemento portland está compuesto principalmente por silicato tricálcico (SC3), silicato bicálcico (SC2), aluminato tricálcico (AC3) y aluminoferrito tetracálcico (AFC4), además de componentes secundarios como el yeso, los álcalis, la cal libre y la magnesia libre, portland
2. **Cemento siderúrgico:** se denomina cemento de horno alto a la mezcla de clinker de cemento portland y regulador de fraguado en proporción superior al 20% e inferior al 64% en peso y escoria siderúrgica en proporción inferior al 80% y superior al 36% en peso.
3. **Cemento puzolánico:** se denomina cemento puzolánico a la mezcla de clinker de cemento portland y regulador de fraguado en proporción inferior al 89% en peso, y puzolana en proporción superior al 11% en peso, englobando en el término puzolana la mezcla de puzolanas naturales, cenizas volantes y humo de sílice, este último en proporción no mayor al 10%.
4. **Cemento compuesto:** se denomina cemento compuesto a la mezcla de clinker de cemento Portland y regulador de fraguado en proporción

superior al 40 por 100 e inferior al 64 por 100 en peso, escoria siderúrgica en proporción inferior al 30 por 100 y superior al 18 por 100 en peso y puzolanas naturales y cenizas volantes en proporción inferior al 30 por 100 y superior al 18 por 100 en peso.

1.7 Aplicaciones de los diferentes tipos de cementos mezclados

Cuando las condiciones de la obra requieran determinadas características del producto terminado, bien sea mortero, hormigón o lechada, podrá utilizarse como cemento el obtenido mediante la mezcla íntima, cuidadosamente vigilada, de cementos naturales, portland o siderúrgicos.

Pueden utilizarse mezclas de cemento siderúrgico y aluminoso, siempre que se realicen ensayos previos de las resistencias mecánicas obtenidas. Los cementos compuestos y naturales no son aptos para elementos y estructuras resistentes de concreto.

El constructor podrá ordenar el empleo de un determinado tipo de cemento, aunque no haya sido previsto en el proyecto, si lo estimase necesario para la seguridad de la obra, a causa de circunstancias descubiertas durante la ejecución de los trabajos.

Es de mucha importancia que el constructor realice las pruebas de laboratorio convenientes para que tenga una mejor garantía y seguridad del tipo de cemento compuesto que este utilizando.

Algunos tipos de cementos mezclados con su material especificado:

1. Cemento portland con escoria.
2. Cemento portland con humo de sílice.
3. Cemento portland con puzolana.
4. Cemento portland con ceniza volante.
5. Cemento portland con caliza.
6. Cemento portland mixto.
7. Cemento de horno alto.
8. Cementos portland blancos.
9. Cementos portland blancos con adiciones.

3. SIDERURGIA Y ESCORIA DE ALTOS HORNOS

2.1 Siderurgia

Tecnología desarrollada con la producción del hierro y sus aleaciones, en especial las que contienen un pequeño porcentaje de carbono, que constituyen los diferentes tipos de acero. Las diferencias entre las distintas clases de hierro y acero resultan confusas por su misma nomenclatura. En general el acero es una aleación de hierro y carbono a la que suelen por lo regular añadirle otros elementos. Algunas aleaciones denominadas hierro contienen más carbono que algunos aceros comerciales.

Con exactitud no se sabe la fecha en que se empezó a emplear esta técnica mineral de hierro, para producir material susceptible para ser utilizado. Pero sí se sabe que algunos arqueólogos descubrieron utensilios de Egipcios que datan de 3000 años a.C. e incluso de los mismos griegos que ya conocían la técnica hacia 1000 a.C. para endurecer armas de hierro mediante tratamiento térmico.

Actualmente la producción moderna de acero emplea altos hornos que son modelos perfeccionados de los usados antiguamente. Desde la década de 1960 existen minihornos que emplean electricidad para producir acero a partir del material de chatarra. Sin embargo las grandes instalaciones de altos hornos continúan siendo esenciales para producir acero a partir de mineral de hierro.¹

2.2 Papel de la escoria en la fundición del acero

1

“Siderurgia”, **Enciclopedia Microsoft® Encarta® 99**. © 1993-1998
Microsoft Corporation Reservados todos los derechos.

Durante la fundición y colada del metal líquido se encuentra en contacto continuo con la escoria e interacciona con ella. La composición de la escoria, su temperatura, la fluidez y otros parámetros ejercen una influencia decisiva en el proceso de la fundición y en la calidad del metal. La tarea principal del fundidor del acero consiste en eliminar del metal las impurezas nocivas (por lo común, son el azufre y el fósforo), este problema se resuelve haciendo pasar estas impurezas indeseables a la escoria y creando las condiciones que impiden su paso inverso de la escoria al metal. Debido a esto el fundidor debe obtener la escoria de composición necesaria y de trabajabilidad requerida. La escoria debe asegurar el grado necesario para la purificación del metal de las impurezas nocivas contenidas en él. Durante la colada debe impedir el enfriamiento del metal que se encuentra en la crisol. En muchas ocasiones cuando la escoria es utilizada para fabricar materiales de construcción se deben extraer impurezas del metal como titanio, cromo, etc. ²

2.3 Escoria de altos hornos

La escoria de altos hornos se produce durante la fabricación del acero, la ASTM la define como un “agregado de origen mineral que se compone de silicatos de calcio y ferritas combinados con óxidos fundidos de hierro, aluminio y magnesio”. Su combinación de propiedades físicas de dureza, resistencia y textura superficial la hacen superior a la grava para ser utilizada como agregado para concreto.

Es también utilizada como material cementante como puzolana artificial en la elaboración de cementos mezclados.

2.4 Utilización de la escoria de altos hornos

²

V. A. Kudrin. **Escorias en los Procesos de Fundición del Acero. Metalurgia del Acero**,(Editorial Mir, Moscú 1984).

La escoria de altos hornos se utiliza en países altamente industrializados, como EE.UU., Canadá, México, Argentina, Italia, Francia, España y Japón. A continuación se mencionarán algunas aplicaciones de esta escoria en los países antes mencionados.

La escoria de altos hornos se ha utilizado por su estabilidad, ya que como material rugoso se entrelaza automáticamente, formando una superficie estable y con mucha resistencia a la tracción, es resistente a la intemperie, su porosidad la hace muy resistente a cambios de clima y humedad. Para condiciones extremas es el mejor agregado existente. Supera los límites establecidos en normas ASTM C-88. Por consiguiente esta posee alto peso específico, es más pesada que la mayoría de los agregados. Su gravedad específica es de 3.1 y su peso 1600-2000 kg/m³, esto le da gran resistencia en su utilización en carreteras, ya que es útil en subidas y curvas. En su utilización como agregado, soporta el impacto de cargas pesadas y llantas a alta velocidad, su dureza es de 7 en la escala de MOHS. Su gran capacidad de carga y de unión interna de la escoria la hacen ideal como balastro para ferrocarril y utilizada como agregado para estacionamientos ya que es resistente a la intemperie.³

En EE.UU. es ampliamente utilizada en mezclas asfálticas en importantes carreteras de ese país por su gran resistencia a derrapes, su estabilidad y resistencia al pavimento, vida útil muy buena y baja absorción de humedad.

Debido a su baja absorción de humedad, le permite un secado rápido. En los Estados Unidos han sido repavimentadas carreteras en las que transitan unos 500,000 vehículos diarios y a su vez evita la formación de baches.

3

“Agregados de Escoria de Acero”, **Revista de la Empresa Heckett Multiserv**, 1-4. 2002

En Argentina se realizó uno de los proyectos de investigación más importantes con la escoria de altos hornos, realizada con la colaboración del Instituto Nacional de Tecnología Industrial en el aprovechamiento de escorias de altos hornos y cenizas volantes como adiciones activas en reemplazo del cemento portland normal, junto con el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo CIID, de Canadá, realizando el proyecto “Escoria de Altos Hornos Argentina”.⁴

El objetivo global que se estableció para el proyecto fue estudiar y evaluar el comportamiento y el desarrollo de cementos mezclados a basé de las escorias de altos hornos producidas en Argentina y aplicándolo a distintos cementos portland de uso comercial. Estos cementos se destinaron a usos generales y en particular a la fabricación de elementos de concreto, destinados para la construcción de viviendas de bajo costo en Argentina y otros países de Latinoamérica. En este proyecto se diseñó una planta para la granulación de la escoria de altos hornos, desarrollaron dos nuevos cementos alternativos producidos a partir de mezclas de escoria y cal hidratada, esta empleada para albañilería y revestimientos, y el otro de cemento portland utilizado para elementos de concreto y elementos prefabricados.

Se diseñó y construyó un prototipo de vivienda económica, evaluando su reducción de costo resultante del uso de escoria de alto horn# Actualmente la vivienda es supervisada y monitoreada para verificar su buen funcionamiento.

2.5 Características y propiedades de la escoria de altos hornos

Una de las formas de determinar si la escoria es de buena calidad y resistencia es evaluando su resistencia a compresión ya que por medio de esta propiedad se puede

4

“Proyecto Escorias de Altos Hornos Argentina”, **Documento Biblioteca del Centro Internacional de Investigaciones para el desarrollo de Canadá- CIID**, Ref.: (3p): 85-1015. 1991.

determinar el índice de actividad puzolánica según norma ASTM C-989, a continuación se muestra la tabla que relaciona los grados de la escoria con edad de curado.

El índice de actividad de la escoria, es la relación que existe de la resistencia a compresión del cemento mezclado a partir de escoria, se divide la resistencia a compresión de la mezcla control de cemento portland en porcentaje.

$$I.E(\%) = \frac{\text{Resistencia a compresión cemento de escoria}}{\text{Resistencia a compresión mezcla control}} * 100$$

Tabla III. Grados de escoria según edad de curado

Edad y grado	Porcentaje de 5 muestreos consecutivos	Porcentaje de una muestra individual
7 días índice mínimo		
Grado 80	-	-
Grado 100	75	70
Grado 120	95	90
28 días índice mínimo		
Grado 80	75	70
Grado 100	95	90
Grado 120	115	110

Fuente: PCA Research and Development Bulletin RD112T. Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements.

A continuación se muestra en la tabla cuatro, composiciones químicas generales de la escoria de altos hornos de varios países altamente industrializados.

Tabla IV. Composición química de escoria de altos hornos de varios países

	Clinker	EE.UU	UK	España	Japón
% SiO ₂	22.3	37.5	35.1	38.6	32.4

3 %	Al ₂ O	5.8	8.3	13.6	8.4	16.5
3 %	Fe ₂ O	2.5	0.4	0.3	0.5	0.4
%	CaO	65.8	40.0	38	41.9	41.8
%	MgO	1.3	10.1	8.9	9.3	5.9
%	K ₂ O	0.3	0.4	0.7	0.5	-
%	Na ₂ O	0.5	-	0.3	0.3	-

Fuente: *PCA Research and Development Bulletin RD112T.*
Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements.

2.6 Producción y costo de la escoria de altos hornos.

La producción y costo de la escoria de altos hornos, es realmente bajo, ya que es un desecho industrial proveniente de la fundición del acero, inclusive se puede decir que no tiene costo. Esta producción proviene de estructuras, hojalatas, basura metálica, maquinaria industrial, desechos de guerra, la cual es seleccionada para evitar que agentes dañinos al acero puedan dañar la producción.

2.7 Disponibilidad

Japón, China, Alemania, Estados Unidos y Francia están entre los productores más grandes de escoria de altos hornos. Las industrias de cementos y morteros en

muchos países del mundo consumen aproximadamente 1/3 a 2/3 partes de escoria de altos hornos generadas en la producción de acero.

La uniformidad de la escoria proveniente desde su origen es una razón del porqué es más usada que la ceniza volante. La utilización de la escoria muestra que son las escorias de granulación enfriadas rápidamente, las más consumidas por las industrias del cemento y el concreto. Otro dato importante de mencionar en la producción de escoria de altos hornos, son sus constituyentes químicos por unidad de masa las cuales se mostraran en la tabla siguiente.

Tabla V. Composición química de la escoria de altos hornos de los Estados Unidos y Canadá

Constituyentes químicos	Composición (% por masa)
SiO ₂	32-40
Al ₂ O ₃	7-17
CaO	29-42
MgO	8-19
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5
MnO	0.2-1

Fuente: PCA Research and Development Bulletin RD112T. Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements.

A continuación se presentan algunos datos de producción anual y utilización de escoria de altos hornos en millones de toneladas en varios países.

Tabla VI. Producción y utilización anual de la escoria de altos hornos

en varios países

País	Producción (Millones ton.)	Utilización (Millones ton.)
Australia	4.7	0.12
Canadá	2.9	0.20
China	22	16
Francia	10.4	1.9
Alemania	15	2.8
India	7.8	2.8
Japón	24	8.2
Holanda	1.1	1
Noruega	0.1	Ninguna
Sudáfrica	1.5	0.6
Suecia	0.1	0.03
Reino Unido	4	4
EE.UU.	13	1

**Fuente: PCA Research and Development Bulletin RD112T.
Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements.**

**3. ESCORIA DE HORNOS DE SIDERURGICAS DE GUATEMALA
(SIDEGUA)**

En el capítulo anterior se describió y definió lo que es la escoria de altos hornos, en este capítulo se menciona la escoria de hornos de Siderurgicas de Guatemala, la cual se utilizó para desarrollar la presente investigación.

3.1 Descripción del proceso de fundición siderúrgico de la planta SIDEGUA

El proceso de fundición siderúrgico de la planta SIDEGUA, comienza desde el patio de chatarra, que es un sobrante o desperdicio en la fabricación de ciertos elementos metálicos, tales como: desechos de motores, maquinaria industrial, barcos, carros, estructuras, tubos metálicos, que ya se encuentran en un estado deteriorado, por consiguiente ya no es usado. En este patio son recolectados todos los desechos traídos por camiones y trailers desde distintos puntos del país. En el patio existe un proceso de separado de materiales, ya que se extraen todos los materiales dañinos para la fabricación del acero o hierro, de estos pueden mencionarse el plomo, zinc, cobre, aluminio, estaño y azufre.

Al tener seleccionada la chatarra sin estos materiales dañinos, las cantidades de chatarra son trasladadas con unas grúas hacia una maquina de compresión, la cual tiene una fuerza para comprimir de 200 toneladas, la cual reduce la chatarra a tamaños considerablemente pequeños, cuando compactan los automóviles deben extraerle el motor ya que es dañino, porque posee alto contenido de carbono. Luego con camiones es llevada la chatarra cerca de los hornos para su posterior fundición.

El procesamiento del acero consiste en los siguientes pasos consecutivos:

1. La fusión de la chatarra seleccionada, se lleva a un horno de arco eléctrico tipo EBT, por medio de varias cargas de materia prima y con aditivos como el coke y la cal. Luego de tener todo el material líquido se calienta hasta 1600 grados centígrados para vaciarla hacia un crisol donde se realiza el siguiente proceso.
2. Después de vaciar el líquido de acero en el crisol, es trasladado a una estación de trabajo donde se sigue calentando siempre con electricidad por medio de electrodos, y aquí es donde se afina el acero en los porcentajes de elementos que él requiera, el desecho sólido para este estudio se genera aquí en aproximadamente 500 kilogramos por lote de fundición.
3. Cuando la composición química del acero y su temperatura se encuentran en los rangos deseados, el crisol es enviado a la colada continua para su solidificación.

3.2 Metodología y procedimiento de muestreos

El procedimientos de toma de muestras en los patios de SIDEGUA, fue fijado en tres muestreos, a cada uno de ellos se les evaluaron sus propiedades y características físico mecánicas y químicas.

3.2.1 Primer muestreo

El propósito del primer muestreo, fue establecer cuál de los tipos de escoria muestreadas en los patios de fundición tuviera las mejores características y propiedades. La más importante es la resistencia a compresión.

En dicho muestreo se etiquetaron las muestras de escoria como tipo A, tipo B, tipo C, tipo D. Para el primer muestreo se tomaron cantidades aproximadas de 45 kilogramos por cada tipo de escoria, identificándolas y sellándolas para luego trasladarla al Centro de Investigaciones de Ingeniería USAC.

3.2.2 Segundo y tercer muestro

Para el segundo y tercer muestreo se tomó solo el tipo de escoria con mejores propiedades, de las cuales se tomaron aproximadamente 90 kilogramos de escoria, el tipo de escoria seleccionada fue el tipo D, ya que fue la que obtuvo mejores resultados estos se muestran en el capítulo cinco en el desarrollo experimental.

3.3 Obtención y preparación de la escoria

Los tipos de escorias fueron obtenidos en distintos puntos de la planta, así el tipo A y tipo B fue tomado de las chimeneas que se encuentran encima del horno de fundición y llevado hacia unos contenedores de escoria donde fueron tomadas, el tipo C fue tomado del patio de almacenamiento de la empresa *HECKETT MULTISERV*, ubicada dentro de la planta SIDEGUA.

Y el tipo D que directamente sale del crisol y es desechado en un área especial destinada para la acumulación de este tipo de escoria.

La preparación de la escoria consistió en pasar el material en el tamiz # 30 para eliminar todo desecho de chatarra o material demasiado grueso, que pudiera perjudicar los ensayos, para luego almacenar las cantidades de materiales ya afinadas en bolsas plásticas de 25 y 50 libras con su identificación respectiva.

3.4 Producción y disponibilidad de la escoria de hornos de SIDEGUA

Las cantidades de escoria que produce la planta SIDEGUA son aproximadamente 85-90 ton /mes en la cual se procesan de diez a doce coladas diarias. De esto puede tomarse la idea de que son grandes cantidades de escoria que se obtienen al mes y lo importante que sería lograr reciclar este material y a su vez que esas cantidades no sean dañinas para el medio ambiente del lugar.

3.5 Traslado a laboratorio

Las escorias obtenidas en los distintos muestreos, fueron trasladadas y analizadas a la Sección de Aglomerantes y Morteros, y el Laboratorio de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería, así como también el especial apoyo del Laboratorio de Cementos y Concretos de Cementos Progreso.

4. METODOLOGÍA DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA DE HORNOS SIDEGUA

4.1 Descripción de normas

Para evaluar y ensayar materiales puzolánicos, existe una gran variedad de normas y métodos de ensayo, ya sean químicos, físicos y mecánicos, lo que se pretende en cada ensayo es determinar su capacidad y reacción puzolánica. Por consiguiente esto estará influido por el uso que se le quiera dar al material.

En esta investigación se hizo un profundo estudio de las propiedades mecánicas y físicas de la escoria, sin embargo, de las propiedades químicas solo se determinaron las más importantes, para que puedan ser utilizadas en posteriores investigaciones.

Antes de determinarse el procedimiento de muestreo e investigación de campo se analizó cuáles normas serían las más adecuadas para el estudio, se realizó una investigación de normas relacionadas con el tema de los cementos mezclados y puzolanas artificiales, de manera que estas sirvieran para poder determinar las principales características de la escoria.

En la investigación se utilizaron tres normas ASTM, las cuales sirvieron como base para el desarrollo de toda la investigación, logrando determinar sus propiedades físicas y mecánicas. A continuación se describen las mismas.

1. Norma ASTM C-593: *Standard specification for fly ash and other pozzalans for use with lime*, (Norma de especificación estándar de puzolanas y cenizas volantes para usarlas con cal).

2. Norma ASTM C-595: *Standard specification for blended hydraulic cements*, (Norma de especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados).
3. Norma ASTM C-989: *Standard specifications for ground blast-furnace slag for use in concrete and mortars*, (Norma de especificación estándar de escoria de altos hornos para usarla en concreto y morteros).

4.1.1 Norma ASTM C-593: *Standard specification for fly ash and other pozzolans for use with lime*. (Norma de especificación estándar de puzolanas y cenizas volantes para usarlas con cal).

Esta especificación establece los procedimientos para la evaluación de cenizas volantes, puzolanas artificiales y naturales, para usarlas en mezclas de morteros con cal mediante análisis físico mecánico y químico.

Para utilizar esta norma se necesitó emplear un horno cerrado tipo vapor, mezcladora normalizada, moldes para cubos de 5 cm de arista. En materiales se utilizó cal hidratada (ASTM-C207), arena estándar y agua destilada.

El proporcionamiento, mezcla de mortero y trabajabilidad de la norma se describen a continuación.

Proporciones:

Cal hidratada	180 gramos
Puzolana	360 gramos

Arena estándar 1480 gramos

Trabajabilidad:

Cantidad de agua medida en mililitros para producir un flujo de 65 a 75 por ciento en la tabla de flujo. Se utilizó la norma ASTM C-109.

Mezclado:

La escoria y la cal debieron ser bien mezcladas en un recipiente cerrado para lograr un material homogéneo. El procedimiento de mezclado se describe en la norma de materiales ASTM C-305, el moldeo y almacenamiento de especímenes en ASTM C-109.

4.1.2 Norma ASTM C-595: *Standard specification for blended hydraulic cements.* (Norma de especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados).

Estas especificaciones cubren cinco clases de cementos hidráulicos mezclados para aplicaciones generales y especiales usando escoria o puzolana, o bien ambas con cemento portland o clinker de cemento portland o escoria con cal.

Para utilizar esta norma se necesitó una cámara de humedad, para almacenar los especímenes, mezcladora normalizada y moldes para cubos de 5 cm de arista, se utilizará cemento portland según norma ASTM C-150 y arena estándar.

El proporcionamiento que se utilizó en el desarrollo de la norma fue:

Proporción I

Cemento portland	50%
Escoria de hornos SIDEGUA	50%

Proporción II

Cemento portland	30%
Escoria de hornos SIDEGUA	70%

Proporción III

Cemento portland	70 %
Escoria de hornos SIDEGUA	30%

Mezclado:

El procedimiento de mezclado mecánico se describe en la norma ASTM C-305 y el moldeo y almacenamiento de los especímenes en la norma ASTM C-109.

Trabajabilidad:

Se realizará según norma ASTM C-109 con una cantidad suficiente de agua para producir un flujo de 105 a 115 por ciento en la tabla de flujo.

4.1.3 Norma ASTM C-989: *Standard specifications for ground blast-furnace slag for use in concrete and mortars.* (Norma de especificación estándar de escoria de altos hornos para usarla en concreto y morteros).

Estas especificaciones cubren tres grados de resistencias de escoria, para usarse como material cementante en concreto y morteros.

Para utilizar esta norma se necesitó de una cámara de humedad para almacenar los especímenes, mezcladora normalizada y moldes para cubos de 5 cm de arista, se utilizara cemento portland según norma ASTM C-150 y arena estándar.

El proporcionamiento que se según norma fue:

Cemento portland	250 gramos
Escoria de hornos SIDEGUA	250 gramos
Arena estándar	1375 gramos

Se necesitó una mezcla control para evaluar el índice de actividad puzolánica con las siguientes proporciones:

Cemento portland	500 gramos
Arena estándar	1375 gramos

Mezclado:

El procedimiento de mezclado se describe en la norma ASTM C-305, el moldeo y almacenamiento se describe en la norma ASTM C-109.

Trabajabilidad:

Para la trabajabilidad se utilizó la norma ASTM C-109 utilizando la cantidad de agua en mililitros necesaria para obtener un flujo de 105 a 115 por ciento en la tabla de flujo.

5. DESARROLLO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Realización de ensayos descritos en normas ASTM C-593, C-989, primer muestreo

Para el primer muestreo se utilizaron las norma ASTM C-593 y ASTM C-989 de los resultados dependía qué tipo de escoria se iba a seguir evaluando:

ASTM C-593

Utilizando la proporción descrita en el capítulo cuatro y el procedimiento de ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:

Cal hidratada	180 gramos
Puzolana	360 gramos
Arena estándar	1480 gramos

Tabla VII. Resistencia a compresión cal-escoria kg/cm²

MATERIAL	7 días	28 días
Tipo A	1.80	7.60
Tipo B	1.90	4.60
Tipo C	-----	-----
Tipo D	4.8	9.80

El tipo C no pudo ser evaluado a compresión debido a que no fue alcanzado el rango de flujo pedido por la norma, 65 a 75 por ciento.

Según la norma ASTM C-593 la resistencia a compresión mínima debe ser de 28.10 kg/cm², por lo cual se observó que utilizando la proporción antes mencionada con las escorias seleccionadas en la planta de SIDEGUA no se cumple con la resistencia a compresión mínima.

Determinando los requerimientos físicos de los diferentes tipos de escorias se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla VIII. Fineza (residuo) tamiz #30 y tamiz # 200

MATERIAL	% RETENIDO
Tipo A	1.5
Tipo B	30.4
Tipo C	89.6
Tipo D	36.8

Según la norma ASTM C-593 la fineza por cantidad retenido en los tamices #.30 y # 200 tiene como requisito que la cantidad mínima retenida no debe ser mayor al 30%, se puede ver que el tipo A y B lo cumplen, el tipo D se excede un mínimo y el tipo C tiene un porcentaje retenido demasiado alto lo cual da una idea de por qué no se pudo realizar el ensayo de compresión puzolana-cal ya que los rangos de flujo no pudieron ser obtenidos porque el material no era lo suficientemente fino para alcanzarlos.

Tabla IX. Peso específico

MATERIAL	Peso Específico g/cm³
-----------------	---

Tipo A	4.38
Tipo B	3.57
Tipo C	3.38
Tipo D	3.14

Los resultados del peso específico de cada tipo de escoria nos da la idea de la densidad de cada una se observa que los valores de escoria C Y D son algo parecidos y se asemejan a la densidad del cemento, mientras que los tipos A y B son un poco más densos por lo tanto un poco más pesados.

Cabe destacar que para el primer muestreo, la propiedad más importante que es la resistencia a compresión mínima no fue alcanzada lo que da la idea de que la escoria no reacciona de una manera adecuada con la cal y no alcanza propiedades cementantes satisfactorias.

5.1.2 ASTM C-989

De esta norma lo más importante fue evaluar la resistencia a compresión de los tipos de escoria y determinar su índice de actividad puzolánica, para lograr determinar cual tipo de escoria es la que presentaba mejores propiedades cementantes.

Este índice de actividad puzolánica fue determinado por medio de otra mezcla llamada control, la cual fue de cemento portland sin ninguna adición de escoria, las proporciones utilizadas de escoria fueron:

Mezcla cemento-escoria:

Cemento portland	250 gramos
Escoria de Hornos SIDEGUA	250 gramos
Arena estándar	1375 gramos

Mezcla control

Cemento portland	500 gramos
Arena estándar	1375 gramos

Uno de los primeros pasos al utilizar esta norma fue determinar las cantidades de agua necesaria para alcanzar un flujo de 110 +/- 5% en la tabla de flujo y los datos obtenidos fueron de:

Tabla X. Requerimientos de agua con un flujo de 110+/- 5%

Material	Relación agua / cemento %
Tipo A	0.60
Tipo B	0.56
Tipo C	0.64
Tipo D	0.60

Teniendo como base los requerimientos de agua se procedió a evaluar la resistencia a compresión de cada material.

Tabla XI. Resistencia a compresión kg/cm2

MATERIAL	7 días	28 días
Tipo A	1.1	1.4
Tipo B	4.6	5.8
Tipo C	40.2	51.7
Tipo D	87	133.7
Mezcla Control	327.4	413.3

Al obtener los resultados se puede ver que el tipo C y D son los que alcanzan más resistencia a compresión que los tipos A y B, pero sobre todo el tipo D es el que mejor resultado alcanza, luego se procedió a determinar el índice de actividad puzolánica con la siguiente fórmula:

Tabla XII. Índice de actividad de la escoria (%)

MATERIAL	7 días (%)	28 días (%)	Norma C-989	
			7 días	28 días
Tipo A	0.34	0.34	7 días	28 días
Tipo B	1.41	1.39	Grado 80	Grado 80
Tipo C	12.29	12.5		
Tipo D	26.59	32.34	75	75

$$IAE(\%) = \frac{\text{Resistencia a compresión escoria}}{\text{Resistencia a compresión control}} * 100$$

Habiendo encontrados los índices de actividad puzolánica de la escoria se observó que el tipo D fue el mas alto logrando un 32%, pero la norma ASTM C-989 especifica que a los veintiocho días el índice de actividad puzolanico debe ser de un 75% para

lograr por lo menos el grado 80 de los tres grados que especifica la norma (grado 80, grado 100 y grado 120) para un muestreo individual o cinco muestreos consecutivos.

Si bien para las escorias de altos hornos se piden como mínimo estos grados, la escoria de SIDEGUA no llega a considerarse una escoria de altos hornos, debido a su actual proceso de fundición, sino solamente una escoria de hornos y obteniendo este grado que sería 32% se puede obtener una idea de que al variar porcentajes de escoriamento podría obtener una mejor resistencia a compresión e incluso obtener un porcentaje mayor a 32%. Logrando con esto tener un economizador de cemento y una reducción de costo en la construcción, debido a esto se establece que el tipo por considerarse para los siguientes dos muestreos será el tipo D, ya que fue el que mejor resultado obtuvo.

Utilizando esta norma también se obtuvieron los parámetros físicos de fineza y superficie específica blaine, el ensayo de fineza es determinado por el tamiz # 325 a continuación se muestran los resultados:

Tabla XIII. Fineza Tamiz # 325

MATERIAL	% Pasa
Tipo A	97.5
Tipo B	57.7
Tipo C	35.2
Tipo D	49.1

Tabla XIV. Superficie específica Blaine cm²/gr

MATERIAL	SUPERFICIE BLAINE
----------	-------------------

TIPO A	6850
TIPO B	3530
TIPO C	-----
TIPO D	2480

La norma C-989 establece en sus especificaciones que la cantidad retenida en el tamiz # 325 no debe ser mayor a un 20%, comparando los resultados puede observarse que ninguno de los tipos de escoria seleccionada en el muestreo, satisface esta especificación lo cual da la idea de que con un mejor tratamiento de fineza o molienda del material, podría obtenerse un material más fino y así mejorar su resistencia a compresión.

La superficie específica Blaine alcanzó resultados para los tipos A y B demasiado altos, para el tipo C no pudo ser determinado, debido a que el material era demasiado pesado y no permitió desarrollar el ensayo, para el tipo D se obtuvo un valor relativamente no muy alto, aunque la norma C-989 no especifica límites, se sabe que este debería encontrarse dentro de los rangos del cemento portland.

Dentro de los requerimientos químicos solo se obtuvo el porcentaje de %SO₃, y esta fue procesada en el laboratorio de química-industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

La norma establece que el máximo porcentaje de SO₃ debe ser de 4.0, evaluando este porcentaje en los cuatro tipos de escoria y obteniendo lo siguiente:

Tabla XV. Porcentaje SO3

Tipo de escoria	% SO3
A	4.38
B	2.96
C	0.71
D	0.06

De los resultados se puede establecer que el tipo A queda fuera del requisito de la norma mientras que los siguientes tres tipos sí lo cumplen, sobre todo el tipo D ya que es el más bajo.

Selección del tipo de escoria

De los anteriores resultados, se puede determinar fácilmente que el tipo de escoria con mejores resultados físicos mecánicos y químicos es el tipo D, el cual fue el que se siguió evaluando en los siguientes dos muestreos restantes:

Desarrollo de ensayos y resultados de las normas ASTM C-593, ASTM C-595, ASTM C-989 segundo muestreo

En esta fase de la investigación se introdujo la norma ASTM C-595 la cual significa fijar los porcentajes con los que se iba a evaluar cada cemento mezclado escoria-cemento, también se realizaron los mismos ensayos de las normas ASTM C-593 y C-989 realizadas en el primer muestreo para establecer si los valores se mantenían.

Se debía también determinar si estos resultados podrían variar, ya que estaban influidos por el tipo de materia prima procesada el día del muestreo, puesto que en el

primero pudo haber sido chatarra de automóvil y en el siguiente o tercero maquinaria industrial desechada o cualquier otro desperdicio de metal.

5.3.1 ASTM C-593

Tabla XVI. Resistencia a la Compresión cal-puzolana, peso específico y residuo segundo muestreo. ASTM C-593

MATERIAL	7 días (kg/cm²)	28 días (kg/cm²)	Peso específico g/cm³	Retenido (%)
Tipo D	4.88	8.20	3.12	38.3

Con estos resultados puede verse que los valores alcanzados se mantienen semejantes al primer muestreo y que el peso específico se mantiene, la resistencia a compresión también se mantiene pero no alcanza el valor mínimo de especificado por la norma de 28.12 kg/cm² por lo tanto se establece que la proporción escoria-cal no fue satisfactoria.

5.3.2 ASTM C-989

En este muestreo se decidió determinar resistencias a compresión a temprana edad (3 días), y a edades mayores a 28 días (56 días), para observar el comportamiento de la resistencia ya que ha ocurrido que a edades mayores las resistencias de cementos mezclados han decrecido, pero dentro de la investigación no se tuvo este inconveniente.

Tabla XVII. Resistencia a compresión, índice puzolánico, fineza, superficie Blaine segundo muestro. ASTM C-989

Escoria de hornos SIDEGUA 50%

Proporción II

Cemento portland 30%

Escoria de hornos SIDEGUA 70%

Proporción III

Cemento portland 70 %

Escoria de hornos SIDEGUA 30%

De estas tres proporciones se tiene la solicitada por la norma 70% escoria y 30% cemento, proporción II y otras dos que pueden ser adaptadas al medio y al tipo de escoria de procesado actualmente en Guatemala, proporción I y III.

De estas proporciones se evaluaron la principales propiedades físicas, como fineza, densidad, superficie específica Blaine, tiempo de fraguado, resistencia a compresión, índice de actividad puzolánica para determinar en que medida se estaba de los grados de escoria de altos hornos. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

Proporción I: cemento mezclado: 50% Escoria; 50% Cemento

Tabla XVII. Resistencia a compresión e índice de actividad puzolánica 50% cemento y 50% escoria

MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kg/cm ²)				INDICE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA (%)	
	3 días	7 días	28 días	56 días	7 días	28 días
Cemento	51.34	64.83	117.57	146.97	23.90	30.74
Mezcla control		271.21	382.28			

Tabla XIX. Propiedades físicas, 50% cemento y 50% escoria

Fineza tamiz # 325	% pasa	54.2
Requerimientos de agua	Flujo 110 +/- 5%	300 ml
Relación agua / cemento	(%)	0.6
Peso específico	g/cm ³	3.1
Consistencia normal	(mm) 10 +/- 1%	185 ml
Tiempo de fraguado	h to	03:51
	tf	05:30

De la proporción utilizada se puede observar que se alcanzó aproximadamente un 31% de índice de actividad puzolánica y no se alcanzó lo establecido en la norma, que es un 75% para el grado 80, el cual es el menor de los tres grados mencionados en la misma.

Proporción II: cemento mezclado: 70% escoria; 30% cemento

Tabla XX. Resistencia a Compresión e índice de actividad puzolánica 30% cemento y 70% escoria

MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kg/cm ²)				INDICE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA (%)	
	3 días	7 días	28 días	56 días	7 días	28 días
Cemento	5.62	28.54	54.89	58.76	9.95	14.89
Mezcla control		286.76	368.59			

Tabla XXI. Propiedades físicas, 30% cemento y 70% escoria

Fineza tamiz # 325	% pasa	65.5
Requerimientos de agua	Flujo 110 +/- 5%	320 ml
Relación agua / cemento	(%)	0.64
Peso específico	gr/cm ³	3.13
Trabajabilidad normal	(mm) 10 +/- 1%	210 ml
Tiempo de fraguado	Hrs to	01:06
	tf	06:30

De esta proporción, que es la solicitada por la norma puede observarse que el índice de actividad puzolánica queda muy por debajo de los grados de porcentaje de la norma, lo que implica utilizar la última proporción.

Proporción III: cemento mezclado: 30% escoria; 70% cemento

Tabla XXII. Resistencia a Compresión e índice de actividad puzolánica 70% cemento y 30% escoria

MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kg/cm ²)				INDICE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA (%)	
	3 días	7 días	28 días	56 días	7 días	28 días
Cemento	124.63	171.32	220.20	233.11	60.85	61.11
Mezcla control		281.54	360.33			

Tabla XXIII Propiedades físicas, 70% cemento y 30% escoria

Fineza tamiz # 325	% pasa	68.60
Requerimientos de agua	Flujo 110 +/- 5%	295 ml
Relación agua / cemento	(%)	0.59
Peso específico	gr/cm ³	3.14
Trabajabilidad normal	(mm) 10 +/- 1%	200 ml
Tiempo de fraguado	h to	03:33
	tf	07:00

De esta tercera proporción se puede observar que el índice de actividad puzolánica es mas alto que las anteriores proporciones, lo que permite establecer que con un mejor tratamiento de la escoria procesada en la planta SIDEGUA y siguiendo esta proporción podríamos alcanzar mejores resultados.

5.4 Desarrollo de ensayos y resultados de las normas ASTM C-595 tercer muestreo

5.4.1 ASTM C-595

En esta etapa de la investigación que fue la última se realizó el mismo proceso del segundo muestreo, siendo el objetivo determinar si los valores alcanzados se mantienen debido a que como ya se mencionó antes, la escoria está altamente influido por el lote de materia prima que pudo haber sido procesada durante el día de cada muestreo, debido a esto se realizó el tercer muestreo para observar el comportamiento de la escoria.

Proporción I: cemento mezclado: 50% escoria; 50% cemento

Tabla XXIV. Resistencia a compresión e índice de actividad puzolánica 50% cemento y 50% escoria. Tercer muestreo ASTM C-595.

MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kg/cm ²)				INDICE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA (%)	
	3 días	7 días	28 días	56 días	7 días	28 días
Cemento	54.82	81.36	117.53	164.66	29.30	32.27
Mezcla control		277.67	364.20			

Tabla XXV. Propiedades físicas, 50% cemento y 50% escoria.

Tercer muestreo ASTM C-595

Fineza tamiz # 325	% pasa	56.1
Requerimientos de agua	Flujo 110 +/- 5%	300 ml
Relación agua / cemento	(%)	0.6
Peso específico	gr/cm ³	3.1
Consistencia normal	(mm) 10 +/- 1%	190 ml
Tiempo de fraguado	Hrs to	04:00
	tf	05:30

Proporción II: cemento mezclado: 70% escoria; 30% cemento

Tabla XXVI. Resistencia a Compresión e índice de actividad puzolánica 30% cemento y 70% escoria. Tercer Muestreo ASTM C-595

MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kg/cm ²)				INDICE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA (%)	
	3 días	7 días	28 días	56 días	7 días	28 días
Cemento	6.46	31.00	83.30	87.82	10.69	22.59
Mezcla control		289.94	368.72			

Si se compara este resultado con el segundo muestreo, se observa que se tuvo un ligero incremento de índice de actividad puzolánica pero que de todas maneras no se alcanzo lo deseado por la norma.

Tabla XXVII. Propiedades físicas, 30% cemento y 70% escoria

Fineza tamiz # 325	% pasa	60.00
--------------------	--------	-------

Requerimientos de agua	Flujo 110 +/- 5%	320 ml
Relación agua / cemento	(%)	0.64
Peso específico	gr/cm ³	3.13
Trabajabilidad normal	(mm) 10 +/- 1%	210 ml
Tiempo de fraguado	Hrs to	01:00
	Tf	06:20

Proporción III: cemento mezclado: 30% escoria; 70% cemento

Tabla XXVIII. Resistencia a compresión e índice de actividad puzolánica 70% cemento y 30% escoria. Tercer muestreo. ASTM C-595

MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kg/cm ²)				INDICE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA (%)	
	3 días	7 días	28 días	56 días	7 días	28 días
Cemento	126.52	171.77	235.11	240.69	62.44	64.90
Mezcla control		275.09	362.26			

A continuación se muestran los valores de los parámetros físicos para este tipo de proporción.

Tabla XXIX Propiedades físicas, 70% cemento y 30% escoria

Tercer muestreo ASTM C-595

Fineza tamiz # 325	% pasa	70.06
Requerimientos de agua	Flujo 110 +/- 5%	295 ml
Relación agua / cemento	(%)	0.59
Peso específico	gr/cm ³	3.14
Trabajabilidad normal	(mm) 10 +/- 1%	205 ml
Tiempo de fraguado	Hrs to	03:50
	tf	07:15

5.5 Componentes químicos segundo y tercer muestreo escoria tipo D

Dentro de los parámetros químicos solo se determinaron los mas importantes para ser comparados con propiedades químicas de escoria de altos hornos de varios países. Con estos valores encontrados se puede hacer una breve comparación de la escoria producida en SIDEGUA contra escoria de altos hornos de algunos países como se mostró en el capítulo dos. A continuación se muestran los componentes obtenidos en los últimos dos muestreos y se compara con componentes de escoria de altos hornos de EE.UU. y Japón.

Tabla XXX. Componentes químicos de la escoria

Componente	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Norte América	Clinker
SiO ₂	22.02	21.49	21.62	37.5	22.3
Al ₂ O ₃	6.16	5.37	7.45	8.3	5.8
Fe ₂ O ₃	9.11	1.81	8.56	0.4	2.5
CaO	41.91	46.35	49.81	40	65.8
MgO	15.4	20.04	18.87	10.01	1.3
K ₂ O	0.38	0.36	0.37	0.4	0.3
Na ₂ O	0.01	0	0	0	0.5

De estos resultados se puede observar que el contenido de sílice es muy similar al clinker, el contenido de óxido de aluminio es semejante pero el contenido de óxido de hierro es relativamente alto al del clinker y esto se debe a que la escoria proviene de una fundición siderúrgica. Es notable que del segundo al tercer muestreo existe una gran diferencia del óxido de hierro y esto puede ser debido al tipo de materia prima existente el día del muestreo uno y el muestreo dos.

El óxido de magnesio se encuentra relativamente mayor al de las escorias de altos hornos de Japón y EE.UU. así como también al clinker, esta cantidad de óxido de magnesio es producido por la adición de coque y cal a la escoria y puede que la cal utilizada sea cal no hidratada, o bien un tipo de cal no procesada como la que existe en este mercado. Si se usara cal de mejor calidad esta escoria podría mejorar sus propiedades y no tener cantidades tan grandes de magnesio, asimilándose de esta manera a las escorias de altos hornos, si bien esta sería una ventaja, la desventaja estaría en que el costo del proceso de obtención de la escoria se incrementaría debido a esta inclusión de cal de mejor calidad.

Entonces es importante decir, que la escoria estudiada no tiene malos resultados en sus componentes químicos evaluados y por lo tanto un mejor tratamiento de la escoria puede llevar a mejores resultados que los encontrados en esta investigación, posiblemente se podría estudiar qué sucedería si se utilizara un mejor tipo de cal como se menciona anteriormente, así como también realizar una investigación de los distintos procesos de selección de materia prima que se realizan dentro de la planta y tener un monitoreo de la materia prima que se utiliza en cada día y compararlo contra la escoria resultante de cada colada y poder observar si esta tiene un comportamiento variable.

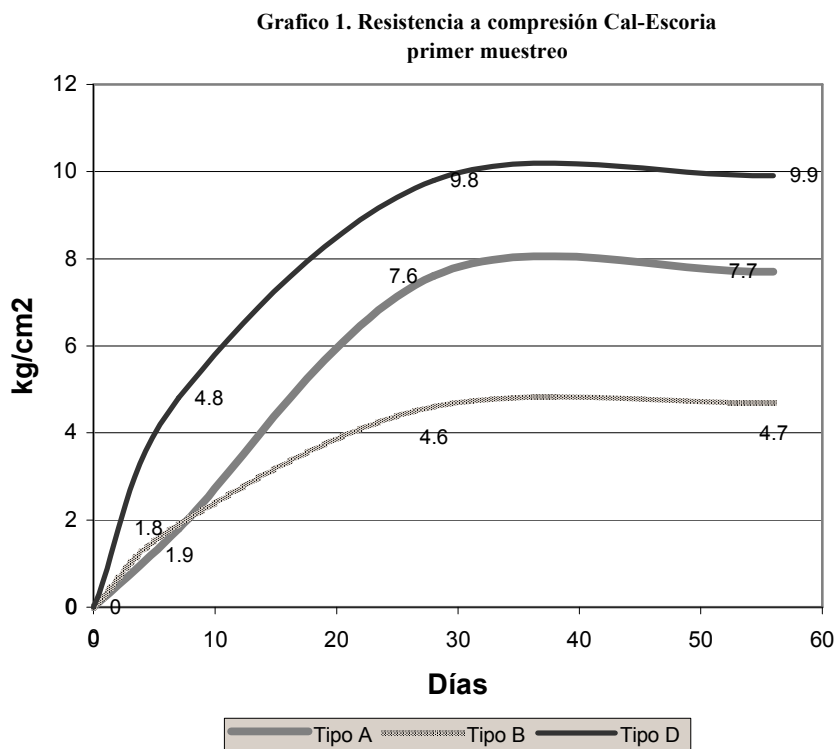
En el siguiente capítulo se describen los resultados anteriores en gráficos para tener un mejor idea de estos, se describen las tres fases de la investigación, primer, segundo y tercer muestreo.

Con los siguientes gráficos se tiene una mejor visualización de las distintas resistencias a compresión de cada tipo de escoria y de las distintas proporciones que fueron fijadas durante el segundo muestreo, se hace además una comparación de las finezas, pesos específicos y superficies específicas de los distintos tipos de escorias y proporciones.

6. GRÁFICAS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LA ESCORIA DE HORNOS DE SIDEGUA

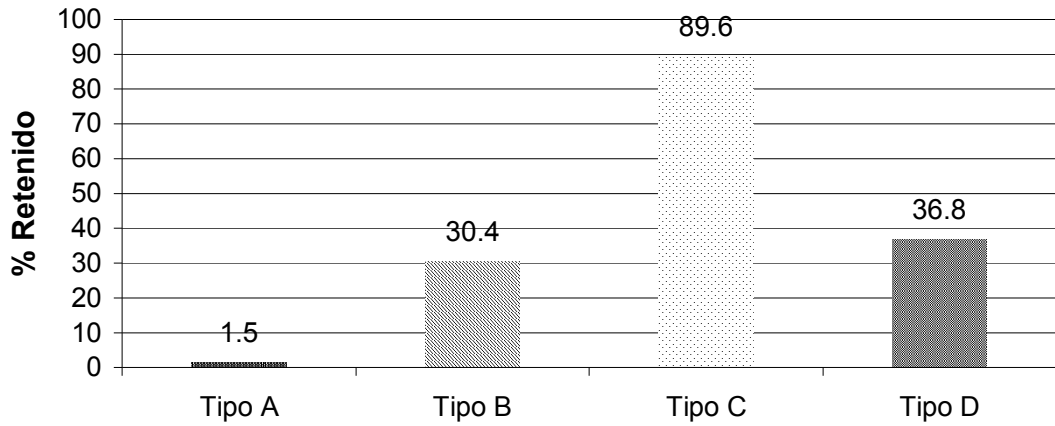
6.1 Primer muestreo

6.1.1 ASTM C-593



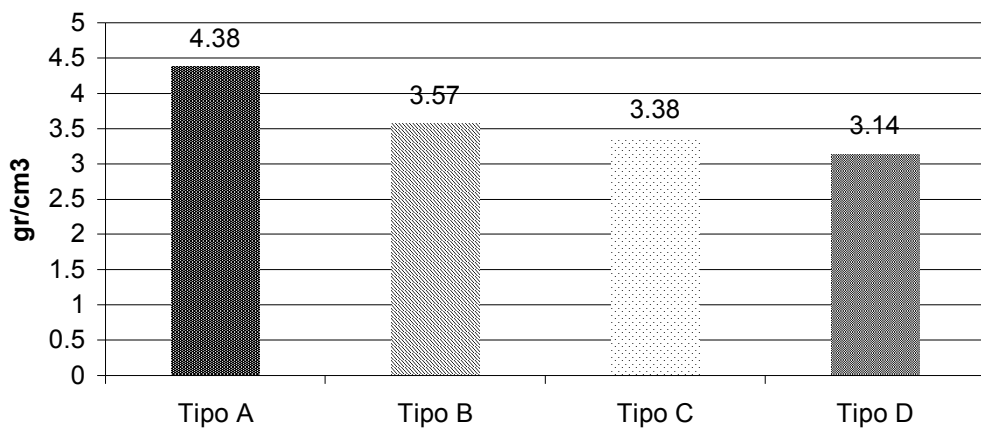
La norma ASTM C-593 tiene como requerimiento alcanzar 28.12 kg/cm² de resistencia a compresión a los veintiocho días.

**Gráfico 2. Fineza residuo
primer muestreo**



La fineza, por cantidad retenida según norma ASTM C-593, en el tamiz # 30 debe ser de 2% máximo y en el tamiz # 200 30% máximo.

**Gráfico 3. Peso Específico
primer muestreo**



6.1.2 ASTM C-989

Grafico 4. Resistencia a Compresion primer muestreo

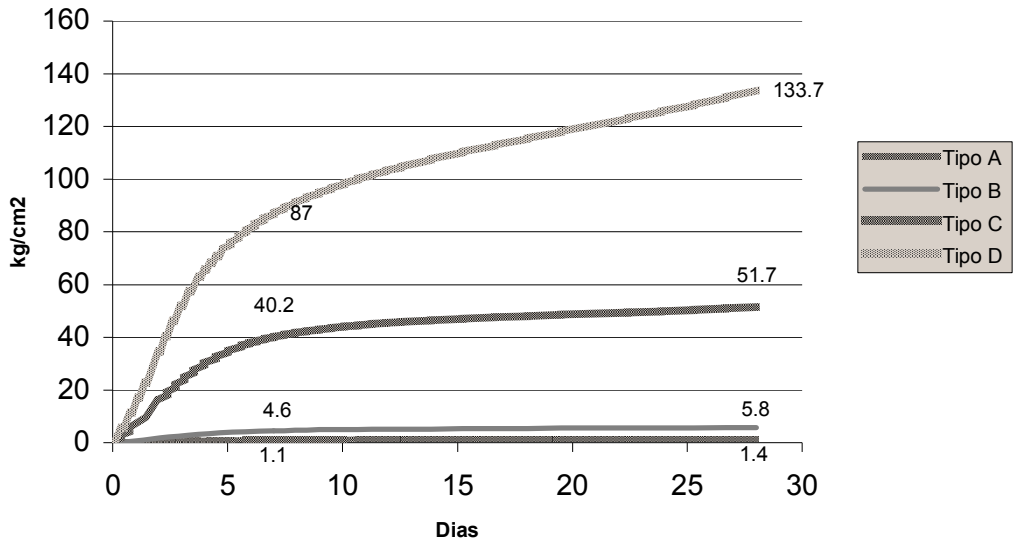
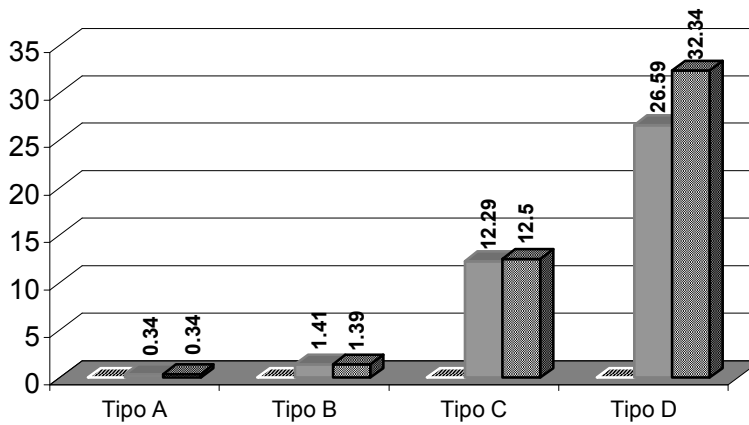


Grafico 5. Índice de actividad puzolánica (%). cuatro tipos de escorias



La norma ASTM C-989 tiene como requerimiento que el índice de actividad puzolánica alcance el 75% para clasificarla, como mínimo, una escoria de grado 80. La norma también establece escorias de grados 100 y 120.

**Grafico 6. Fineza tamiz #.325
cuatro tipos de escoria**

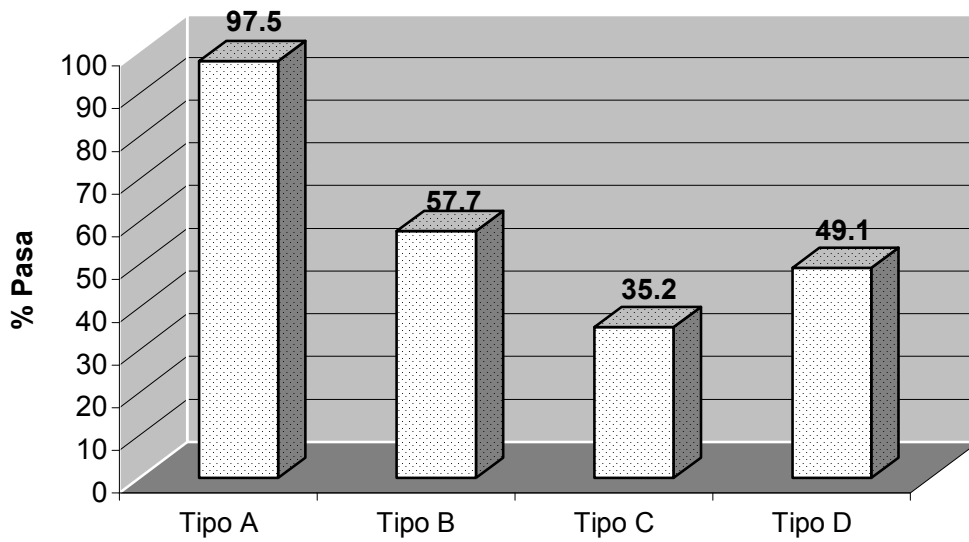
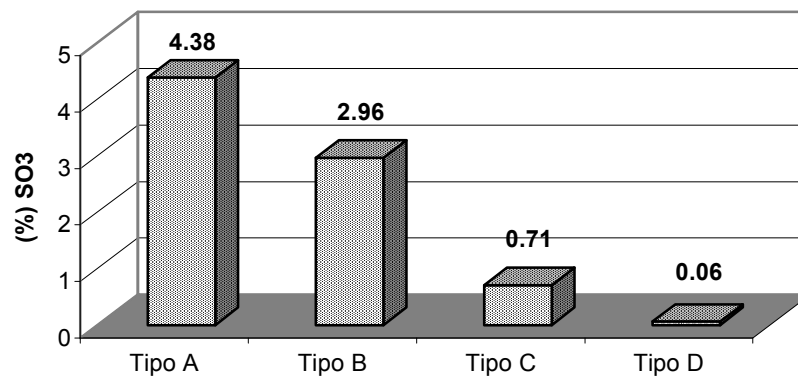


Grafico 7. Porcentaje de SO3 (%) ASTM C-989

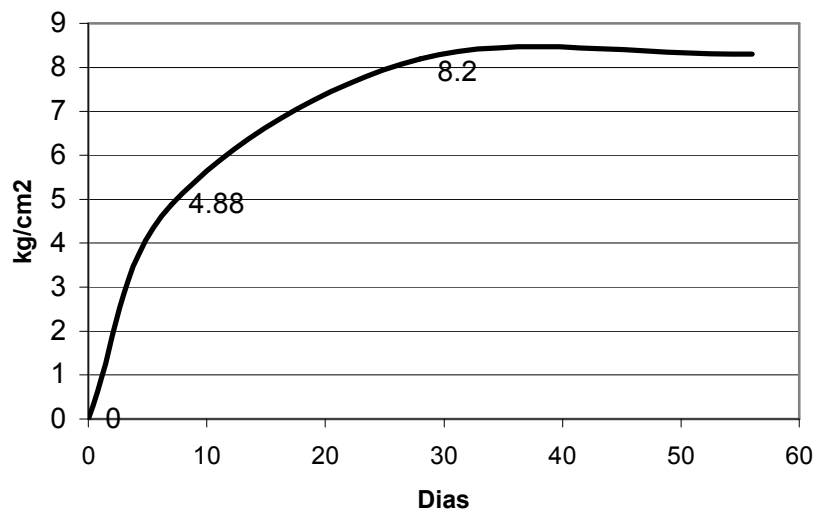


Dentro de los requerimientos de la norma ASTM C-989, establece que el máximo porcentaje de SO3 debe ser de 4%.

6.2 Segundo muestreo y selección de tipo de escoria

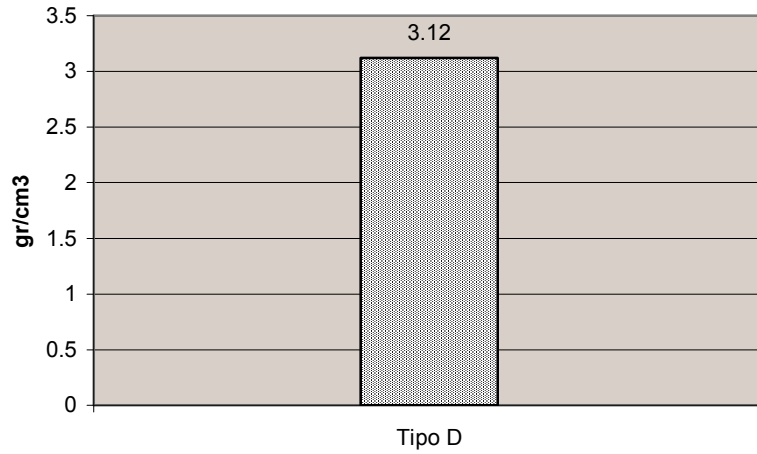
6.2.1 ASTM C-593

Gráfica 8. Resistencia cal-escoria segundo muestreo

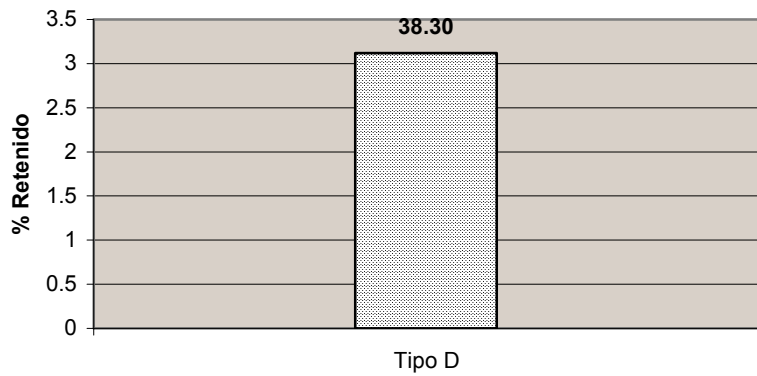


El requerimiento mínimo de resistencia a compresión según la norma debe ser de 28.12 kg/cm². Es importante notar, que para el primero y segundo muestreo no se alcanzó lo deseado por la norma.

**Gráfica 9. Peso específico
segundo muestreo**



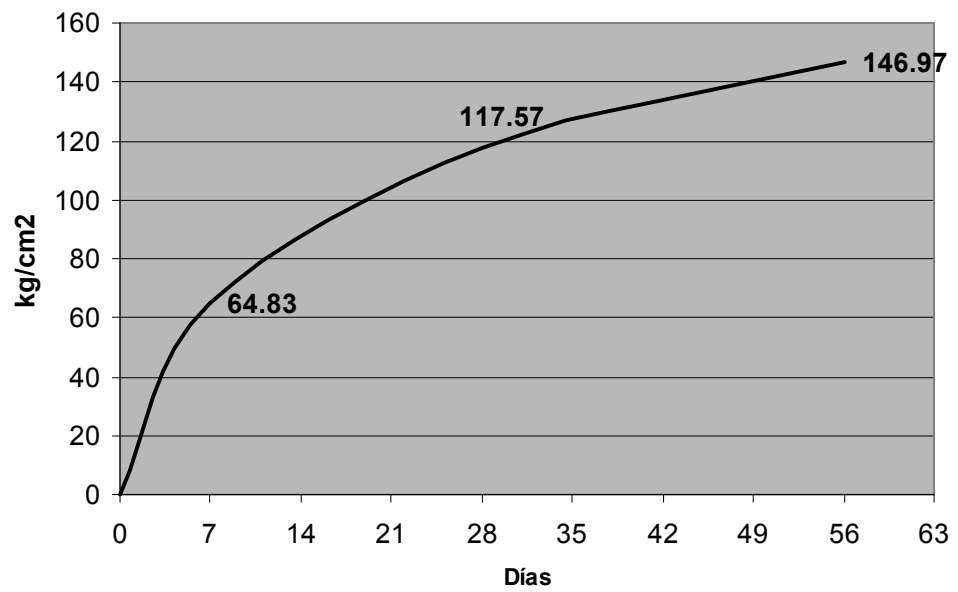
**Gráfica 10. Fineza residuo
segundo muestreo**



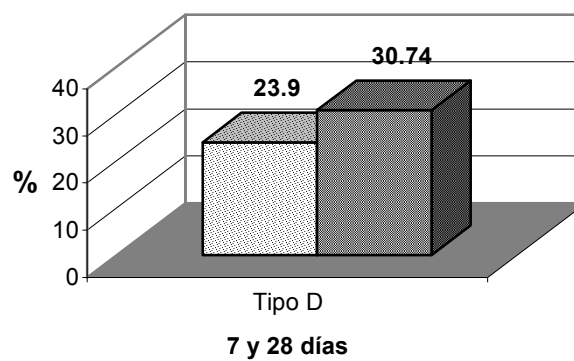
Según norma, la cantidad máxima retenida en el tamiz # 30 debe ser de 2% máximo y en el tamiz #200 de 30% máximo.

6.2.2 ASTM C-989

Grafico 11. Resistencia a compresión segundo muestreo



Gráfica 12. Índice de actividad puzolánica segundo muestreo

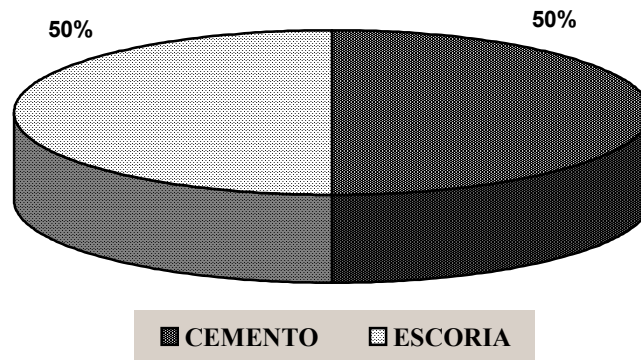


La norma establece un 75% mínimo de índice de actividad puzolánica para ser considerada, como mínimo, una escoria de grado 80.

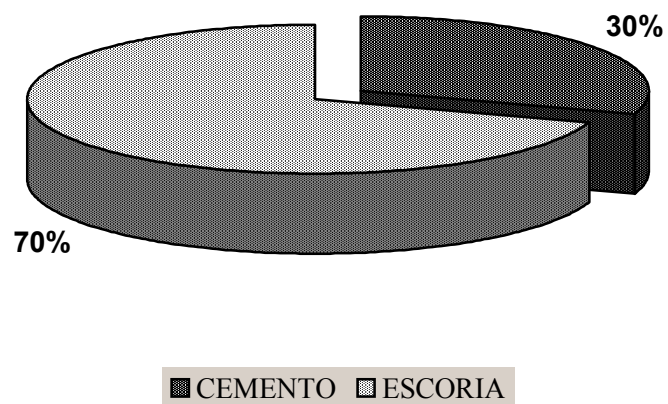
6.2.3 ASTM C-595

En esta fase de la investigación se procedió a definir tres tipos de proporciones para que fueran evaluados los índices de actividad puzolánica en cada una de estas y su respectiva resistencia a compresión.

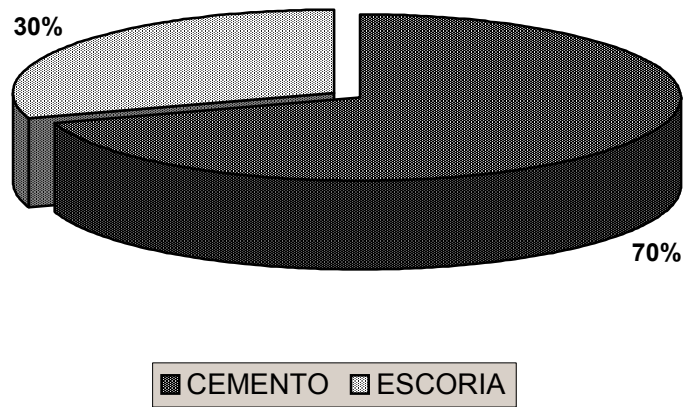
Gráfica 13. Proporción I



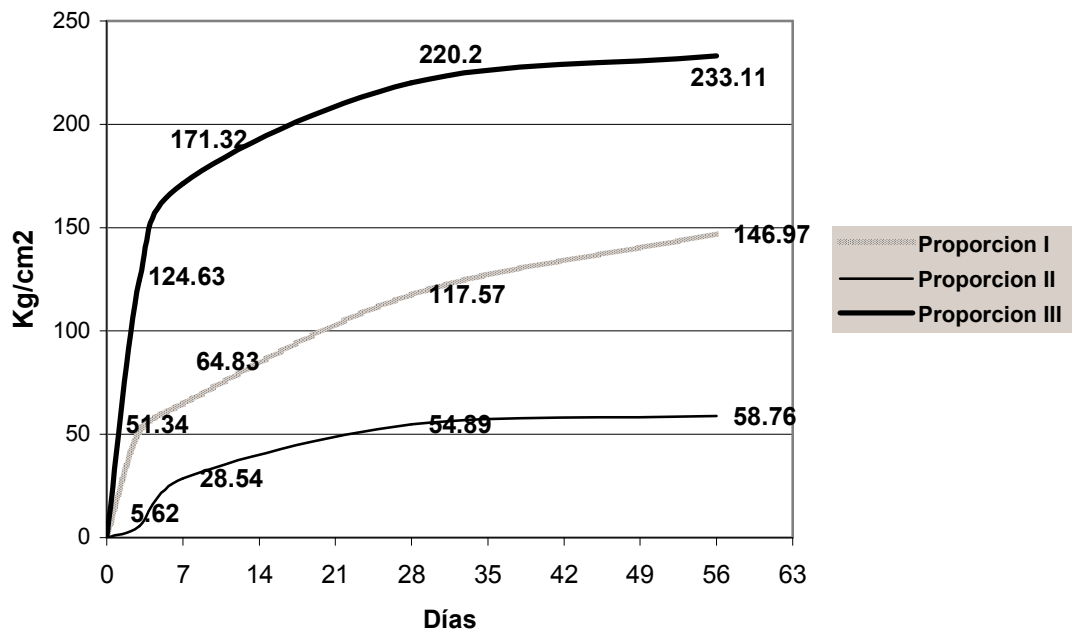
Gráfica 14. Proporción II



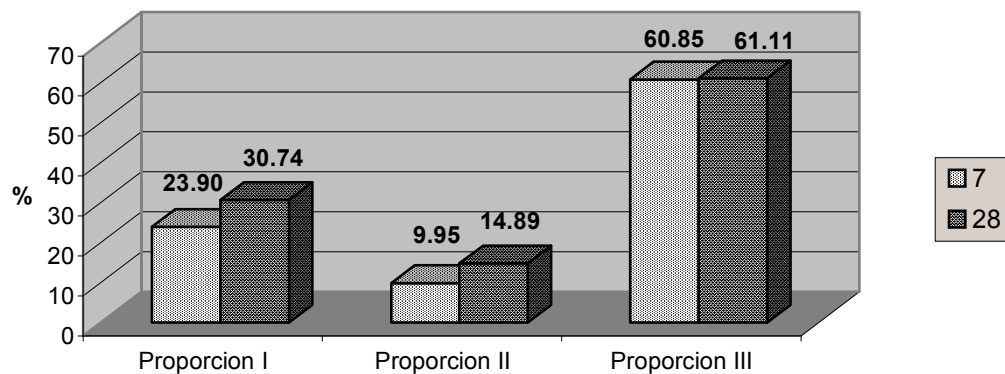
Gráfica 15. Proporción III



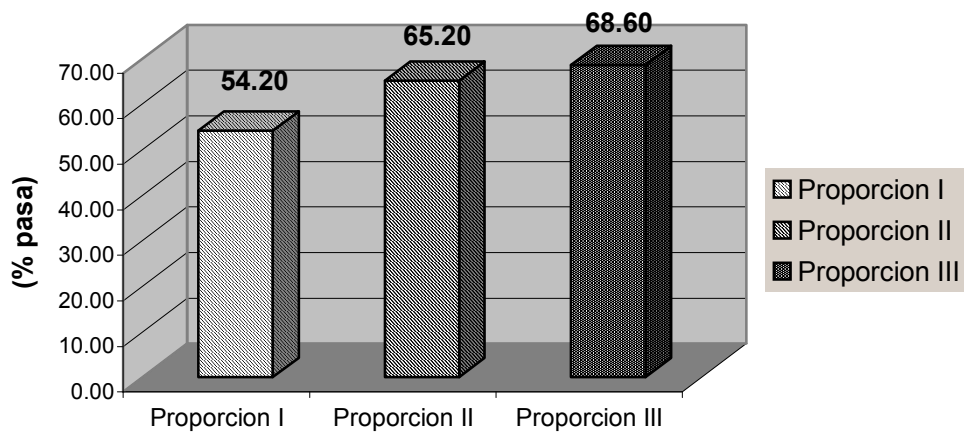
Gráfica 16. Resistencia a compresión de las tres proporciones



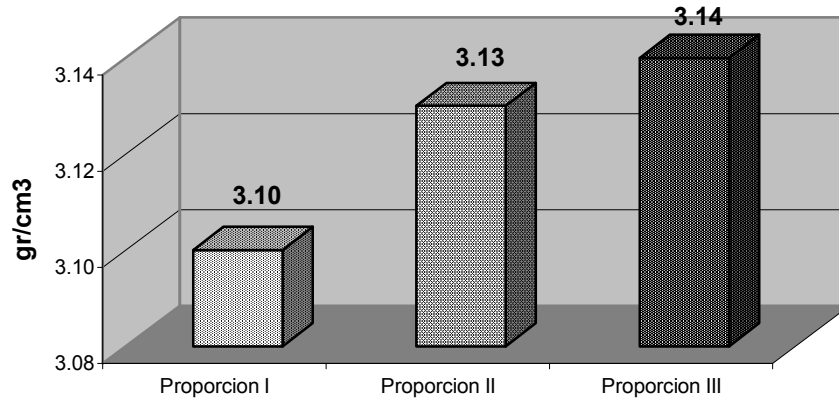
Gráfica 17. Índice de actividad puzolánica de las tres proporciones



Gráfica 18. Fineza tamiz #325 de las tres proporciones



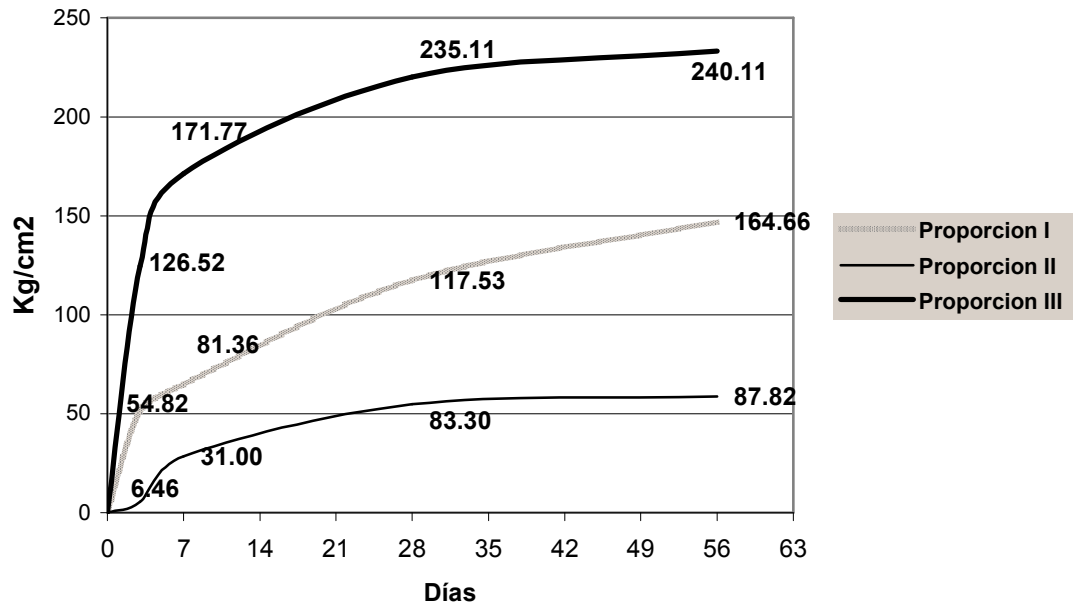
Gráfica 19. Peso específico de las tres proporciones



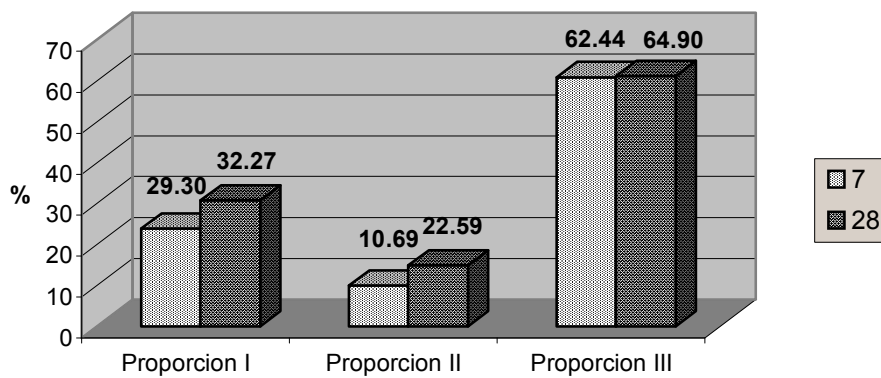
6.3 Tercer muestreo, seguimiento de los resultados del segundo muestreo

6.3.1 ASTM C-595

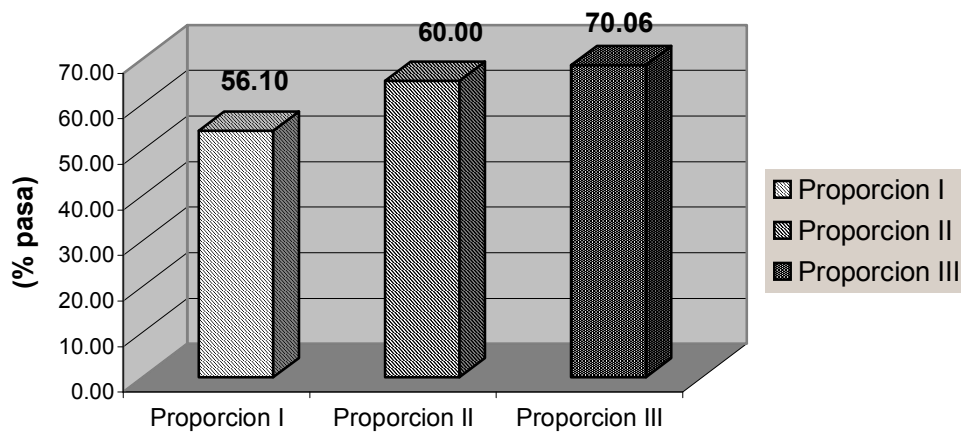
Gráfica 20. Resistencia a compresión de las tres proporciones tercer muestreo



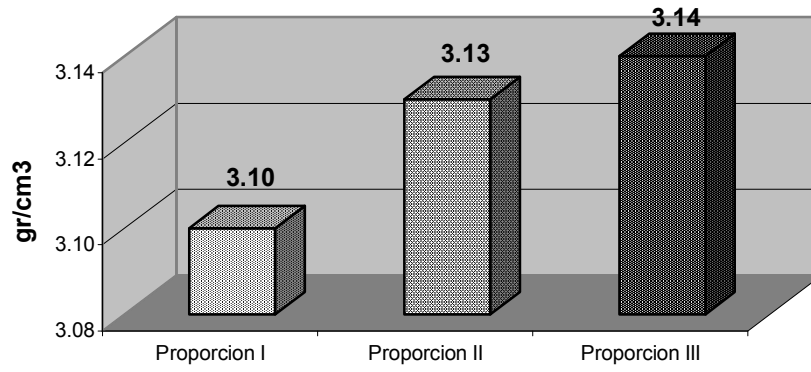
Gráfica 21. Índice de actividad puzolánica de las tres proporciones tercer muestreo



Gráfica 22. Fineza tamiz #325 de las tres proporciones



**Gráfica 23. Peso específico de las tres proporciones
tercer muestreo**



CONCLUSIONES

1. La escoria de hornos de SIDEGUA no cumple con los parámetros que requiere una puzolana artificial, por lo que se sugiere evaluarla como agregado para concreto.
2. La fineza del material en el tamiz # 325 no cumplió con lo establecido por la norma por lo que debe de utilizarse algún medio mecánico para mejorar su fineza.
3. El grado de escoria mínimo quedó por debajo de lo establecido por la norma ASTM C-989.
4. La reacción puzolana-cal, requerida por la norma ASTM C-593 no tuvo los resultados satisfactorios por lo que la reacción entre cal-escoria no es satisfactoria.
5. El contenido de óxido de magnesio que contiene la escoria es muy alto y a su vez perjudicial para el cemento.

6. Dentro de las proporciones utilizadas según norma ASTM C-595 ninguna alcanzó el grado de escoria mínima.
7. La diferencia entre la escoria de altos hornos con la escoria de hornos de SIDEGUA, se debe a que la primera obtiene mejores propiedades químicas en el proceso de fundición siderúrgico.
8. Se analizaron cuatro tipos de escoria, de las cuales el tipo D fue el que mejor se comportó durante todo el estudio pero no alcanzó lo requerido por las normas.
9. En los distintos cementos mezclados hechos a base de escoria y cemento portland tipo I, se pudo observar que a mayores cantidades de escoria el tiempo de fraguado se acelera.
10. Si se realizaran mezclas con la escoria de hornos de SIDEGUA, es importante que los materiales se mezclen de una manera íntima, ya sea con un medio mecánico o manual para obtener mejores resultados.

RECOMENDACIONES

1. Se debe analizar la escoria de hornos de SIDEGUA, como un agregado para concreto y determinar si este puede ser un producto reciclable y evitar que este cause daño al medio ambiente, por la acumulación diaria.
2. Hacer investigaciones utilizando escoria de hornos de SIDEGUA como agregado para bloques de mampostería, para ver si existe la posibilidad de utilizarlos en el medio y que los presentes resultados se utilicen como un esquema inicial para futuras investigaciones.
3. Determinar las diferencias que pueden existir entre el tipo de materia prima procesada en un día de muestreo y otro para poder determinar en qué pueden ser afectados los resultados.
4. Se espera que para futuras investigaciones se preste atención al proceso de fundición siderúrgico de SIDEGUA y observar los contenidos de magnesio que contiene la escoria y ver cómo se pueden mejorar estos sin afectar al producto principal, que en este caso es el acero.
5. Hacer un esquema detallado de la materia prima que utiliza la planta SIDEGUA para poder establecer las influencias que pueden generarle a la escoria resultante.

BIBLIOGRAFÍA

1. *American Society for Testing and Materials. Cement; Lime; Gypsum. (Annual book of ASTM standards, Section 4 Vol. 4.01,)* Philadelphia EEUU. 1990. 696pp.
2. *American Society for Testing and Materials. Cement; and Mineral Aggregates. (Annual book of ASTM standards, Section 4 Vol. 4.02,)* Philadelphia EEUU. 1990. 912pp.
3. Biblioteca del Centro Internacional de Investigaciones para el desarrollo de Canadá. “Proyecto Escoria de Altos Hornos Argentina” **Documento** (Canada) (3p): 85-1015. 1991.
4. Cámara Guatemalteca de la Construcción. “Boletín Estadístico # 91” **Boletín Estadístico Trimestral**, (Guatemala) (91): 2-7. 2002.
5. Castañeda Lemus, Sergio Vinicio. Evaluación de admixturas para concreto de acuerdo a la norma Coguanor NGO 41 044 87 “muestreo y métodos de análisis de cenizas volantes de carbón y puzolanas naturales empleadas como aditivo mineral al hormigón (concreto) de cemento Pórtland”. Tesis Ingeniería Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2000. 21pp.
6. Cementos Progreso. “*Supplementary Cementing Materials for use in blended cements*” Boletín RD 112T. (#112): 40pp. 2002.
7. Martirena, José y otros. **Manual de control de la calidad**. (CIDEM, ECOSUR, 1999) pp.1-29.
8. V.A. Kudrin. **Metalurgia del acero**. (MIR, 1984) pp.1-50.

